

مشخصات فنی عمومی و اجرایی

پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال

سیستم حفاظت از صاعقه در خطوط هوایی انتقال نیرو

نشریه شماره ۲-۴۴۵

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 صاعقه در خطوط هوایی انتقال نیرو

نشریه شماره ۲-۴۴۵

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>



omoorepeyman.ir



بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

شماره:	۱۰۰/۱۱۰۶۰۳
تاریخ:	۱۳۸۷/۱۱/۲۰
بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	
موضوع:	
مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از صاعقه در خطوط هوایی انتقال نیرو	
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 ۴۴۵ دفتر نظام فنی اجرایی، در دو جلد با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از صاعقه در خطوط هوایی انتقال نیرو (جلد اول) و (جلد دوم)» 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 رئیس جمهور <i>امیرمنصور</i>	



اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور 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>



اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور 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 صاعقه در خطوط هوایی انتقال نیرو - جلد دوم» در بر گیرنده مباحث مربوط به اهداف، کلیات و تعاریف، معرفی و شناخت سیستم حفاظت خطوط هوایی انتقال نیرو در برابر صاعقه، اصول و مبانی طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به خطوط هوایی انتقال نیرو، و الزامات استاندارد و آزمون های مورد نیاز، می باشد که در چهار فصل و هفت پیوست ارائه شده است.

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

۱۳۸۷



مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها و خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو - نشریه شماره ۲- ۴۴۵

تهیه کننده

این مجموعه به وسیله شرکت مهندسين مشاور نیرو با همکاری آقایان مهندس شهرام کاظمی، دکتر عارف درودی و دکتر سید حسین حسینیان 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 شرکت‌های 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 حسین ایلخانی	شرکت مشانیر
آقای مهندس حمید رضا پوریگ	شرکت مشانیر
آقای مهندس حسین جلالی فراهانی	مهندسين مشاور نیرو
آقای مهندس حسین دانشور	مهندسين مشاور قدس نیرو
آقای دکتر عارف درودی	مهندسين مشاور نیرو
آقای مهندس علی اصغر کسائیان	مهندسين مشاور قدس نیرو
آقای مهندس محمد مهدی محسنی	مهندسين مشاور نیرو
آقای مهندس اباذر میرزایی	مشاور معاون هماهنگی و نظارت بر بهره برداری سازمان توانیر
آقای مهندس احسان الله زمانی	وزارت نیرو - سازمان توانیر - دبیر کمیته فنی طرح

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



فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول - معرفی و شناخت سیستم حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو

۳-۱-۱- پدیده برخورد صاعقه	۳
۳-۱-۱-۱- صاعقه و نحوه شکل گیری آن	۳
۳-۱-۱-۲- مشخصات صاعقه	۵
۳-۱-۱-۳- فاصله برخورد	۷
۳-۱-۲- سطح کرونیک	۹
۳-۱-۳- چگالی صاعقه های برخوردی به زمین	۱۲
۴-۱- مدل هندسی آخرین جهش ضربه صاعقه	۱۲
۵-۱- مدل هندسی تصحیح شده Eriksson	۱۶

فصل دوم - اصول و مبانی طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به خطوط هوایی انتقال نیرو

۱-۲- کلیات	۲۳
۲-۲- جایابی بهینه سیم های حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو	۲۴
۱-۲-۲- روش مدل هندسی	۲۴
۱-۲-۲-۱- مفاهیم پایه ای	۲۴
۱-۲-۲-۲- تعیین فواصل DC و Dg	۲۷
۱-۲-۲-۳- حداکثر جریان خطای سیستم حفاظت از صاعقه Im	۲۸
۱-۲-۲-۴- نرخ قوس الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه، SFFOR	۲۹
۱-۲-۲-۵- زاویه حفاظت کامل	۳۱
۱-۲-۲-۶- زاویه برخورد	۳۲
۱-۲-۲-۲- مدل اصلاح شده Eriksson	۳۲
۱-۲-۲-۲- محاسبه SFFOR	۳۲
۱-۲-۲-۲- محاسبه زاویه حفاظت کامل و حداکثر جریان خطای سیستم حفاظت از صاعقه	۳۴
۱-۲-۲-۳- آنالیز حساسیت بر روی زاویه حفاظت کامل [۱]	۳۴
۱-۲-۲-۴- انتخاب زاویه حفاظتی براساس SFFOR	۳۷
۱-۲-۲-۵- متغیرهای طراحی	۴۱
۱-۲-۲-۵-۱- آثار ناشی از شیب دار بودن زمین	۴۱
۱-۲-۲-۵-۲- آثار ناشی از درختان مجاور خط انتقال	۴۳
۱-۲-۲-۵-۳- آثار ناشی از قرارگیری برج بر روی بلندی	۴۳
۱-۲-۲-۵-۴- هادی های فاز مرکزی خط انتقال	۴۳



۴۴	۲-۲-۶- یک روش ساده جهت محاسبه SFFOR
۴۴	۲-۲-۷- روش گام به گام جابجایی بهینه سیم‌های حفاظت از صاعقه
۴۶	۳-۲- مشخصات سیم حفاظت از صاعقه از دیدگاه الکتریکی
۴۶	۲-۳-۱- بررسی جریان عبوری از سیم‌های حفاظتی از دیدگاه اتصال کوتاه
۵۸	۲-۳-۲- تعیین میزان ظرفیت عبور جریان از سیم‌های حفاظت از صاعقه
۶۲	۴-۲- مشخصات سیم حفاظت از صاعقه از دیدگاه مکانیکی

فصل سوم - نیازمندیها و آزمونها

۶۵	۱-۳- سیم‌های حفاظتی معمولی
۶۶	۲-۳- سیم‌های حفاظتی مبتنی بر تکنولوژی فیبرنوری (OPGW)
۶۶	۳-۲-۱- تعاریف
۶۷	۳-۲-۲- آزمونهای OPGW
۶۷	۳-۲-۱- طبقه‌بندی آزمونها
۶۷	۳-۲-۲- آزمونهای مورد نیاز
۶۹	۳-۲-۳- بازرسی
۶۹	۳-۲-۳- نیازمندیهای آزمون
۶۹	۳-۲-۱- آزمون تنش - کرنش
۶۹	۳-۲-۳- آزمون عملکرد کششی
۷۰	۳-۲-۳- آزمون قرقره
۷۰	۳-۲-۴- آزمون ارتعاشات آتولین
۷۱	۳-۲-۵- آزمون گالوپینگ (در مواقعی که لزوم انجام آن مشخص شده باشد)
۷۱	۳-۲-۶- آزمون پیری (در مواقعی که لزوم انجام آن مشخص شده باشد)
۷۱	۳-۲-۷- آزمون چرخه حرارتی (در مواقعی که لزوم انجام آن مشخص شده باشد)
۷۲	۳-۲-۸- آزمون نفوذ آب (در مواقعی که لزوم انجام آن مشخص شده باشد)
۷۲	۳-۲-۹- آزمون اتصال کوتاه
۷۲	۳-۲-۱۰- آزمون صاعقه
۷۴	پیوست (۱-۳): روشهای توصیه‌ای برای محاسبه استقامت کششی نامی (RTS)
۷۶	پیوست (۲-۳): روشهای آزمون قرقره
۷۸	پیوست (۳-۳): روش آزمون ارتعاشات آتولین
۸۰	پیوست (۴-۳): روش آزمون گالوپینگ
۸۲	پیوست (۵-۳): روش آزمون اتصال کوتاه
۸۴	پیوست (۶-۳): آزمونهایی برای شرایط صاعقه
۸۵	پیوست (۷-۳): روش آزمونی برای تعیین ظرفیت پایداری OPGW در مقابل ضربات صاعقه

منابع و مراجع



فصل ۱

معرفی و شناخت سیستم حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو



مقدمه

وظیفه سیستم حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه به هادی‌های فاز می‌باشد. حفاظت کامل هادی‌های فاز در مقابل برخورد مستقیم صاعقه عملاً امکان‌پذیر نبوده و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه نمی‌باشد. در هر حال به لحاظ مسائل اقتصادی و ریسک در نظر گرفته شده، تعداد و محل سیم‌های محافظ هوایی در خط انتقال به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که از برخورد مستقیم صاعقه‌های مشخصی که می‌توانند برای سیستم انتقال مشکل‌ساز باشند، ممانعت به عمل آید و یا اینکه احتمال آن کاهش یابد.

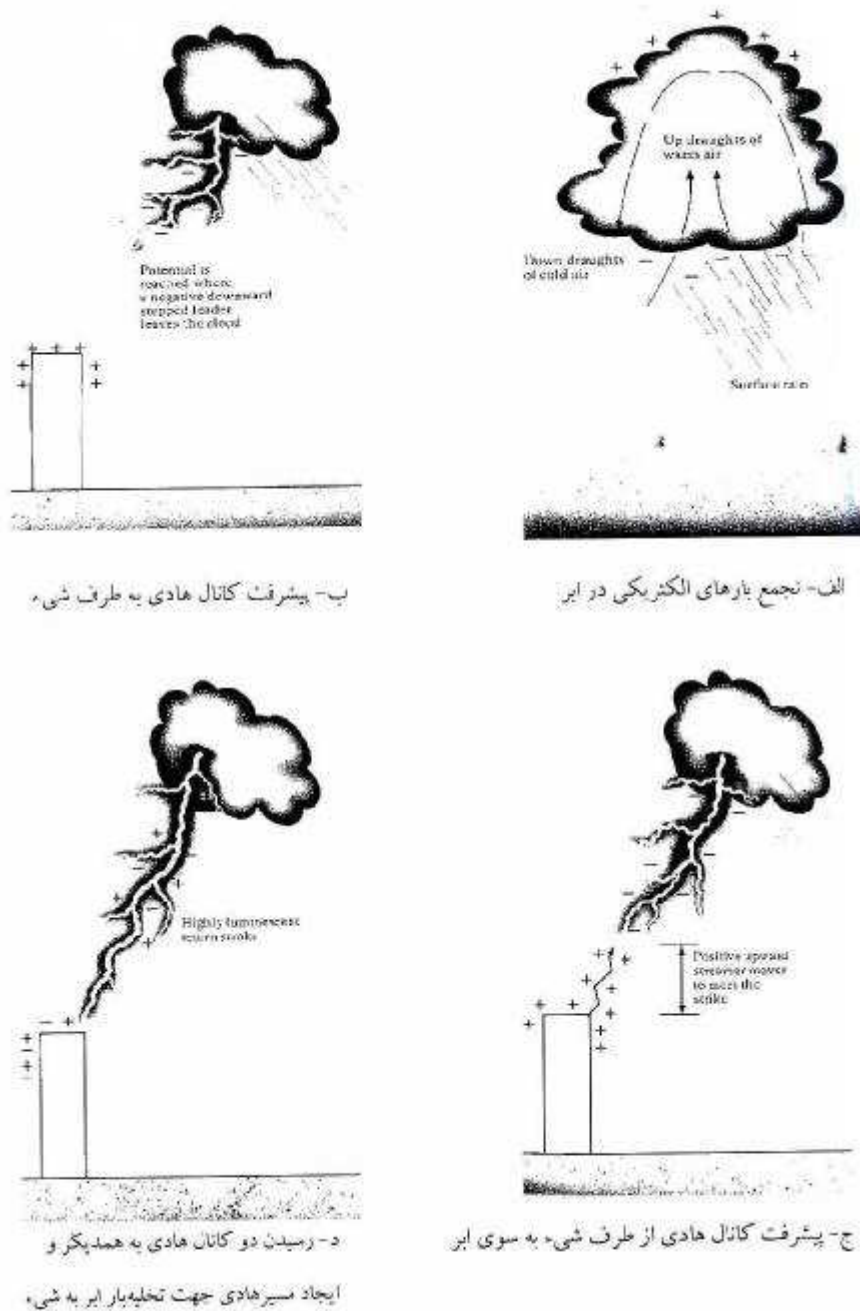
هدف از این فصل معرفی و شناخت سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به خطوط هوایی انتقال نیرو می‌باشد. مشخصات صاعقه، فواصل برخورد و معرفی روشهای طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه از جمله مباحث مطرح شده در این فصل خواهد بود.

1-1- پدیده برخورد صاعقه

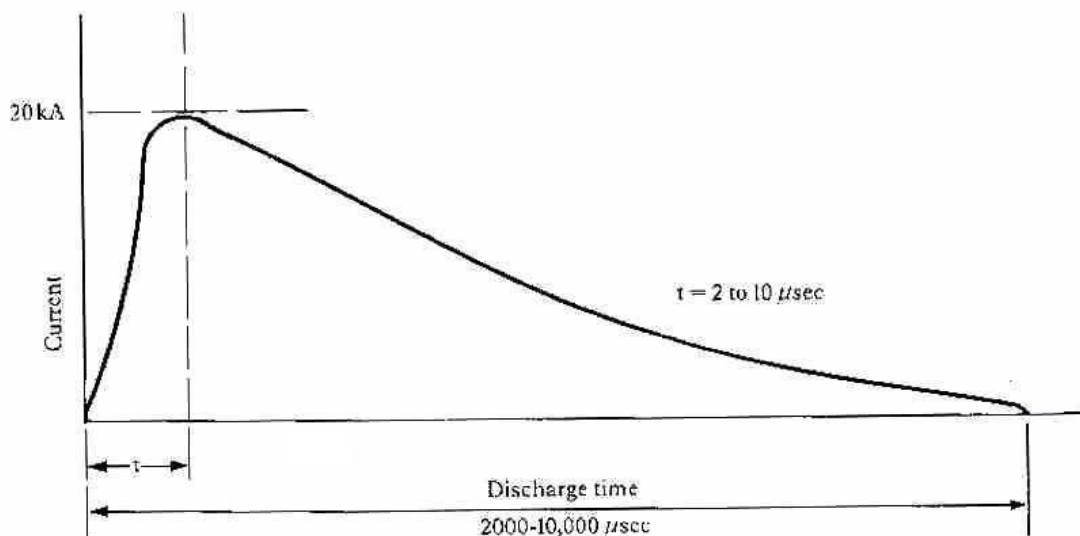
1-1-1- صاعقه و نحوه شکل‌گیری آن

با باردارشدن ابر و با توجه به بار ابر و ظرفیت بین ابر و زمین، ولتاژ بسیار بزرگی 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 و زمین چندین هزار ولت برمتر است. 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 آن به صورت یک گاز هادی در می‌آید و الکترودهی را تشکیل می‌دهد. مسیر یونیزه شدن هوا را کانال هادی می‌گویند. رشد این کانال به سرعت و با توقفهای کوتاهی 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 الکترودهی 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 2 تا 300 کیلوآمپر عبور می‌کند. شکل (1-1) 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 10 میکروثانیه می‌باشد. در شکل (1-2) نمونه یک موج جریان صاعقه رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدت زمان رسیدن دامنه موج جریان صاعقه به مقدار حداکثر آن بسیار کوتاه می‌باشد.





شکل 1-1: مراحل مختلف شکل گیری صاعقه



شکل 1-2: نمونه یک موج جریان صاعقه

1-1-2- مشخصات صاعقه

از مشخصات صاعقه می‌توان به شکل موج، پیک جریان، $\int i^2 dt$ و بار آن $\int i dt$ اشاره نمود. صاعقه دارای انرژی چندان زیادی نیست، زیرا به عنوان مثال اگر بار ابر را 20 آمپر ثانیه و اختلاف ولتاژ بین ابر و زمین 10 میلیون ولت در نظر گرفته شود، انرژی ابر به 100 مگاژول می‌رسد که برابر انرژی تولیدی یک نیروگاه 100 مگاواتی در یک ثانیه است. قسمتی از این انرژی صرف ایجاد نور، صدا و گرم کردن هوا در مسیر کانال هادی و حرکت می‌گردد. در صورتیکه مقاومت زمین را 5 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 $10000 \text{ A}^2 \cdot \text{Sec}$ است، برابر خواهد بود با:

$$E = \int ri^2 dt \approx 50 \text{ KJ} \quad (1-1)$$

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.

کلیه پارامترهای صاعقه (پارامترهایی همچون شکل موج، حداکثر دامنه، زمان پیشانی موج و شیب یا تندی پیشانی موج ضربه صاعقه و...) را می‌توان با استفاده از یک توزیع لگاریتم طبیعی که دارای تابع چگالی احتمالی به فرم زیر است، تقریب زد [1 و 2]:



$$\begin{cases} f_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} e^{-\frac{1}{2}Z^2} \\ Z = \frac{\ln(x/m)}{\beta} \end{cases} \quad (2-1)$$

که در آن :

x : پارامتر مشخصی از صاعقه

$f_{(x)}$ = تابع چگالی احتمال لگاریتم طبیعی، این تابع احتمال وقوع صاعقه‌ای با مقدار معینی از پارامتر مشخصه x را نتیجه می‌دهد.

b = انحراف معیار لگاریتمی

m = مقدار میانه می‌باشد.

مقدار میانه به این معنی است که 50 درصد مشاهدات زیر این مقدار و 50 درصد مشاهدات بالای این مقدار می‌باشد. مقدار متوسط پارامتر x را می‌توان با استفاده از دو پارامتر مشخصه m و β از رابطه زیر بدست آورد :

$$\mu = m e^{\frac{1}{2\beta^2}} \quad (3-1)$$

که در آن m مقدار متوسط پارامتر x است.

یکی از پارامترهای مهم در بررسی عملکرد خط در مقابل صاعقه، احتمال وقوع صاعقه‌ای با حداکثر دامنه I می‌باشد. مقدار پارامترهای β و m ای که از سوی CIGRE برای محاسبه این احتمال با استفاده از رابطه (2-1) ارائه شده‌اند، عبارتند از :

$$\begin{aligned} m = 64.1 \text{KA} , \quad \beta = 1.33 & \quad I \leq 20 \text{KA} \\ m = 33.1 \text{KA} , \quad \beta = 0.605 & \quad I > 20 \text{KA} \end{aligned} \quad (4-1)$$

در صورت عدم دسترسی به جدول توزیع نرمال، CIGRE روابط زیر را برای محاسبه توزیع تجمعی حداکثر دامنه جریان صاعقه ارائه نموده است [2] :

$$\begin{aligned} Q(I) &= 1 - 0.31 e^{-\frac{Z^2}{1.6}} \quad 3 \leq I < 20 \text{KA} \\ Q(I) &= 0.5 - 0.35 Z \quad , \quad 20 \leq I < 60 \text{KA} \\ Q(I) &= 0.278 e^{-\frac{Z^2}{1.7}} \quad 60 \leq I \leq 200 \text{KA} \end{aligned} \quad (5-1)$$

که در آن $Q(I)$ احتمال اینکه حداکثر دامنه جریان صاعقه در هر بار برخورد برابر یا بزرگتر از مقدار I باشد را نشان می‌دهد و با $F(I)$ که نشان‌دهنده احتمال اینکه حداکثر دامنه جریان صاعقه در هر بار برخورد کوچکتر از مقدار I باشد بصورت زیر مرتبط می‌شود:

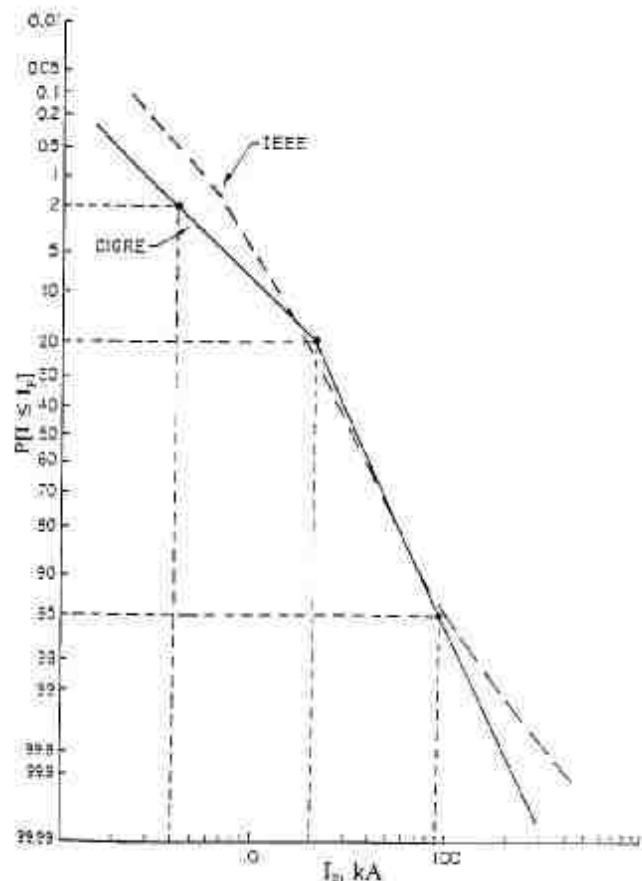
$$Q(I) = 1 - F(I) \quad (6-1)$$

علاوه بر روابط ارائه شده در رابطه (5-1)، موسسه IEEE نیز رابطه‌ای به فرم زیر را برای محاسبه $Q(I)$ پیشنهاد نموده است [3]:

$$Q(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (7-1)$$



در شکل (3-1) نتایج حاصل از معادلات ارائه شده از سوی CIGRE و IEEE برای مقادیر مختلفی از حداکثر دامنه جریان صاعقه نشان داده شده است. در این شکل مقادیر احتمال نشان داده شده بر روی محور عمودی احتمال اینکه حداکثر دامنه جریان صاعقه در هر بار برخورد از مقدار I کمتر باشد را نشان می‌دهد.



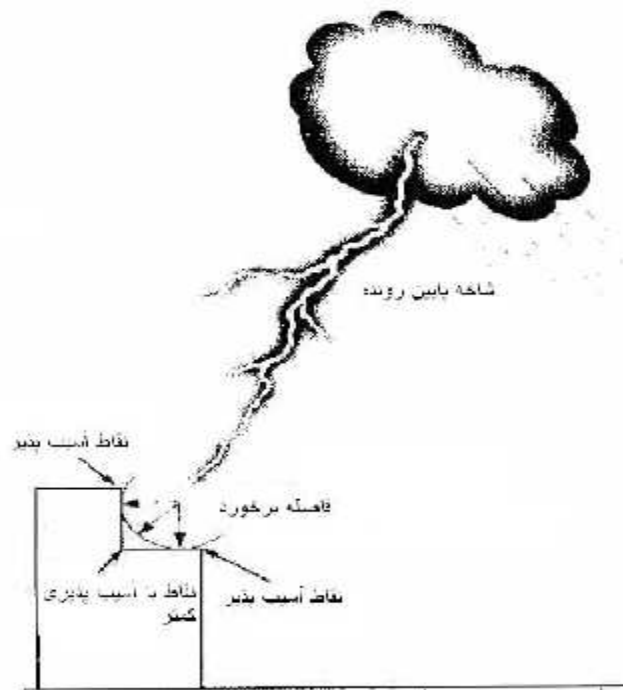
شکل 3-1: منحنی‌های احتمال صاعقه‌ای که از سوی CIGRE و IEEE برای صاعقه‌های با پلاریته منفی ارائه شده است.

گرچه که هر دو معادلات (5-1) و (7-1) در هنگام طراحی سیستم حفاظت از صاعقه خطوط انتقال قابل استفاده می‌باشد، اما استفاده از معادلات (5-1) که از سوی CIGRE ارائه شده‌اند متداول‌تر است و در اینجا نیز پیشنهاد می‌گردد که از این معادلات استفاده شود.

3-1-1- فاصله برخورد

برای هر جسمی می‌توان فاصله‌ای به نام فاصله جذب یا فاصله برخورد تعریف نمود و مفهوم آن بدین صورت است که چنانچه شاخه پیشروی صاعقه وارد این فاصله بشود، آنگاه از طرف جسم مورد نظر نیز جریانی به طرف ابر جاری خواهد شد. این پدیده در شکل (4-1) نشان داده شده است.





شکل 1-4: مفهوم 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 جسم مورد نظر به ابر (جریان ضربه بازگشتی) وابسته می‌باشد. معادلات فراوانی برای تعیین فاصله برخورد در مراجع مختلف ارائه گردیده است. برخی از این معادلات عبارتند از :

- معادله ارائه شده از سوی Young [4]

$$r_g = 27I^{0.32} \quad (8-1)$$

$$r_c = Ar_g$$

- معادلات ارائه شده از سوی Brown & Whitehead [5] :

$$r_g = 6.4I^{0.75} \quad (9-1)$$

$$r_c = 7.1I^{0.75}$$

- معادلات ارائه شده از سوی Love [6] :

$$r_g = 10I^{0.65} \quad (10-1)$$

$$r_c = 10I^{0.65}$$

- معادلات ارائه شده از سوی IEEE-1991 T&D Committee [1] :

$$r_g = Br_c \quad (11-1)$$

$$r_c = 8I^{0.65}$$

- معادلات ارائه شده از سوی IEEE-1992 T&D Committee [7] :



$$r_g = Cr_c \quad (12-1)$$

$$r_c = 10I^{0.65}$$

- معادلات ارائه شده از سوی Mousa&IEEE-1995 Substations Committee [8 و 9] :

$$r_g = 8I^{0.65} \quad (13-1)$$

$$r_c = 8I^{0.65}$$

- معادلات ارائه شده از سوی Eriksson [10] :

$$r_c = 0.67y^{0.6}I^{0.74} \quad (14-1)$$

$$r_s = 0.67h^{0.6}I^{0.74}$$

در کلیه معادلات فوق :

I : جریان ضربه بازگشتی، برحسب کیلوآمپر

r_g : فاصله برخورد به زمین، برحسب متر

r_c : فاصله برخورد به هادی‌های فاز و سیم‌های حفاظتی (به جزء رابطه 14-1)، برحسب متر

r_s : فاصله برخورد به سیم‌های حفاظتی در رابطه (14-1)، برحسب متر

h : ارتفاع سیم‌های حفاظتی از سطح زمین، برحسب متر

y : ارتفاع هادی‌های فاز از سطح زمین، برحسب متر

مقدار ضریب A، B و C در روابط فوق به صورت زیر محاسبه می‌گردند :

$$\begin{cases} A = \frac{444}{462 - h} & h \geq 18m \\ A = 1 & h < 18m \end{cases} \quad (15-1)$$

$$B = \frac{22}{y} \quad 0.6 < B < 0.9 \quad (16-1)$$

$$C = 0.36 + 0.17\ln(43 - h) \quad h \leq 40m \quad (17-1)$$

برای $h > 40m$ در رابطه فوق $h = 40m$ قرار داده می‌شود

2-1- 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 24 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 بر اساس 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 60 دقیقه‌ای در آن ساعات مشاهده می‌گردد. در این



تعریف، اگر رعد و برق در یک ساعت بیش از چندبار هم مشاهده گردد، آن ساعت همچنان بر اساس یک ساعت رعد و برقی طبقه‌بندی می‌شود. این طبقه‌بندی از سطوح کرونیک، اطلاعات جامع‌تری از چگالی صاعقه در یک سطح معین را ارائه می‌دهد. منحنی ایزوکرونیک سالیانه ایران که در یک دوره یازده ساله از سالهای 1965 تا 1975 اندازه‌گیری شده است در شکل (1-5) نشان داده شده است. در این شکل طبقه‌بندی سطوح ایزوکرونیک به شرح جدول (1-1) می‌باشد.

جدول 1-1: طبقه‌بندی تعداد روزهای رعد و برقی در سال

عنوان گروه	گروه یک	گروه دو	گروه سه	گروه چهار
میانگین تعداد روزهای رعد و برقی در سال	کمتر از 5 روز	5 تا 10 روز	10 تا 15 روز	بالاتر از 15 روز





شکل 1-5: منحنی ایزوکرونیک ایران که در یک دوره یازده ساله از سالهای 1344 تا 1354 اندازه گیری شده است.

1-3- چگالی صاعقه‌های برخوردی به زمین¹

چگالی صاعقه‌های برخوردکننده به زمین (GFD)، بصورت تعداد ضربات صاعقه بر واحد سطح و بر واحد زمان که به یک مکان مشخص برخورد می‌کند، تعریف می‌شود. معمولاً فرض می‌شود که اصابت ضربه صاعقه به زمین، پستها و خطوط انتقال متناسب با سطح کروینیک آن مکان ویژه می‌باشد.

در صورتیکه تعداد روزهای رعد و برقی در سال بعنوان مبنا در نظر گرفته شود، از معادله زیر می‌توان جهت بدست آوردن GFD استفاده نمود [11]:

$$N_g = 0.04(T_d)^{1.25} \quad (18-1)$$

که در آن:

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

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

اگر ساعتهای رعدوبرقی در سال بعنوان مبنا در نظر گرفته شود آنگاه از رابطه زیر می‌توان جهت محاسبه GFD استفاده نمود [12]:

$$N_g = 0.054(T_h)^{1.1} \quad (19-1)$$

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

1-4- مدل هندسی آخرین جهش ضربه صاعقه²

در سال 1961، Wagner مدل ساده‌ای از آخرین جهش ضربه صاعقه ارائه نمود [13]. در این مدل ساده، شاخه پایین رونده صاعقه به سمت زمین منتشر می‌شود تا زمانی که به نقطه‌ای می‌رسد که فاصله آن تا شی مورد هدف صاعقه برابر فاصله برخورد صاعقه خواهد بود. چنانچه گرادیان ولتاژ لازم برای شکست هوا برابر 605 کیلوولت بر متر و پتانسیل ضربه صاعقه برابر 50000 کیلوولت فرض شود، زمانی شاخه پایین رونده صاعقه به این نقطه می‌رسد که فاصله مابین نوک شاخه پایین رونده صاعقه و نوک شی مورد هدف برابر $83/3 (= 50000/605)$ متر باشد. با فرض اینکه میزان شدت میدان 605 KV/m برای شکست عایقی هوا یک تقریب خوب باشد، معادله یا روشی برای برآورد پتانسیل شاخه پایین رونده صاعقه مورد نیاز خواهد بود. قبل از Wagner، Lundholm [14] رابطه‌ای را مابین جریان برخورد صاعقه و سرعت ضربه بازگشتی بدست آورده بود که پس از آن شخصی به نام RUSCK [15] این رابطه را تصحیح و به شکل زیر ارائه نمود:

$$V = \frac{1}{\sqrt{1 + (500/I)}} \quad (20-1)$$

که در آن:

V : سرعت ضربه بازگشتی بر حسب پریونیت سرعت نور

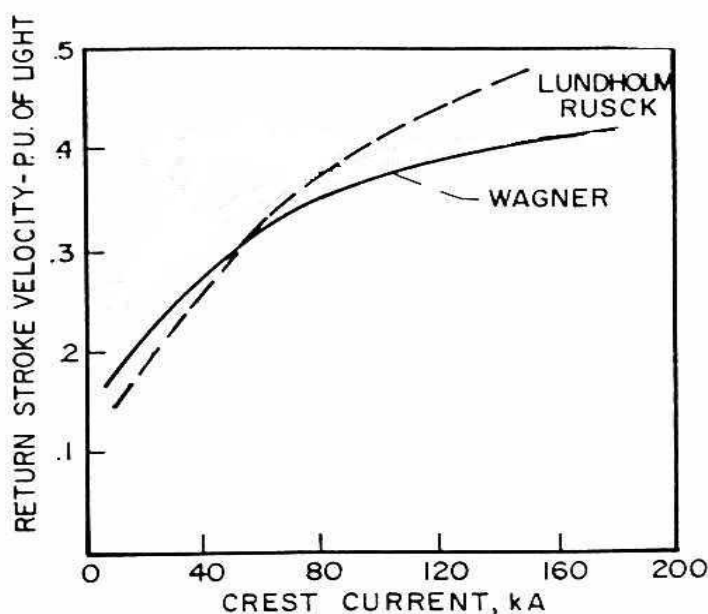
I : پیک جریان صاعقه برخوردی بر حسب کیلوآمپر می‌باشد.

1. Ground flash density

2. Geometric model of the last step of the lightning stroke



پس از آن Wagner رابطه مشابهی را بدست آورد [16]. هردوی این روابط در شکل (6-1) نشان داده شده‌اند.



شکل 6-1: سرعت ضربه بازگشتی به صورت تابعی از پیک جریان صاعقه برخوردی

از این رو اگر مقدار پیک جریان صاعقه برخوردی مشخص باشد، سرعت ضربه بازگشتی را می‌توان بدست آورد و از طریق این سرعت می‌توان مقدار پتانسیل شاخه پایین رونده صاعقه را تقریب زد. براساس کارهای انجام شده توسط آقای Wagner، پتانسیل شاخه پایین رونده (V) برحسب مگاولت از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$v = 120 \frac{V}{1 - 2.2V^2} \quad (21-1)$$

که در آن V سرعت ضربه بازگشتی برحسب پریونیت سرعت نور است. بنابراین با استفاده از مطالب فوق می‌توان گفت که برای تقریب فاصله برخورد می‌بایستی مراحل زیر دنبال گردد:

- برای یک جریان صاعقه برخوردی معین سرعت انتشار ضربه بازگشتی از شکل (6-1) استخراج می‌گردد.
- با استفاده از سرعت استخراج شده، پتانسیل شاخه پایین رونده محاسبه می‌گردد.
- با استفاده از پتانسیل شاخه پایین رونده صاعقه، فاصله برخورد r با استفاده از رابطه $r = \frac{V}{C}$ ، که در آن C شدت میدان لازم برای شکست عایق هوا می‌باشد (برابر 605 KV/m فرض می‌گردد)، مشخص می‌شود.

با استفاده از روش فوق، فاصله برخورد بدست می‌آید. با این حال، در حالت کلی فاصله برخورد صاعقه به هادی که بر روی برج قرار دارد با فاصله برخورد صاعقه به زمین متفاوت می‌باشد. این مسئله به خاطر این است که شدت میدان الکتریکی لازم برای شکست فواصل هوایی میله - صفحه (نوک شاخه پایین رونده صاعقه - زمین) با شدت میدان الکتریکی لازم برای شکست فواصل هوایی میله - میله (نوک شاخه پایین رونده - نوک برج) متفاوت می‌باشد. بنابراین در حالت کلی، دو فاصله برخورد وجود دارد، یکی

$$dN(G) = 2N_g L D'_g f(I) dI \quad (23-1)$$

و کل ضربات صاعقه‌ای که به سیم حفاظت از صاعقه برخورد می‌نماید برابر است با:

$$N(G) = 2N_g L \int_3^{\infty} D'_g f(I) dI \quad (24-1)$$

که مطابق شکل (7-1)، فاصله D'_g برابر است با:

$$D'_g = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} \quad (25-1)$$

$$\begin{cases} \theta' = \sin^{-1} \frac{r_g - h}{r_c} \\ D'_g = r_c \cos \theta' \end{cases} \quad (26-1)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، انتگرال‌گیری به ازاء کلیه مقادیر ممکن جریان ضربه صاعقه انجام گرفته است. حد پایین جریان صاعقه 3 کیلوآمپر به این معنی است که حد پایینی برای جریان ضربه صاعقه وجود دارد. به عبارت دیگر به ازای جریان صفر امکان برخورد صاعقه وجود ندارد. مقدار حد پایین 3 کیلوآمپر از سوی CIGRE پیشنهاد شده است [1]. با این حال برخی از محققان معتقد هستند که مقادیر دیگری همچون 1 یا 2 کیلوآمپر منطقی‌تر بوده و حتی گاهی اوقات مقدار صفر نیز استفاده شده است. با این حال، استفاده از مقدار مابین صفر تا 3 کیلوآمپر اثر ناچیزی بر روی تعداد ضربات صاعقه برخورد کننده به سیم حفاظت از صاعقه دارد.

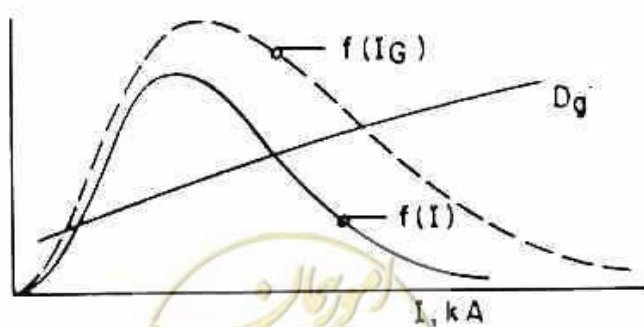
تابع توزیع تجمعی احتمال اینکه جریان‌هایی کوچکتر از یا مساوی I_G به سیم حفاظت از صاعقه برخورد کنند، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F(I_G) = \frac{2N_g L}{N(G)} \int_3^{I_G} D'_g f(I) dI \quad (27-1)$$

که از طریق آن می‌توان تابع چگالی احتمال را بدست آورد، یعنی:

$$f(I_G) = \frac{2N_g L}{N(G)} D'_g f(I) \quad (28-1)$$

این روابط را می‌توان به صورت نشان داده شده در شکل (8-1) ارائه داد.



شکل 8-1: نحوه بدست آوردن تابع چگالی احتمالی $f(I_G)$

در معادلات ارائه شده فوق، مقدار D'_g تنها برای مقادیر $r_g > h$ معتبر می‌باشد. اگر r_g کمتر از h باشد، با فرض اینکه ضربات صاعقه به صورت عمودی به سطح زمین فرود می‌آیند، مقدار D'_g معادل با r_c در نظر گرفته می‌شود. در مورد دو سیم حفاظت از صاعقه که به فاصله S_g از هم قرار گرفته‌اند (مطابق شکل 1-9)، نحوه استخراج معادلات مشابه قبل می‌باشد. تعداد ضربات صاعقه‌ای که به سیم‌های حفاظت از صاعقه برخورد می‌کند، عبارت است از:

$$N(G) = N_g L \left[\int_3^\infty (2D'_g + S_g) f(I) dI \right] \quad (29-1)$$

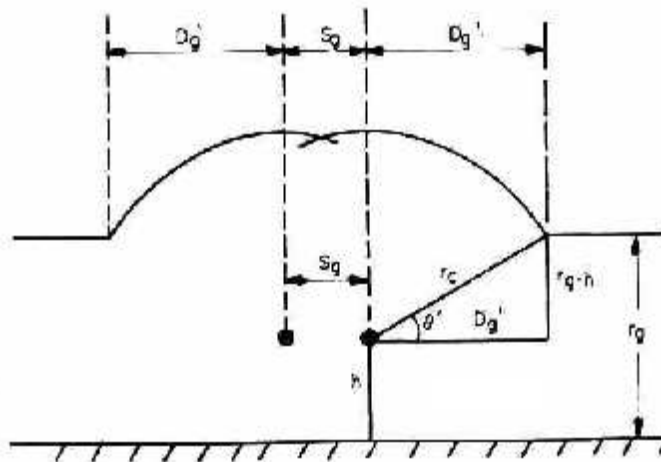
یا

$$N(G) = 2N_g L \int_3^\infty D'_g f(I) dI + N_g L S_g \quad (30-1)$$

و توابع تجمعی و چگالی احتمال برخورد صاعقه به سیم‌های حفاظت از صاعقه از روابط زیر استخراج می‌گردند:

$$F(I_G) = \frac{2N_g L}{N(G)} \left[\int_3^{I_G} D'_g f(I) dI + \frac{S_g}{2} F(I) \right] \quad (31-1)$$

$$f(I_G) = \frac{2N_g L}{N(G)} \left[D'_g + \frac{S_g}{2} \right] f(I)$$



شکل 1-9: مدل هندسی برای دو سیم حفاظت از صاعقه

1-5- مدل هندسی تصحیح شده Eriksson

همانطور که از معادلات فواصل برخورد ارائه شده در بخش (1-1-3) مشاهده می‌گردد، معادلات فواصل برخورد ارائه شده توسط Eriksson با سایر معادلات ارائه شده از سوی مراجع مختلف متفاوت می‌باشد. در مورد این معادلات با مراجعه به شکل (1-10) توضیحات زیر قابل بیان می‌باشد:

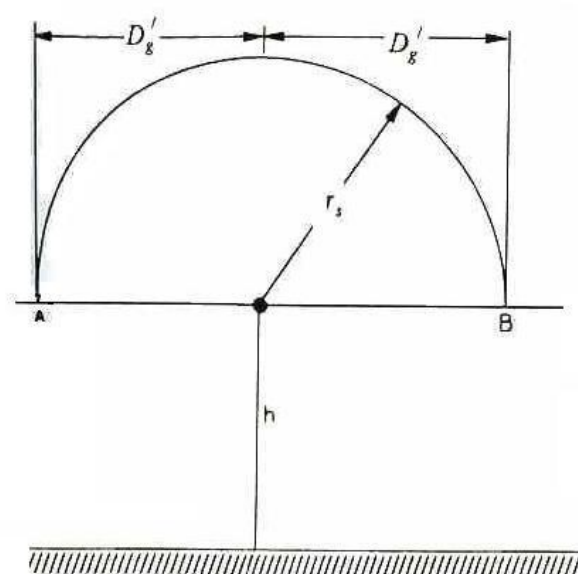
- فواصل برخورد به ترتیب برای هادی‌های فاز، r_c و سیم حفاظت از صاعقه، r_s ارائه شده‌اند و هیچگونه معادله‌ای برای فاصله برخورد به زمین، r_g ارائه نشده است. این موضوع مستلزم این است که هرگونه شاخه پایین رونده صاعقه‌ای که به سیم حفاظت



از صاعقه برخورد نمی‌کند به زمین منتهی خواهد شد. یعنی اینکه به محض عبور از فاصله برخورد سیم حفاظت از صاعقه، شاخه پایین رونده صاعقه نمی‌تواند تغییر جهت دهد و یا اینکه به سمت سیم حفاظت از صاعقه بالا بیاید. بنابراین برخورد صاعقه به زمین بعنوان یک وضعیت پیش فرض در نظر گرفته می‌شود.

- معادلات فواصل برخورد توابعی از ارتفاع سیم حفاظت از صاعقه، h ، و ارتفاع هادی فاز، y ، می‌باشند.

با مراجعه به شکل (10-1)، خط افقی در ارتفاع سیم حفاظت از صاعقه به موازات زمین رسم می‌گردد. پس از آن، کمائی به شعاع r_s و به مرکزیت سیم حفاظت از صاعقه به گونه‌ای رسم می‌گردد که از دو انتها با خط افقی رسم شده متقاطع شود. شاخه‌های پایین رونده صاعقه‌ای که به حد فاصل نقاط A تا B می‌رسند به سیم حفاظت از صاعقه برخورد می‌نمایند. در جاهای دیگر، ضربات صاعقه به زمین برخورد می‌نمایند.



شکل 10-1: مدل هندسی تصحیح شده Eriksson برای ضربات صاعقه‌ای که به سیم حفاظت از صاعقه برخورد می‌کنند.

بنابراین مقدار D'_g عبارت است از :

$$D'_g = r_s = 0.67 h^{0.6} I^{0.74} \quad (32-1)$$

و تعداد ضربات صاعقه برخورد کننده به سیم حفاظت از صاعقه برابر است با :

$$N(G) = 2N_g L \int_3^{\infty} D'_g f(I) dI \quad (33-1)$$

که مشابه معادله (1-24) است. همچنین برای دو سیم حفاظت از صاعقه، معادله (1-30) قابل استفاده می‌باشد و تنها چیزی که تغییر می‌نماید رابطه مورد استفاده برای D'_g می‌باشد.



فصل ۲

اصول و مبانی طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به خطوط هوایی انتقال نیرو



مقدمه

در این فصل اصول و مبانی طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به خطوط هوایی انتقال نیرو ارائه می‌گردد.

2-1- کلیات

وظیفه اصلی سیستم حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه به هادی‌های فاز این خطوط می‌باشد. چنانچه دامنه جریان صاعقه برخورد کننده به هادی‌های فاز خط کمتر از مقدار مشخصی باشد، این صاعقه نمی‌تواند برای ایزولاسیون خط مشکل خاصی را ایجاد کند، لذا عبور صاعقه‌هایی که دامنه‌های آنها کمتر از این مقدار هستند از سیستم حفاظت از صاعقه مجاز می‌باشد. این جریان را اصطلاحاً جریان بحرانی می‌نامند. 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 استقامت عایقی خط را ایجاد نموده و موجبات بروز قوس الکتریکی را در خط 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 غیر اقتصادی می‌باشد چرا که این امر مستلزم آن است که جریان بحرانی بعنوان جریان طراحی انتخاب گردد و بعلت کوچک بودن این جریان، طول فواصل برخورد نیز کوچک می‌شود و لذا برای فراهم دیدن ناحیه حفاظتی مطلوب باید از تعداد زیادی سیم حفاظتی استفاده نمود که این امر موجب افزایش هزینه‌های اجرایی سیستم حفاظت از صاعقه خواهد شد.

چنانچه مقدار نرخ جرقه ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR) کوچکی (مثلاً 0/05 قوس در هر صد کیلومتر در سال) برای سیستم حفاظت از صاعقه در نظر بگیریم، این مشکل نیز قابل حل خواهد بود چرا که با پذیرش نرخ کوچک خطا می‌توان از جریانهای طراحی بزرگتر از جریان بحرانی استفاده نمود و به این طریق نسبت به حالت قبل هادیهای حفاظتی کمتری را به کار برد و یا اینکه ممکن است طول یا ارتفاع کراس آرمهای نگهدارنده هادیهای حفاظتی را کاهش داد و بدین طریق هزینه‌های اجرایی سیستم حفاظت از صاعقه خط را کاهش داد. البته به علت طبیعت احتمالی پدیده صاعقه، پذیرش این نرخ کوچک خطا قابل قبول خواهد بود.

در صورتی که خط مورد نظر برای طراحی از درجه اهمیت بالایی برخوردار 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 برخورد مستقیم صاعقه به خطوط هوایی انتقال نیرو گامهای زیر می‌بایستی دنبال گردد:

گام اول:

بررسی تعداد صاعقه‌های احتمالی در محل یا محلهایی که مسیر خط در آن قرار دارد و یا قرار است که در آنجا احداث گردد (تعیین سطح ایزوکرونیک در محل یا محلهای که در مسیر خط انتقال قرار دارند).

گام دوم:

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



گام سوم :

تهیه مشخصات خطی که قرار است در مقابل برخورد مستقیم صاعقه حفاظت گردد. خطوط از نظر سطح ولتاژی که برای کار در آن ولتاژ طراحی شده‌اند متفاوت بوده لذا هماهنگی عایقی و سطح عایقی و ابعاد دکل‌های خط به طور مستقیم به ولتاژ نامی خط بستگی دارد. بنابراین در طراحی سیستم حفاظت از صاعقه بایستی اطلاعات زیر مورد توجه قرار گیرند :

- ولتاژ جرقه بحرانی خط (CFO) یا حداقل فاصله هوایی فاز _ زمین (طول مقرر یا فاصله هادی تا نزدیکترین قسمت فلزی زمین شده برج، هر کدام که کوچکتر هستند).
- مشخصات هادی‌های فاز استفاده شده در خط (از قبیل باندلی بودن یا نبودن و شعاع هادیها) و فواصل قرارگیری آنها نسبت به هم و نسبت به زمین.

گام چهارم :

تعیین محل قرارگیری سیم یا سیم هادی گارد با استفاده از روشهای مناسب طراحی سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه به خطوط هوایی انتقال نیرو.

گام پنجم :

انتخاب نوع، جنس و سطح مقطع هادی‌های مورد استفاده به عنوان سیم‌های حفاظتی با توجه به نیازهای سیستم، طراحی و مسائل اقتصادی مرتبط با طراحی خط و طراحی سیستم حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو. گامهای اول تا چهارم در بخش جابجایی بهینه سیم‌های حفاظتی و گام پنجم در بخش معیارهای انتخاب سیم‌های حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو شرح داده می‌شوند.

2-2- جایابی بهینه سیم‌های حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو**2-2-1- روش مدل هندسی****2-2-1-1- مفاهیم پایه‌ای**

شکل (1-2) را در نظر بگیرید. براساس روش مدل هندسی و به ازای مقدار مشخصی از جریان ضربه بازگشتی صاعقه، کمانهایی به شعاع r_c و به مرکزیت هادی‌های فاز و سیم‌های حفاظت از صاعقه رسم شده‌اند. علاوه بر این، خط افقی به ارتفاع r_g از سطح زمین و به موازات آن نیز رسم شده است. محل تقاطع کمانها با یکدیگر و با خط افقی با حروف A، B و C مشخص شده‌اند. شاخه‌های پائین رونده صاعقه‌ای که به فواصل A تا B می‌رسند به هادی‌های فاز برخورد می‌کنند و آن دسته از ضربات صاعقه‌ای که به کمانهای مابین B و C می‌رسند نیز به سیم‌های حفاظت از صاعقه برخورد می‌نمایند. ضربات وارد شده به نواحی بیرون از فواصل فوق به زمین برخورد خواهد نمود.

با فرض اینکه ضربات صاعقه به صورت عمودی فرود می‌آیند، فواصل D_c و $2D_g + S_g$ که در شکل (1-2) مشخص شده‌اند به ترتیب به مفهوم فاصله رؤیت صاعقه برای هادی‌های فاز و فاصله رؤیت صاعقه برای سیم‌های حفاظت از صاعقه می‌باشند. بنابراین برای مقدار مشخصی از جریان ضربه بازگشتی صاعقه که به ازای آن شکل (1-2) رسم شده است، تعداد ضربات صاعقه‌ای که به

هادی فاز برخورد می‌نمایند، یا به عبارت دیگر نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFR)، معادل با سطح ایجاد شده بوسیله D_c و طول خط ضربدر چگالی صاعقه‌های زمین می‌باشد، یعنی:

$$SFR = 2N_g L D_c \quad (1-2)$$

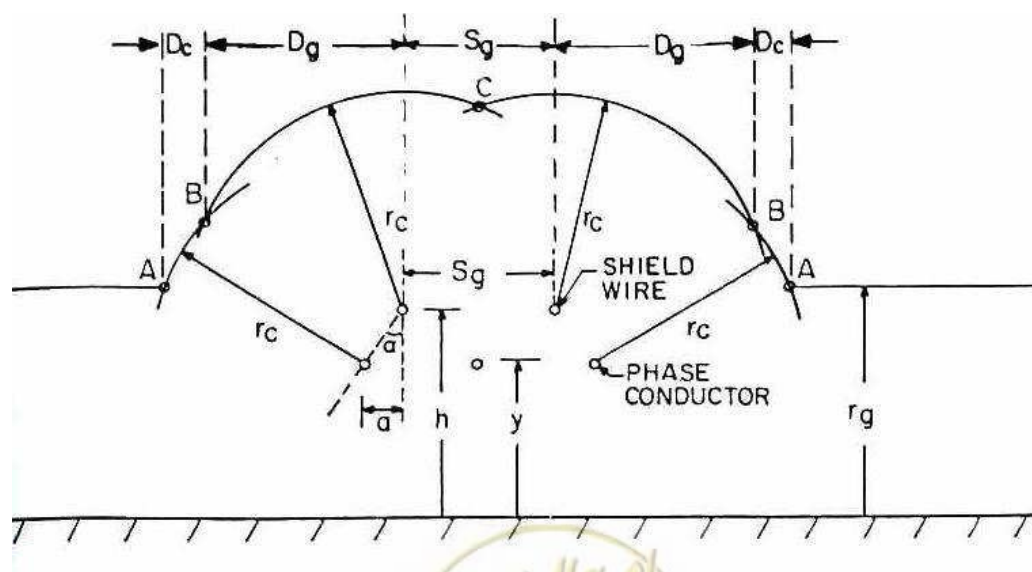
احتمال وقوع جریان I برابر با $f(I)dI$ می‌باشد به نحوی که دیفرانسیل نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه، $d(SFR)$ ، برابر است با:

$$d(SFR) = 2N_g L D_c f(I)dI \quad (2-2)$$

و مقدار SFR برای کلیه جریانها برابر است با:

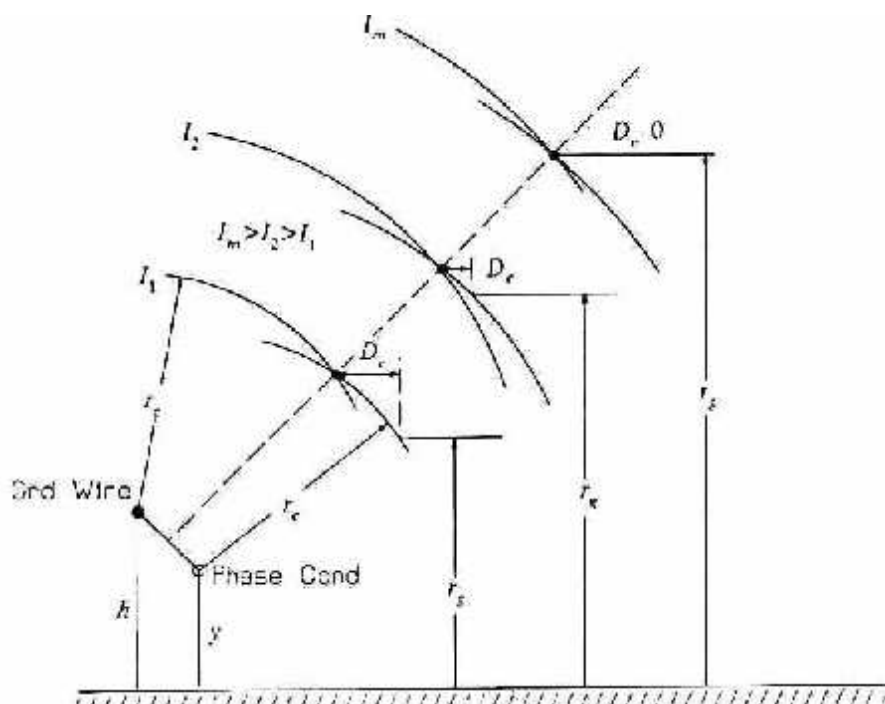
$$SFR = 2N_g L \int_3^{I_m} D_c f(I)dI \quad (3-2)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، حدود انتگرال‌گیری 3 کیلوآمپر و I_m می‌باشند، که در آن حداکثر جریانی است که به ازای جریانهای بزرگتر از آن هیچگونه صاعقه‌ای به هادی‌های فاز برخورد نخواهد کرد. برای فهم دقیق‌تر این مسئله، شکل (2-2) را در نظر بگیرید که در آن دیاگرام شکل (1-2) برای جریانهای بزرگ و بزرگتر تکرار شده است. چنانچه جریان افزایش یابد، D_c شروع به کاهش می‌نماید تا جایی که سه فاصله برخورد رسم شده از طریق سیم حفاظ، هادی فاز و زمین در یک نقطه با یکدیگر برخورد می‌نمایند و D_c برابر صفر می‌شود. این نقطه بوسیله جریان ضربه بازگشتی I_m مشخص می‌شود. همانطور که قبلاً نیز اشاره شده حد پایین 3 کیلوآمپر فقط جهت تاکید بر این مسئله است که اولین ضربه صاعقه نمی‌تواند دارای مقدار جریان صفر باشد و بنابراین حد پایین انتگرال می‌بایستی دارای مقدار کوچکی باشد. مقدار 3 کیلوآمپر برای حد پایین از سوی موسسه CIGRE ارائه شده است، با این حال، در برخی مراجع دیگر مقادیری از قبیل 1 یا 2 کیلوآمپر و حتی صفر نیز آمده است.



شکل 2-1: مدل هندسی، تعیین زوایا و فواصل





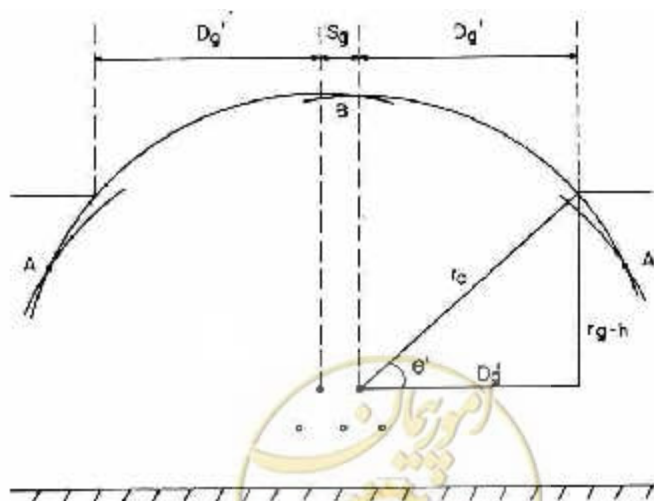
شکل 2-2: تعیین I_m ، جاییکه به ازای آن $D_c=0$ است

همانطور که در شکل (3-2) نشان داده شده است، برای جریانهای بزرگتر از I_m ، فاصله رؤیت صاعقه برای سیمهای حفاظت از صاعقه، برابر D'_g می باشد. از این رو تعداد ضربات صاعقه ای که به سیمهای حفاظت از صاعقه برخورد می کند، $N(G)$ برابر است با:

$$N(G) = N_g L \left[\int_3^{I_m} (2D_g + S_g) f(I) dI + \int_{I_m}^{\infty} (2D'_g + S_g) f(I) dI \right] \quad (4-2)$$

از آنجایی که S_g ثابت است خواهیم داشت :

$$N(G) = 2N_g L \left[\int_3^{I_m} D_g f(I) dI + \int_{I_m}^{\infty} D'_g f(I) dI \right] + N_g L S_g \quad (5-2)$$



شکل 3-2: تعیین D'_g برای $I > I_m$

2-1-2-2- تعیین فواصل D_g و D_c

شکل (4-2) یک سمت از دیاگرام مدل هندسی شکل (1-2) را نشان می‌دهد. زاویه بین کمانهای به شعاع r_c با 2β مشخص شده است که با توجه به این شکل β برابر است با :

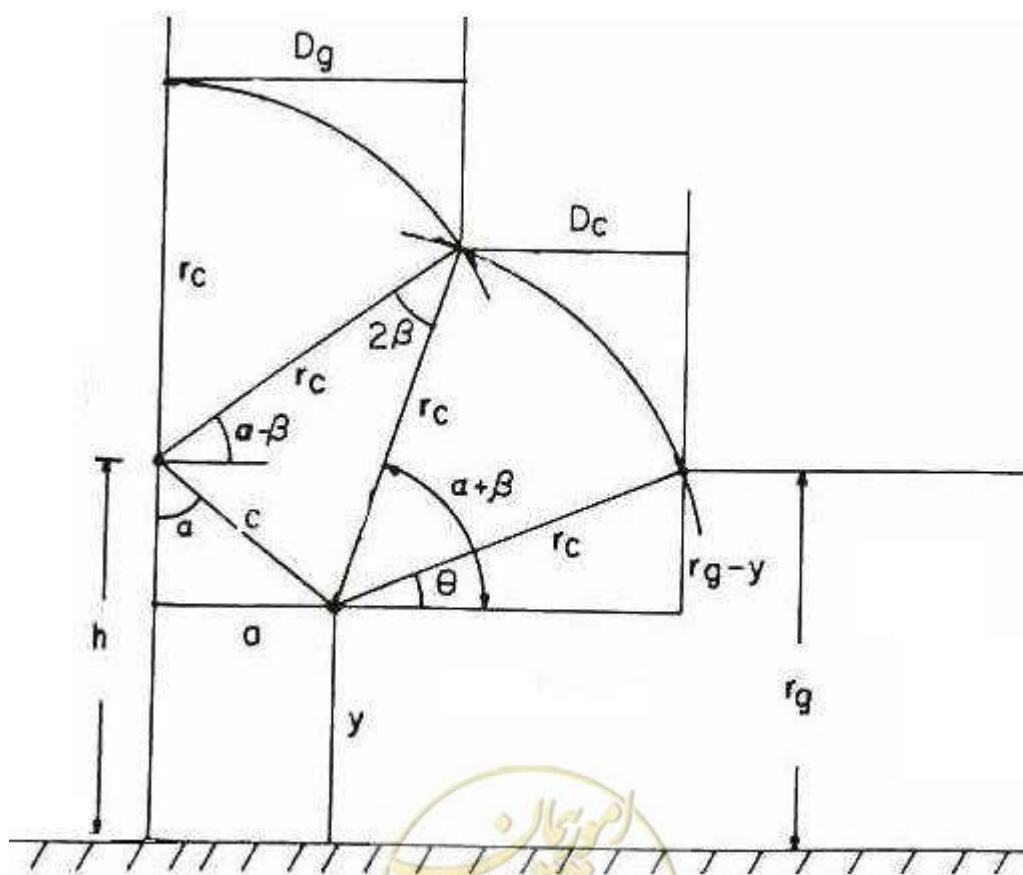
$$\beta = \sin^{-1} \frac{C}{2r_c} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{a^2 + (h-y)^2}}{2r_c} = \sin^{-1} \frac{(h-y)\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}{2r_c} \quad (6-2)$$

زاویای θ و α از شکل (4-2) بصورت زیر محاسبه می‌شوند :

$$\begin{cases} \theta = \sin^{-1} \frac{r_g - y}{r_c} \\ \alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h-y} \end{cases} \quad (7-2)$$

و نهایتاً با توجه به شکل (4-2) فواصل D_g و D_c بصورت زیر تعیین می‌گردند :

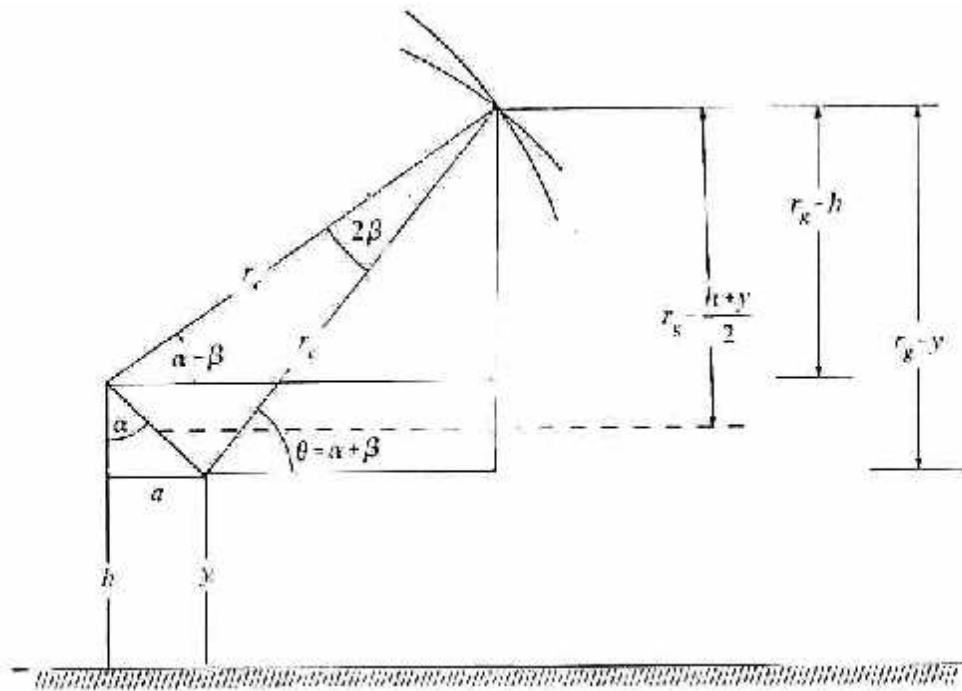
$$\begin{cases} D_c = r_c [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)] \\ D_g = r_c \cos(\alpha - \beta) \end{cases} \quad (8-2)$$



شکل 4-2: نمای یک سمت از دیاگرام هندسی شکل (1-2)

3-1-2-2- حداکثر جریان خطای سیستم حفاظت از صاعقه I_m

شکل (5-2) وضعیتی را نشان می‌دهد که در آن کلیه فواصل برخورد در یک نقطه با یکدیگر تلاقی پیدا کرده‌اند، این نقطه به ازای جریان I_m حاصل می‌شود. از این شکل مقدار r_g در جریان I_m یا ابتدا با تعیین مقدار کمیت a به صورت زیر مشخص می‌شود:

شکل 5-2: نحوه پیدا کردن I_m و زاویه حفاظت کامل

$$a = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (9-2)$$

و از این رو:

$$\begin{cases} r_{gm} = \frac{h+y}{2K_0} \left[1 + \sqrt{1 - K_0 \left[1 + \left(\frac{a}{h+y} \right)^2 \right]} \right] \\ K_0 = 1 - \gamma^2 \sin^2 \alpha \\ \gamma = \frac{r_{cm}}{r_{gm}} \end{cases} \quad (10-2)$$

همچنین از طریق شکل خواهیم داشت:

$$\sin \alpha = \frac{r_{gm} - \frac{h+y}{2}}{\sqrt{r_{cm}^2 - \frac{C^2}{4}}} \quad (11-2)$$

معمولاً $\frac{C^2}{4} \gg r_{cm}^2$ است و بنابراین با یک تقریب مناسب خواهیم داشت:

$$r_{gm} = \frac{(h+y)/2}{1 - \gamma \sin \alpha} \quad (12-2)$$



I_m و r_{gm} نیز بوسیله روابط زیر با یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$I_m = \left[\frac{r_{gm}}{A} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (13-2)$$

$$r_{gm} = A I_m^b \quad (14-2)$$

که در آن A و b ضرایب مورد استفاده در معادله برخورد به زمین (r_g) می‌باشند.

2-2-1-4- نرخ قوس الکتریکی ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه، SFFOR

SFR برابر تعداد ضربات صاعقه‌ای است که به هادی‌های فاز برخورد می‌کنند. در میان کلیه ضربات صاعقه‌ای که به هادی‌های فاز برخورد می‌کنند تنها تعداد محدودی صاعقه قادر به ایجاد شکست عایقی در ایزولاسیون خط هستند. تنها زمانی قوس الکتریکی به وقوع می‌پیوندد که ولتاژ ایجاد شده بوسیله موج ضربه جریان صاعقه بیش از ولتاژ جرعه بحرانی ایزولاسیون خط، CFO، باشد. از این رو SFR در برگیرنده هر دو دسته ضربات صاعقه‌ای که قادر به ایجاد جرعه هستند و آنهایی که قادر به ایجاد جرعه نیستند می‌باشد. برای تعیین نرخ قوس الکتریکی با توجه به شکل (2-6) ولتاژ روی هادی و ولتاژ دو سر ایزولاسیون خط، E برابر است با:

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

که در آن Z_c امپدانس موجی هادی‌های فاز خط انتقال می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \ln \frac{2h_{av}}{r} \quad (16-2)$$

که در آن:

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

r : شعاع هادی بر حسب متر می‌باشد.

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

$$R_0 = \sqrt{r \times d} \quad \text{در حالت باندل دوتایی} \quad (17-2)$$

$$R_0 = \sqrt[3]{r \times d^2} \quad \text{در حالت باندل سه‌تایی} \quad (18-2)$$

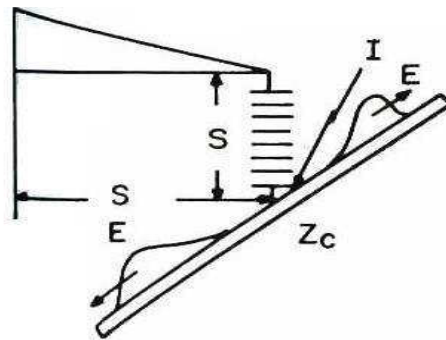
$$R_0 = 1.09 \sqrt[4]{r \times d^3} \quad \text{در حالت باندل چهارتایی} \quad (19-2)$$

در این روابط d فاصله دو هادی باندل مجاور هم بر حسب متر است.

اگر ولتاژ E معادل با CFO پلاریته منفی قرار داده شود، آنگاه جریان بحرانی که در آن و بالاتر از آن جرعه به وقوع می‌پیوندد از رابطه زیر بدست می‌آید:

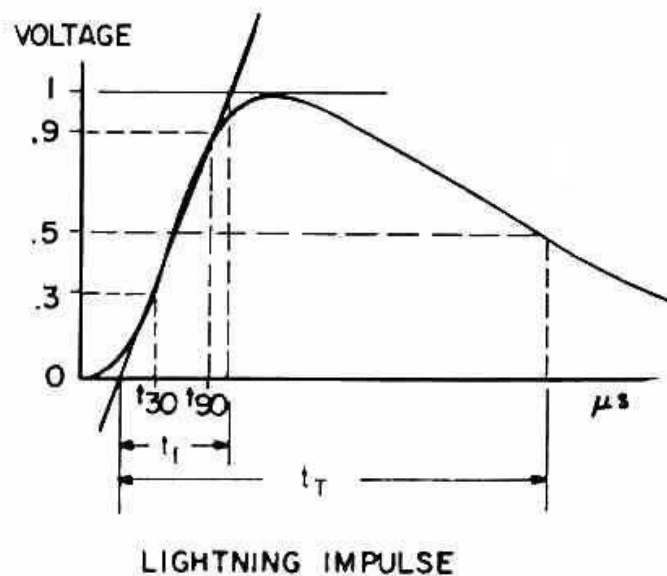
$$I_c = \frac{2(CFO)}{Z_c} \quad (20-2)$$





شکل 2-6: برای ایجاد قوس الکتریکی ولتاژ E می‌بایستی بزرگتر از CFO خط باشد

شکل موج ولتاژ ایجاد شده بوسیله صاعقه مشابه شکل موج جریان ضربه صاعقه است. اگر چه که مدت زمان تا نصف مقدار پشت موج (t_T در شکل 2-7) این موج ضربه ولتاژ بیشتر از مدت زمان مشابه در موج ضربه صاعقه استاندارد است و از این رو CFO برای این موج ضربه کمتر از CFO استاندارد می‌باشد. CFO ای که معمولاً بکار برده می‌شود برابر CFO استاندارد پلاریته منفی فرض می‌شود و مقدار آن برابر 605 کیلوولت بر متر در فاصله ایزولاسیون S مطابق شکل (2-6) می‌باشد [1].



شکل 2-7: شکل موج، موج ضربه صاعقه

معادله (2-3) به صورت زیر برای محاسبه SFFOR اصلاح می‌گردد:

$$SFFOR = 2 N_g L \int_{I_c}^{I_m} D_C f(I) dI$$

(21-2)



2-2-1-5- زاویه حفاظت کامل¹

زاویه حفاظت کامل معادل با SFFOR برابر با صفر است و این مسئله با مساوی قراردادن I_m با جریان I_c در رابطه (21-2) قابل حصول است. بنابراین شکل (2-5) را می‌توان از نو جهت استخراج زاویه حفاظت کامل α_p مورد استفاده قرارداد. سه فرم معادله قابل استخراج می‌باشد. اولین و ساده‌ترین این معادلات به صورت زیر از شکل (2-5) قابل استخراج است:

$$\begin{cases} \alpha_p - \beta = \sin^{-1} \frac{r_g - h}{r_c} \\ \alpha_p + \beta = \sin^{-1} \frac{r_g - y}{r_c} \end{cases} \quad (22-2)$$

با جمع کردن دو معادله فوق، α_p به صورت زیر استخراج می‌گردد:

$$\alpha_p = \frac{1}{2} \left[\sin^{-1} \frac{r_g - h}{r_c} + \sin^{-1} \frac{r_g - y}{r_c} \right] \quad (23-2)$$

یک راه دیگر برای تعیین زاویه حفاظت کامل، ابتدا تعیین فاصله افقی a_p می‌باشد:

$$a_p = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (24-2)$$

آنگاه زاویه حفاظت کامل را می‌توان از رابطه زیر استخراج کرد:

$$\alpha_p = \tan^{-1} \frac{a_p}{h - y} \quad (25-2)$$

و بالاخره راه سوم برای تعیین زاویه حفاظت کامل به صورت زیر می‌باشد:

$$\alpha_p = \sin^{-1} \frac{r_g - (h + y) / 2}{\sqrt{r_c^2 - \left(\frac{C^2}{4}\right)}} \quad (26-2)$$

از آنجائی که $r_c \gg \frac{C}{2}$ است، معادله تقریبی زیر قابل استخراج می‌باشد:

$$\alpha_p = \sin^{-1} \frac{r_g - (h + y) / 2}{r_c} \quad (27-2)$$

همچنین برای زوایای کوچک $\sin^{-1}x = x$ (که در آن x زاویه مورد نظر برحسب رادیان است) می‌باشد و لذا از رابطه (23-2)

می‌توان رابطه تقریبی زیر را بدست آورد:

$$\alpha_p = \frac{r_g - (h + y) / 2}{r_c} = \frac{r_g}{r_c} - \frac{1}{r_c} \left(\frac{h + y}{2} \right) \quad (28-2)$$

این رابطه نشان می‌دهد که زاویه حفاظت کامل تقریباً یک تابع خطی از تابع $\frac{h + y}{2}$ ، یعنی ارتفاع متوسط سیم‌های حفاظت از صاعقه و هادی فاز می‌باشد.



2-2-1-6- زاویه برخورد¹

قبل از مبادرت به تحلیل معادلات فواصل برخورد مختلف، زاویه برخورد می‌بایستی در نظر گرفته شود. در مدل هندسی اولیه‌ای که آقای Young استخراج نموده بود، تنها ضربات صاعقه عمودی در نظر گرفته شده است و معادلاتی هم که تاکنون ارائه شده‌اند با این فرض استخراج شده‌اند. پس از Young، آقای Whitehead و سایر همکارانش مفهومی را توسعه دادند که به موجب آن شاخه پایین رونده صاعقه می‌تواند در هر جهتی بر روی خط فرود آید و تابع چگالی احتمالی به صورت زیر تعریف کردند:

$$f(\psi) = K \cos^2 \psi \quad (29-2)$$

که در آن ψ زاویه تا محور عمود بر خط می‌باشد و در حد فاصل $\pm \frac{\pi}{2}$ تغییر می‌کند. این فرض باعث افزایش پیچیدگی محاسبه SFFOR می‌شود و حدوداً به میزان 10 تا 29 درصد SFFOR را افزایش می‌دهد. توجه کنید که اگر $r_g < (h+y)/2$ باشد، زاویه حفاظتی مطابق رابطه (28-2) منفی خواهد بود، که با در نظر گرفتن توزیع زاویه برخورد تعداد محدودی صاعقه نزدیک سطح افقی امکان‌پذیر می‌باشد.

2-2-2- مدل اصلاح شده Eriksson

روشی که در بند (1-2-2) نشان داده شد، قابل اعمال به مدل هندسی معمول می‌باشد. در مقابل، مدل اصلاح شده Eriksson [10] می‌بایستی بطور جداگانه در نظر گرفته شود چرا که اولاً این روش فاصله برخورد به زمین را در نظر نمی‌گیرد و ثانیاً فرض می‌کند که کلیه زوایای برخورد یکسان هستند.

2-2-2-1- محاسبه SFFOR

مدل هندسی اصلاح شده Eriksson در فصل اول معرفی شد. دیاگرام هندسی این مدل در شکل (8-2) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل پیدا است، فاصله برخورد به زمین وجود ندارد و این فاصله به صورت یک حالت پیش فرض در نظر گرفته می‌شود. به این معنی که هر شاخه پایین رونده صاعقه که به کمان مشخص شده بوسیله r_c برخورد نماید به زمین برخورد خواهد کرد. بنابراین کلیه زوایای ضربه در نظر گرفته می‌شوند و همگی بطور مشابهی یکسان هستند. با این وجود، شاخه پایین رونده صاعقه نمی‌تواند پایین‌تر از ارتفاع هادی فاز رفته و آنگاه دوباره به بالای هادی فاز برگردد. میزان رؤیت صاعقه هادی فاز بوسیله کمان D_C مشخص می‌شود و بنابراین:

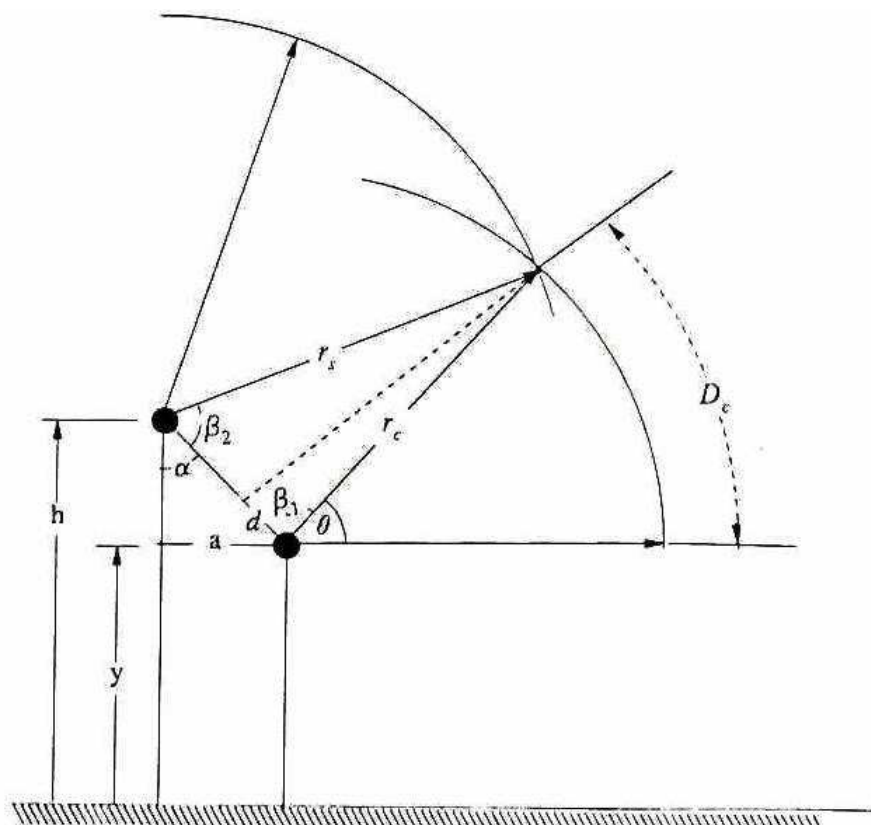
$$D_C = r_c \theta \quad (30-2)$$

که در آن زاویه θ برحسب رادیان می‌باشد. بنابراین همانند روش قبلی، SFFOR و SFR عبارتند از:

$$\begin{cases} \text{SFR} = 2N_g L \int_3^{I_m} D_C f(I) dI \\ \text{SFFOR} = 2N_g L \int_{I_c}^{I_m} D_C f(I) dI \end{cases} \quad (31-2)$$

1. Stroke angle





شکل 8-2: مدل هندسی اصلاح شده Eriksson

با توجه به شکل (8-2) برای تعیین D_c خواهیم داشت :

$$\begin{cases} r_s^2 - (c-d)^2 = r_c^2 - d^2 \\ d = \frac{r_c^2 - r_s^2 + c^2}{2c} \end{cases} \quad (32-2)$$

بنابراین :

$$\begin{cases} \beta_1 = \cos^{-1} \frac{d}{r_c} \\ \beta_2 = \cos^{-1} \frac{c-d}{r_s} \\ \theta = \alpha - \beta_1 + \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (33-2)$$

و از این رو :

$$D_c = (\alpha - \beta_1 + \frac{\pi}{2}) r_c \quad (34-2)$$



که در آنها کلیه زوایا بر حسب رادیان می‌باشند.

2-2-2-2- محاسبه زاویه حفاظت کامل و حداکثر جریان خطای سیستم حفاظت از صاعقه

فاصله افقی حفاظت کامل a_p و زاویه حفاظت کامل α_p را می‌توان از طریق شکل (9-2) به صورت زیر تعیین کرد:

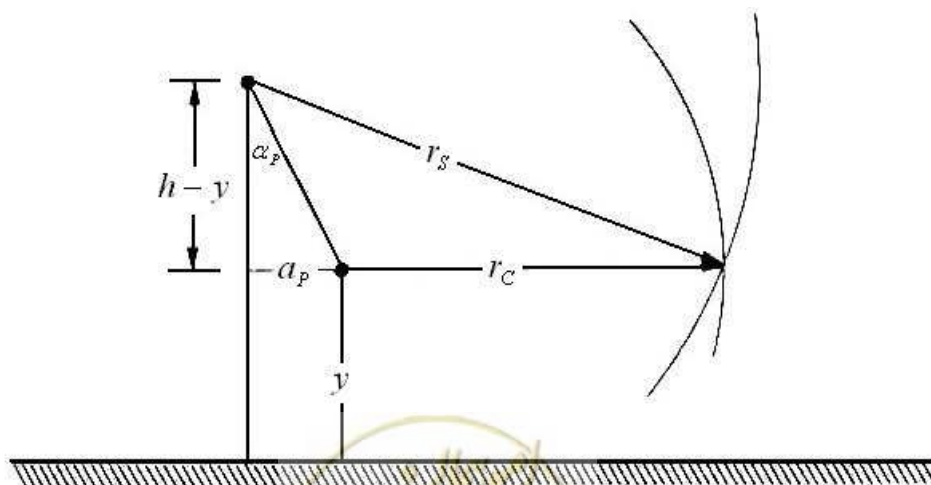
$$\begin{cases} a_p = \sqrt{r_s^2 - (h - y)^2} - r_c \\ \alpha_p = \tan^{-1} \frac{a_p}{h - y} \end{cases} \quad (35-2)$$

برای مقدار معینی از a ، حداکثر جریان خطای سیستم حفاظت از صاعقه I_m را می‌توان از طریق شکل (9-2) بدست آورد. حداکثر مقدار r_c یعنی r_{cm} برابر است با:

$$\begin{cases} r_{cm} = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left[a + \sqrt{a^2 + c^2 (\gamma^2 - 1)} \right] \\ \gamma = \frac{r_s}{r_c} \left(\frac{h}{y} \right)^{0.6} \end{cases} \quad (36-2)$$

و از این رو مطابق رابطه (14-1) از فصل اول، I_m به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$I_m = \left[\frac{r_{cm}}{0.67y^{0.6}} \right]^{\frac{1}{0.74}} \quad (37-2)$$



شکل 9-2: زاویه حفاظت کامل در مدل هندسی اصلاح شده Eriksson

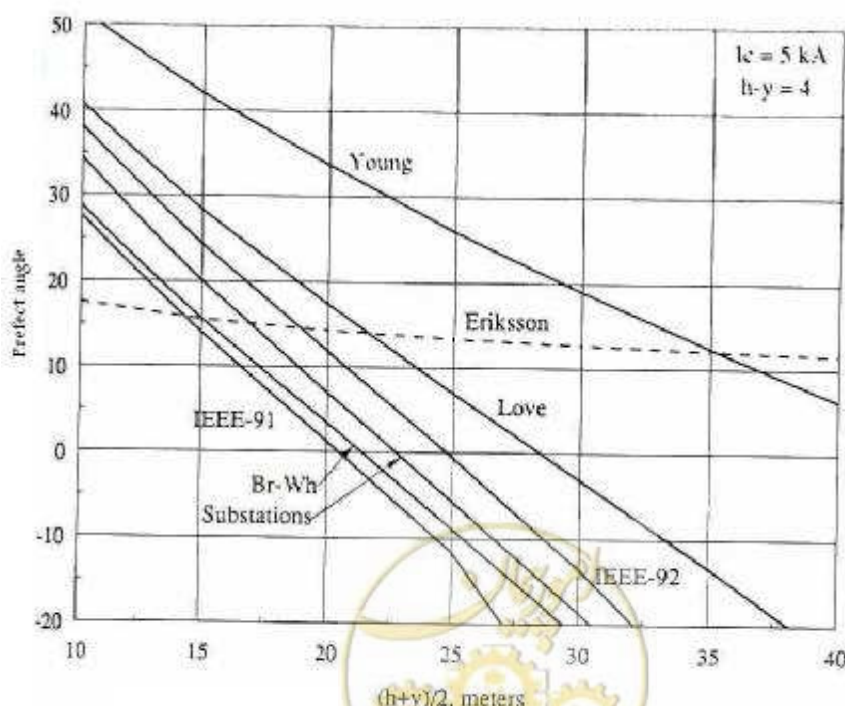
2-2-3- آنالیز حساسیت بر روی زاویه حفاظت کامل [1]

زوایای حفاظت کاملی که با استفاده از هفت معادله اصلی ارائه شده در بخش (1-3-3)، برای فواصل برخورد، محاسبه شده‌اند در شکل‌های (2-10) و (2-11) نشان داده شده‌اند.

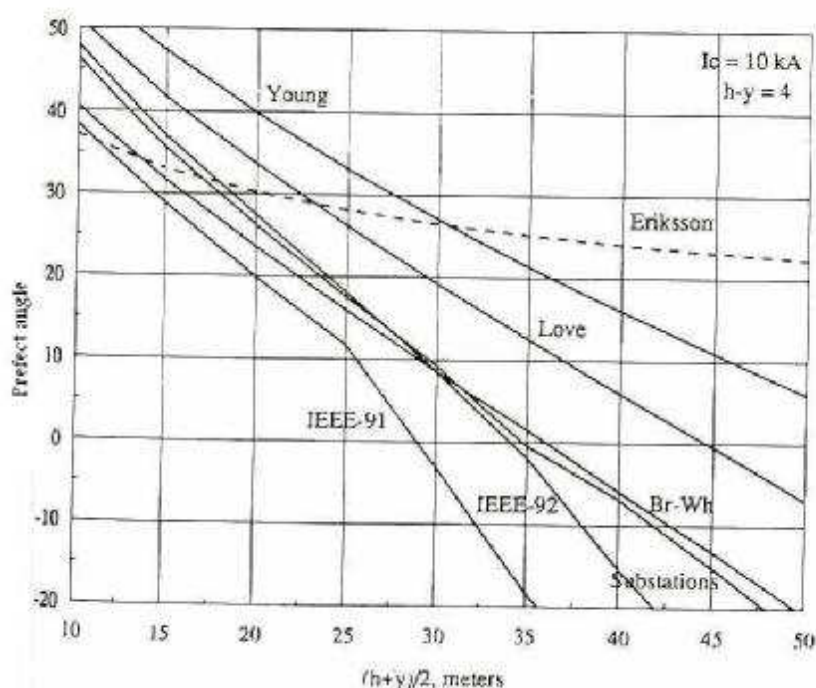
در مقابل سایر فرمول‌های فواصل برخورد، فرمول Eriksson نشان دهنده زاویه حفاظتی نسبتاً ثابت و مستقل از ارتفاع متوسط سیم حفاظت از صاعقه و هادی فاز می‌باشد.

بجز برای فرمول ارائه شده از سوی آقای Young، که تنها ضربات صاعقه عمود بر زمین را در نظر می‌گیرد، سایر فواصل برخورد برای ارتفاع‌های متوسط بزرگتر به زاویه حفاظتی منفی بزرگی منجر می‌شوند. برای جریان بحرانی 5 کیلوآمپری زوایای حفاظتی منفی برای ارتفاع‌های متوسط بزرگتر از حدود 20 متر اتفاق می‌افتد. برای جریان بحرانی 10 کیلوآمپری زوایای حفاظتی منفی برای ارتفاع‌های حفاظتی بالاتر از حدود 28 متر اتفاق می‌افتد.

معمولاً در هنگام طراحی چیزی که مطلوب است دست یافتن به زاویه حفاظتی کامل می‌باشد و این در حالی است که به عنوان مثال به ازای ارتفاع متوسط 30 متری و جریان بحرانی 5 کیلوآمپری، از منحنی‌های شکل (2-10) زوایای حفاظت کاملی بین منفی 35 درجه تا مثبت 19 درجه قابل استخراج می‌باشد. اگر تنها فرمول‌های ارائه شده توسط IEEE-1992, Br-Wh و IEEE-Substation در نظر گرفته شوند، زاویه حفاظتی استخراج شده به محدوده 18- تا 13- درجه کاهش می‌یابد. آنچه که باعث بروز این قبیل خطاها می‌گردد وجود این فرض است که زوایای ضربه می‌تواند حتی تا 90 درجه از محور عمود بر خط (ضربات صاعقه افقی)، نیز برخورد نمایند. اگر زوایای ضربه تا حد بیشتری محدود شوند، این زوایای حفاظتی بدست آمده افزایش می‌یابند. برای سهولت استفاده از این معادلات فواصل برخورد و به منظور اصلاح فرضیات نه چندان قوی در رابطه با ضربات صاعقه افقی، مراجع ارائه کننده این روابط فرض آقای Young مبنی بر فرود صاعقه به صورت عمود بر زمین را مورد توجه قرار داده‌اند و تنها این قبیل صاعقه‌ها را در نظر گرفته‌اند.



شکل 2-10: زوایای حفاظتی کامل با استفاده از مدل هندسی به ازای $I_c = 5 \text{ kA}$



شکل (11-2): زوایای حفاظتی کامل با استفاده از مدل هندسی و به ازای $I_c=10\text{KA}$

اما توضیحات بیشتری برای چگونگی وقوع این زوایای منفی مورد نیاز می‌باشد. دو شرط برای وقوع زوایای حفاظتی منفی لازم است. اول، همانطور که در بالا نیز توضیح داده شد، بجز برای رابطه ارائه شده از سوی آقای Young، ضربات صاعقه نزدیک به حالت افقی امکان پذیر هستند و دوم اینکه، ارتفاع هادی فاز، y ، می‌بایستی بزرگتر یا مساوی فاصله برخورد به زمین باشد یعنی $y \geq r_g$. برای توضیح این شرط دوم، شکل (a12-2) را در نظر بگیرید. به طور معمول وظیفه طراح تعیین محل سیم یا سیم‌های حفاظت از صاعقه برای آرایش مشخصی از هادی‌های فاز می‌باشد. برای انجام این کار به روش ترسیمی، فواصل برخورد محاسبه می‌شوند و خط افقی به فاصله r_g از سطح زمین و به موازات با آن رسم می‌گردد. سپس کمانهایی به شعاع r_c و به مرکزیت هادی‌های فاز رسم می‌گردد تا نقاط تلاقی A بدست آیند. اکنون به مرکزیت نقطه A کمانهایی از هادی‌های فاز (مطابق خطوط ممتد شکل (a12-2)) به سمت بالا رسم می‌گردند.

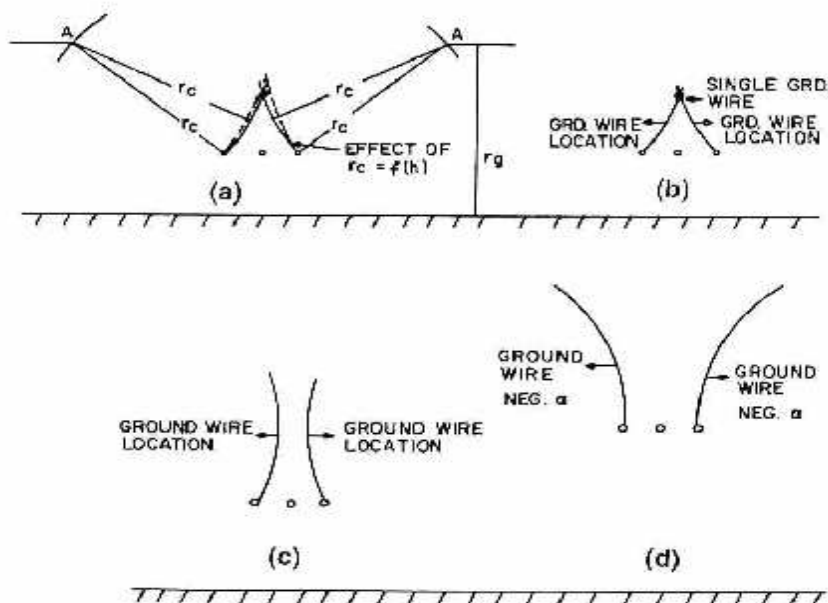
این دو کمان رسم شده با فرض ثابت بودن r_c ، مکان سیم‌های حفاظت از صاعقه را مشخص می‌نمایند.

سیم‌های حفاظت از صاعقه در هر مکان خارج از این کمانها می‌توانند قرار داده شوند. در شکل (b12-2) محل تقاطع دو کمان بعنوان محلی برای قرار گرفتن یک سیم حفاظت از صاعقه انتخاب شده است.

خط پررنگ شکل (a12-2) با فرض ثابت بودن r_c با ارتفاع سیم حفاظت از صاعقه رسم شده است. از آنجائی که r_c تابعی از ارتفاع سیم‌های حفاظت از صاعقه است، منحنی‌های خطچین شده شکل (a12-2) بکار می‌رود.

با استفاده از جریان بحرانی یکسان، شکل‌های (c12-2) و (d12-2) کمانهایی را برای یک r_c ثابت و قتیکه ارتفاع هادی‌های فاز افزایش می‌یابد نشان می‌دهد. شکل (c12-2) برای شرایط $y < r_g$ اما $h > r_g$ رسم شده است. می‌بایستی توجه نمود که بسته به محل سیم حفاظت از صاعقه، زاویه‌های حفاظتی مختلفی می‌توانند به وقوع بپیوندند و همچنین در این حالت، دو سیم حفاظت از صاعقه

مورد نیاز می‌باشد. چنانچه ارتفاع هادی‌های فاز از این مقدار هم بیشتر شوند، که در آنجا y بزرگتر یا مساوی r_g می‌باشد، مطابق شکل (2-12d) زوایای حفاظتی منفی مورد نیاز خواهند بود. با مراجعه به شکل‌های (2-10) و (2-11)، از آنجائی که در معادلات آقای Young تنها ضربات عمودی صاعقه در نظر گرفته شده‌اند، حداقل زاویه حفاظتی بدست آمده برابر صفر می‌باشد.



شکل 2-12: توجیه زوایای حفاظتی منفی

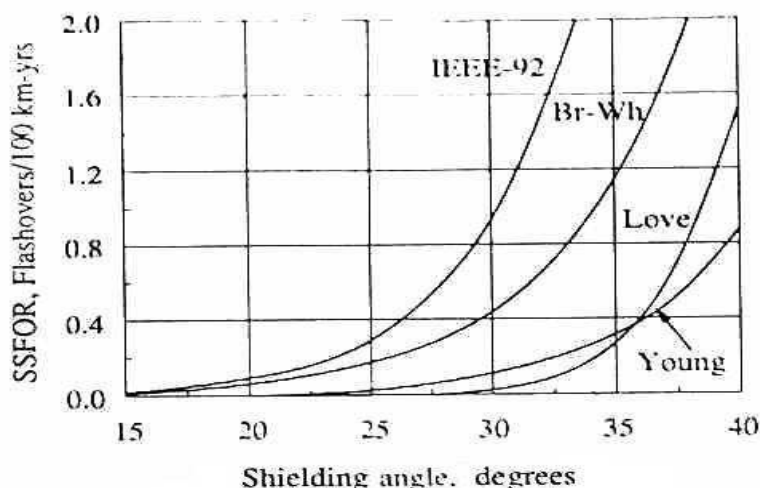
2-2-4- انتخاب زاویه حفاظتی براساس SFFOR

اصلی‌ترین هدف در انتخاب تعداد و محل سیم‌های حفاظت از صاعقه جلوگیری از برخورد صاعقه با هادی‌های فاز و کاهش نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه به یک سطح قابل قبول (با توجه به این نکته که SFFOR برابر صفر تقریباً از لحاظ عملی غیر ممکن است) می‌باشد. اگر چه این نظریه برای مناطقی که دارای چگالی صاعقه‌های برخورد بالا می‌باشند ممکن است مناسب باشد، اما برای مناطقی که در آنجا N_g بین 1 تا 4 می‌باشد این شرط، طراحی براساس حفاظت کامل، ممکن است مسائل طراحی اقتصادی خط را دچار مشکل سازد. بنابراین برای نواحی با چگالی صاعقه کم ممکن است یک سیم حفاظت از صاعقه کفایت نماید، در حالیکه برای مناطق با چگالی صاعقه بیشتر ممکن است دو سیم حفاظت از صاعقه مورد نیاز باشد. بنابراین طراحی براساس مقدار غیر صفری از SFFOR پیشنهاد می‌شود [1]. در این حالت مقدار SFFOR می‌بایستی برای فراهم نمودن امکان طراحی‌های اقتصادی توسط طراح خط انتخاب گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در مورد خطوطی که بارهای مهمی را تغذیه می‌کنند، مقدار طراحی 0/05 جرعه در هر 100 کیلومتر بر سال می‌تواند مناسب باشد. با این وجود گاهی اوقات مقادیر طراحی به بزرگی 2 جرعه در هر 100 کیلومتر بر سال نیز انتخاب شده است.

از دیگر مزایای انتخاب SFFOR غیر صفر آن است که اختلاف‌های فاحشی که در زوایای حفاظتی، هنگام استفاده از حفاظت کامل (SFFOR=0) از طریق روش‌های مختلف ارائه شده (شکل‌های 2-10 و 2-11) به وجود آمد، به میزان زیادی کاهش می‌یابد. این اختلاف‌ها در صورتی که تنها ضربات عمودی صاعقه در نظر گرفته شوند باز هم کمتر خواهد شد.



برای بررسی دومین عامل کاهش اختلافها (این مسئله که تنها ضربات عمودی صاعقه در نظر گرفته شوند) SFFOR به صورت تابعی از زاویه حفاظتی، با استفاده از چهار معادله اصلی فواصل برخورد، در شکل (2-13) نشان داده شده است. در این شکل ارتفاع سیم حفاظت از صاعقه و هادی‌های فاز ثابت نگه داشته شده‌اند و مقدار جریان بحرانی برابر 10 کیلوآمپر فرض شده است. منحنی‌های رسم شده در شکل (2-13) در ابتدا دارای تغییرات اندکی می‌باشند اما به دنبال آن یک سری تغییرات زیاد مشاهده می‌گردد. از این رو زاویه حفاظتی می‌بایستی در ناحیه‌ای که تغییرات به آرامی صورت می‌پذیرد انتخاب گردد.

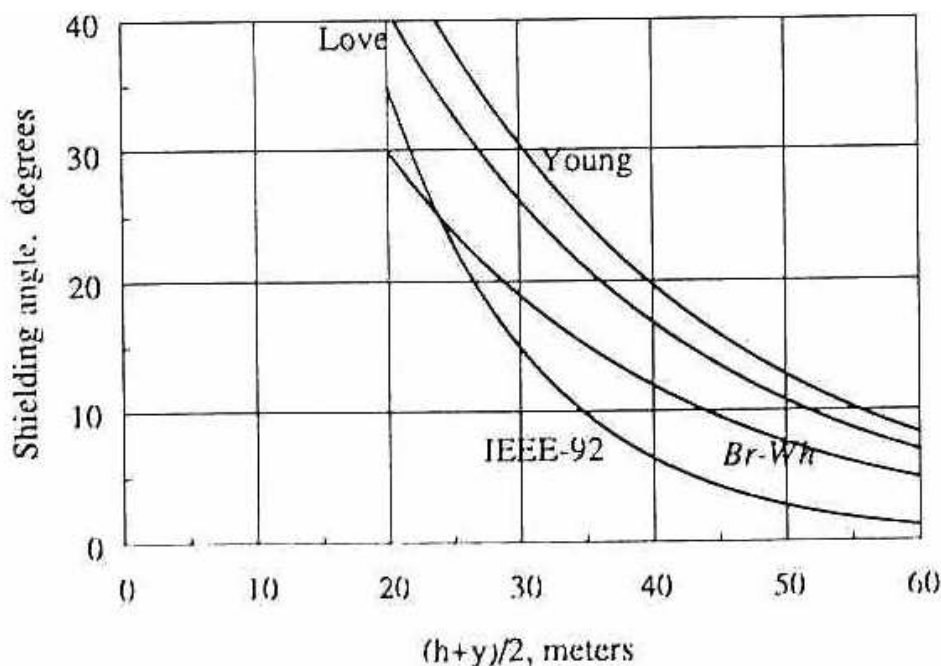


شکل 2-13: زوایای حفاظتی با فرض ضربات صاعقه عمودی، استفاده از مدل هندسی و

$$N_g=4 \text{ و } y=28\text{m}, h=30\text{m}, I_c=10\text{KA}$$

چهار رابطه فاصله برخورد نشان داده شده در شکل (2-13) تغییرات زیادی در زاویه حفاظتی را به نمایش می‌گذارند. به عنوان مثال به ازای میزان SFFOR برابر با 0/2 جرقه در هر 100 کیلومتر بر سال، شکل (2-13) نشان می‌دهد که زوایای حفاظتی می‌تواند بسته به معادله فاصله برخورد استفاده شده مقادیر 24، 26، 33 یا 34 درجه را به خود اختصاص دهد. معادلات ارائه شده بوسیله Love، Young تقریباً نتایج مشابهی را ارائه می‌دهند، اما معادلات ارائه شده بوسیله IEEE- و Brown-Whitehead 1992 محافظه کارانه‌تر می‌باشند. برای نشان دادن این مسئله که نتایج این منحنی‌ها به ازای مقدار غیر صفری از SFFOR بیشتر به یکدیگر همگرا می‌شوند، شکل (2-14) به ازای میزان SFFOR برابر با 0/05 جرقه در 100 کیلومتر بر سال نشان داده شده است.





شکل 14-2: زوایای حفاظتی به ازای $N_g=4$ و $y=28m$, $h=30m$, $I_c=10KA$

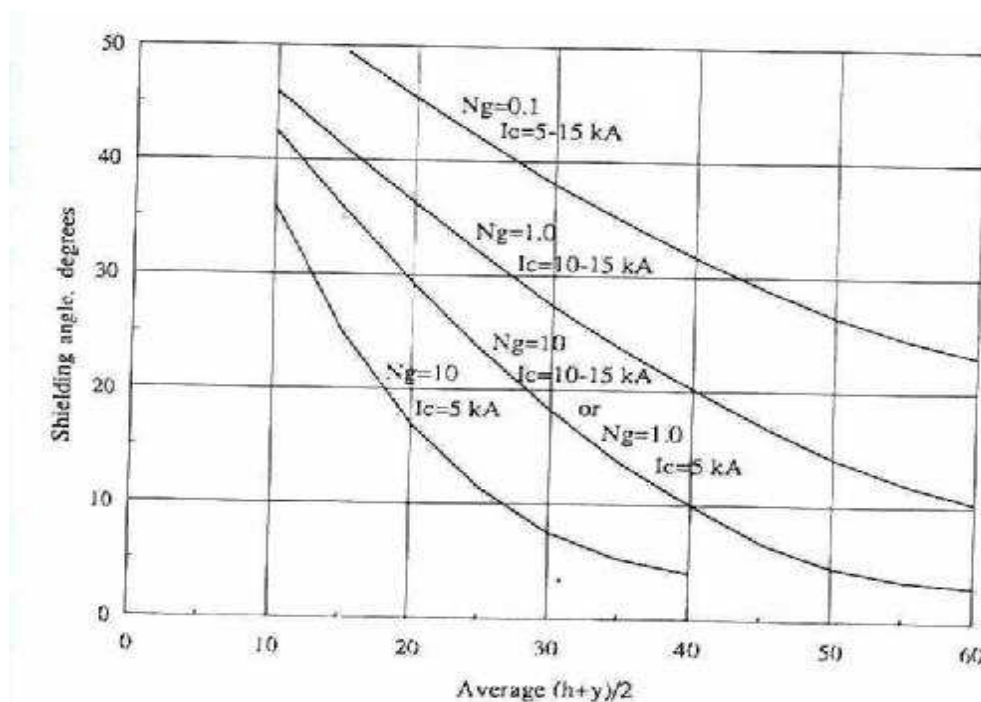
توجه کنید که در شکل (14-2) کلیه روابط ارائه شده برای فواصل برخورد مقادیر معقولی از زاویه حفاظتی را نتیجه می‌دهند. در این حالت نیز منحنی‌های مربوط به معادلات ارائه شده بوسیله Love و Young تقریباً مشابه یکدیگر هستند، در حالیکه منحنی مربوط به معادلات ارائه شده بوسیله Brown-Whitehead محافظه کارانه‌تر می‌باشد. تغییرات نسبتاً زیاد مشاهده شده در منحنی ارائه شده از سوی IEEE-92 (کاهش سریع زاویه حفاظتی در زوایای کوچک با افزایش ارتفاع متوسط $(h+y)/2$) به جهت محدودیت استفاده از مقدار ضریب c در رابطه (12-1) می‌باشد.

نکته دیگر اینکه، منحنی Young زاویه حفاظتی را در محل برج ارائه می‌دهد در حالی که سایر منحنی‌ها برای متوسط زاویه حفاظتی در امتداد اسپن می‌باشند و از این رو زاویه حفاظتی در برج بزرگتر خواهد بود. از این رو برای مقایسه بهتر این منحنی‌ها، منحنی Young می‌بایستی کمی به سمت چپ شکل (14-2) حرکت داده شود و یا اینکه سایر منحنی‌ها به سمت راست شکل مقداری حرکت داده شوند. این مسئله موجب بهبود مقایسه زوایای حفاظتی می‌گردد.

برای طراحی‌های عمومی، پیشنهاد می‌شود که مقدار طراحی SFFOR برابر با 0/05 جرعه در هر 100 کیلومتر بر سال انتخاب گردد و یکی از معادلات Brown-Whitehead یا IEEE-92 مورد استفاده قرار گیرد. ضربات صاعقه نیز عمودی فرض شود. این معادلات یک حد محافظه کارانه معقول را برای زاویه حفاظتی فراهم می‌آورند. توجه کنید که در این حالت نیز زوایای حفاظتی می‌بایستی به صورت متوسط زاویه حفاظتی در طول اسپن در نظر گرفته شوند. یعنی اینکه این زوایا، زوایای حفاظتی در ارتفاع برج منهای $\frac{2}{3}$ فلش می‌باشد. اگر نیاز به محافظه کاری بیشتری باشد، می‌توان این زوایا را به صورت زاویه حفاظتی در برج در نظر گرفت.

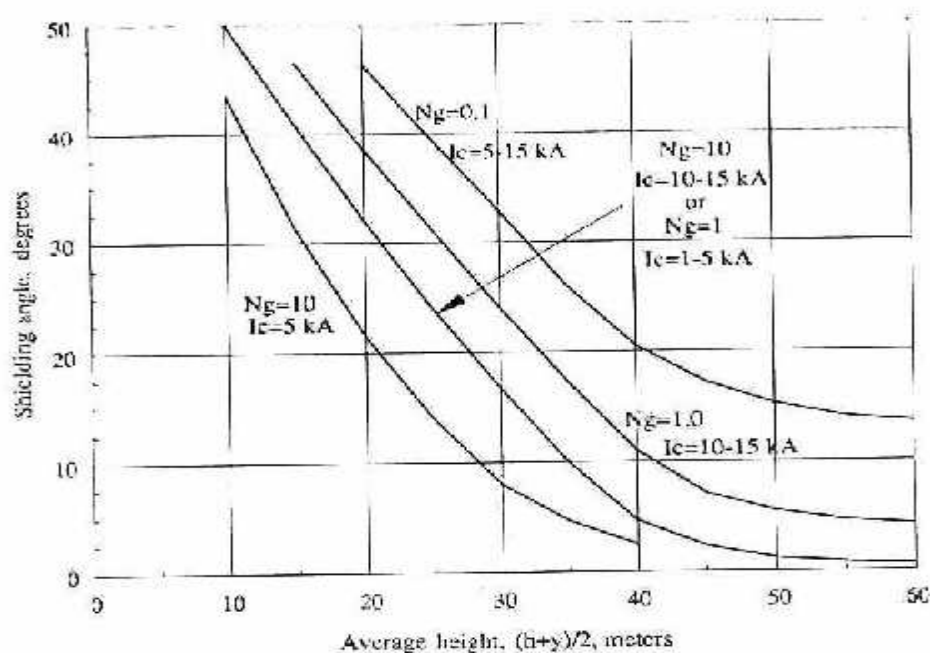


برای مساعدت در انتخاب زاویه حفاظتی، منحنیهای نشان داده شده در شکلهای (2-15) و (2-16) بر اساس معادلات ارائه شده از سوی Brown-Whitehead و IEEE-92 با فرض ضربات صاعقه عمود بر زمین و به ازای SFFOR برابر با 0/05 جرعه در هر 100 کیلومتر بر سال تهیه شده‌اند.



شکل 2-15: زوایای حفاظتی برای $SFFOR=0.05/100\text{Km-year}$ و معادلات فواصل برخورد Brown-Whitehead و با فرض ضربات صاعقه عمود بر زمین





شکل 2-16: زوایای حفاظتی برای $SFFOR=0.05/100\text{Km-year}$ و معادلات فواصل برخورد IEEE-92

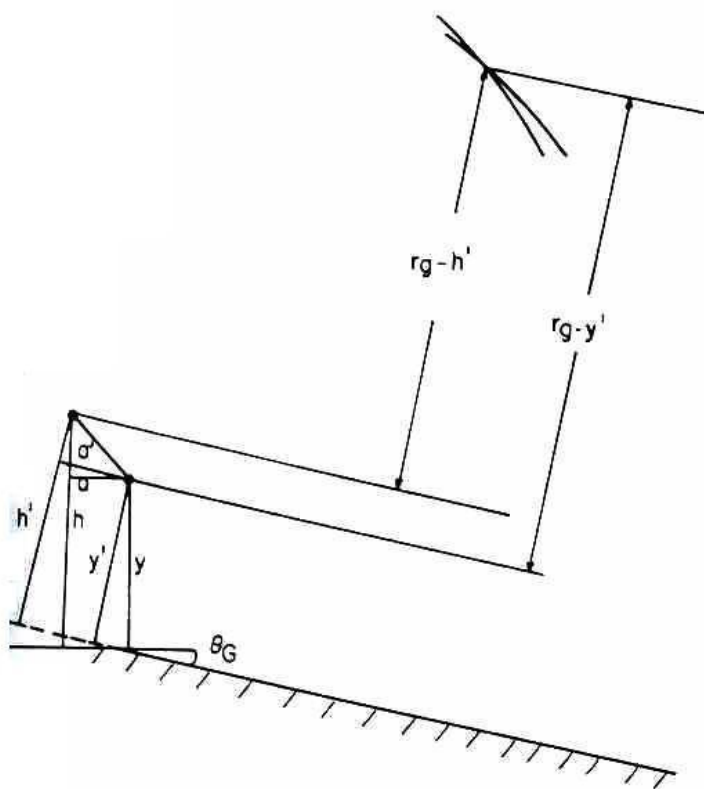
و با فرض ضربات صاعقه عمود بر زمین

2-2-5- متغیرهای طراحی

2-2-5-1- آثار ناشی از شیب‌دار بودن زمین

زوایای حفاظتی با فرض زمین مسطح یا کروی محاسبه می‌شوند. برای برجهایی که بر روی زمین شیب‌دار قرار دارند، متوسط زاویه حفاظتی که از شکل‌های (2-15) و (2-16) بدست می‌آیند، می‌بایستی از زاویه شیب زمین کسر شوند. برای روشن شدن مطلب شکل (2-17) را در نظر بگیرید که در آن زاویه شیب زمین با θ_G نشان داده شده است.





شکل 2-17: اثر شیب زمین بر روی زاویه حفاظت از صاعقه

در این حالت خطی به فاصله r_g از سطح زمین و به موازات آن رسم شده است. از این رو فاصله افقی برای زاویه حفاظت کامل

برابر است با :

$$a' = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h')^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y')^2} \quad (38-2)$$

که در آن :

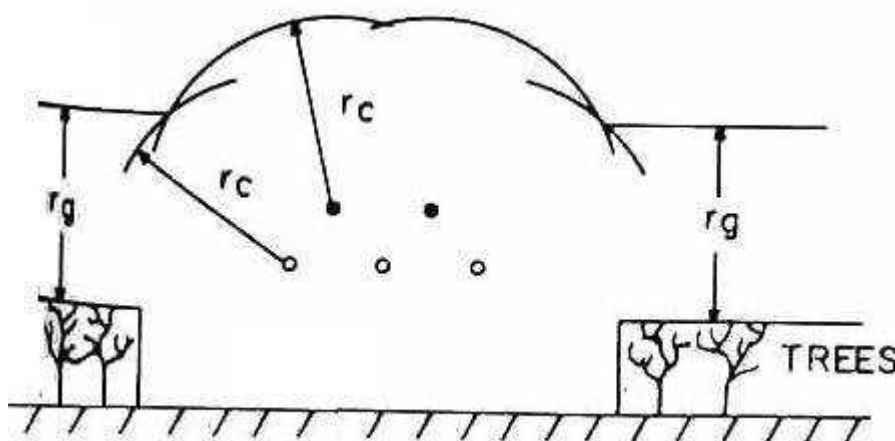
$$\begin{cases} a' = (a + h \tan \theta_G) \\ h' = (h - a \tan \theta_G) \\ y' = ya' \cos \theta_G \end{cases} \quad (39-2)$$

این معادلات را می‌توان برای a' حل کرد، اما با مقداری محافظه‌کاری و با یک تقریب خوب، زاویه حفاظتی برابر زاویه حفاظتی محاسبه شده قبلی بدون وجود زمین شیب دار منتهای زاویه شیب زمین می‌باشد. به عنوان مثال اگر زاویه حفاظتی انتخاب شده برای حالت زمین مسطح برابر 30 درجه و زاویه شیب زمین برابر 15 درجه باشد، زاویه حفاظتی برای محل شیب‌دار برابر 15 درجه خواهد بود.



2-5-2-2- آثار ناشی از درختان مجاور خط انتقال

درختان، استراکچرها و مواردی از این دست که در مجاورت خط انتقال و در حریم آن قرار دارند به جهت افزایش موثر صفحه زمین یا کاهش ارتفاع خط، همانطور که در شکل (2-18) نشان داده شده است، وضعیت را بهبود می‌بخشند. فاصله برخورد به زمین از بالای درختان یا استراکچرها در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، برای این حالت زوایای حفاظتی بزرگتری می‌توان مورد استفاده قرار داد. وجود این درختان و استراکچرهای بلند در مجاورت خطوط انتقال موجب جذب ضربات صاعقه دور دست به نزدیک خط شده و از این رو احتمال بروز جرقه ناشی از ولتاژهای القاء شده بوسیله ضربات صاعقه نزدیک خط را افزایش می‌دهد. البته این مسئله بیشتر در مورد خطوط فشار ضعیف می‌تواند مسئله‌ساز باشد و معمولاً در مورد خطوط فشار قوی لحاظ نمی‌گردد.



شکل 2-18: اثر درختان مجاور خط بر روی سیستم حفاظت از صاعقه خط انتقال

2-5-2-3- آثار ناشی از قرارگیری برج بر روی بلندی

برجهایی که بر روی بلندیهای همچون تپه‌ها و کوهها قرار می‌گیرند به شدت آسیب‌پذیر می‌باشند، چونکه تعداد ضربات صاعقه بیشتری بوسیله این برجهای جذب می‌گردد. بلندیها حتی برای مسئله قوس برگشتی نیز بسیار خطرناک می‌باشند، چرا که مقاومت پایه برج نسبت به حالت‌های معمول بیشتر است و این مسئله موجب تشدید پدیده قوس برگشتی می‌گردد. براساس اطلاعات گزارش شده در این زمینه، تنها عملکرد تعداد اندکی برج یا بخش‌های از خط مکرراً عملکرد کل خط را دیکته کرده‌اند. از این رو تا حد امکان می‌بایستی مسیر خط انتقال به گونه‌ای انتخاب شود که حداقل تعداد برجهای بر روی بلندیهای همچون تپه‌ها و کوهها قرار گیرد.

2-5-2-4- هادی‌های فاز مرکزی خط انتقال

بحث‌هایی که تاکنون صورت گرفت بر روی حفاظت از صاعقه فازهای بیرونی خط انتقال متمرکز شده است. از آنجا که خط‌های حفاظتی برای فاز میانی تنها در موارد بسیار نادر ممکن است به وقوع بپیوندد، معمولاً آنها برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند. برای کلیه موارد تجربی طراحی برج، خطای سیستم حفاظت از صاعقه برای فاز میانی در نظر گرفته نمی‌شود. با در نظر گرفتن کلیه عوامل فوق‌الذکر، انتخاب نهایی زاویه حفاظتی در برج می‌بایستی با توجه به قضاوت‌های مهندسی، براساس تجارب طراح و براساس عملکرد سایر خطوط موجود در سیستم انتخاب گردد.

2-2-6- یک روش ساده جهت محاسبه SFFOR

معادلاتی که در بخشهای قبلی ارائه شده‌اند می‌بایستی با استفاده از انتگرال عددی حل شوند. یک روش تقریبی بسیار مناسب برای محاسبه SFFOR بوسیله G.J. Anderson در مرجع [12] ارائه شده است. با ملاحظه این نکته که به ازای I_m مقدار D_C برابر صفر است، Anderson پیشنهاد کرده است که مقدار متوسط D_C در حد فاصل I_C تا I_m معادل با نصف مقدار D_C به ازای $I = I_C$ می‌باشد. مقدار D_C را در جریان $I = I_C$ با D_{CC} نمایش می‌دهند. از آنجائی که مقدار D_{CC} ثابت فرض شده است، می‌توان آن را از انتگرال محاسبه SFFOR خارج کرد، یعنی اینکه :

$$\begin{aligned} \text{SFFOR} &= 2N_g L \frac{D_{CC}}{2} \int_{I_C}^{I_m} f(I) dI \\ &= 2N_g L \frac{D_{CC}}{2} P(I_m \geq I \geq I_C) \\ &= 2N_g L \frac{D_{CC}}{2} [F(I_m) - F(I_C)] \\ &= 2N_g L \frac{D_{CC}}{2} [Q(I_C) - Q(I_m)] \end{aligned} \quad (40-2)$$

که در آن $Q(I)$ از رابطه (1-5) بدست می‌آید.

2-2-7- روش گام به گام جایابی بهینه سیم‌های حفاظت از صاعقه

بطور کلی جهت جایابی بهینه سیم‌های حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو، گام‌های زیر می‌بایستی دنبال گردد :

گام اول :

تعیین میزان SFFOR قابل قبول براساس میزان اهمیت خط و شرایط جغرافیایی و آب و هوایی مکانهایی که در مسیر خط انتقال قرار دارند. جز در موارد خاص استفاده از میزان SFFOR مخالف صفر به جهت کاهش هزینه‌های طراحی و اجرای سیستم حفاظت از صاعقه خط پیشنهاد می‌گردد. بطور کلی میزان SFFOR پیشنهادی برابر 0/05 جرقه در هر 100 کیلومتر در سال می‌باشد.

گام دوم :

استخراج پارامترهای مورد نیاز جهت طراحی و تحلیل سیستم حفاظت از صاعقه خط انتقال شامل :

- تعیین سطح ایزوکرونیک در محل یا محل‌هایی که در مسیر خط انتقال قرار دارند.
- تعیین مشخصات هندسی وضعیت قرارگیری هادی‌های فاز نسبت به یکدیگر و نسبت به سطح زمین، مشخصات هادی‌های فاز (از قبیل باندلی بودن یا نبودن و شعاع هادی‌ها) و حداقل فاصله آزاد هوایی فاز - زمین (طول زنجیره مقرر یا کوتاهترین فاصله هوایی بین هادی فاز و نقاط فلزی زمین شده برج، هر کدام که کوچکتر هستند) جهت تعیین امپدانس موجی، ولتاژ جرقه بحرانی (CFO) و جریان بحرانی خط انتقال (I_C) و ارتفاع متوسط هادی‌های فاز از سطح زمین، ارتفاع متوسط هادی‌های فاز از سطح زمین از رابطه زیر تعیین می‌شود :

$$\bar{y} = y_t - \frac{2}{3} f_c \quad (41-2)$$



که در آن:

$\bar{y}$: ارتفاع متوسط هادی فاز از سطح زمین، بر حسب متر

y_t : ارتفاع هادی فاز در محل برج، بر حسب متر

f_c : فلش هادی فاز، بر حسب متر

گام سوم:

در صورت دسترسی به برنامه‌های کامپیوتری مبتنی بر معادلات استخراج شده در بندهای قبلی، ضربات صاعقه نزدیک به سطح افق نیز در نظر گرفته می‌شود و مقدار زاویه حفاظت از صاعقه مطلوب و محل قرارگیری سیم یا سیم‌های حفاظت از صاعقه، جهت دست یافتن به SFFOR مطلوب و لحاظ مسائل اقتصادی تعیین می‌شوند.

گام چهارم:

در صورت انجام محاسبات به صورت دستی با تقریب قابل قبولی می‌توان تنها ضربات صاعقه عمود بر سطح زمین را در نظر گرفت و از روش ساده‌ای که جهت محاسبه SFFOR ارائه گردید استفاده نمود. روش کار بصورت زیر می‌باشد:

- مقدار پیش فرض برای زاویه حفاظت از صاعقه انتخاب می‌گردد. برای این منظور می‌توان بطور تقریبی از منحنی‌های نشان داده شده در شکل‌های (2-15) و (2-16) استفاده نمود. انتخاب اولیه زاویه حفاظتی و اندازه $(h+y)/2$ که در آن هردوی y و h ارتفاع‌های متوسط هستند، می‌بایستی به گونه‌ای باشد که در صورت امکان به یک سیم حفاظت از صاعقه با کوچکترین h ممکن (حداقل هزینه ممکنه) منجر گردد. برای این کار می‌توان از روشهای ترسیمی - هندسی استفاده نمود.
- مقدار جریان I_m با استفاده از روابط (2-12) و (2-13) و با استفاده از معادلات فواصل برخورد ارائه شده از سوی Brown-Whitehead یا IEEE-1992 (معادلات 1-9 و 1-12 فصل اول) استخراج می‌شود.
- میزان SFFOR منتجه شده از این انتخاب اولیه زاویه حفاظتی و محل قرارگیری سیم حفاظت از صاعقه با استفاده از معادله (2-40) و معادلات مرتبط با آن استخراج می‌گردد.
- چنانچه SFFOR حاصل از قسمت قبلی برابر یا کوچکتر از میزان SFFOR مطلوب باشد، طراحی انجام گرفته صحیح بوده و زاویه حفاظتی و محل قرارگیری سیم یا سیم‌های حفاظتی فرض شده، به عنوان وضعیت مطلوب برای طراحی پذیرفته می‌شوند.
- در صورتیکه میزان SFFOR محاسبه شده، به ازاء سیستم حفاظت از صاعقه فرضی، مطلوب نباشد می‌بایستی با تغییر زاویه حفاظتی پیشین (با افزایش ارتفاع سیم یا سیم‌های حفاظت از صاعقه یا استفاده از دو سیم حفاظت از صاعقه، هر کدام که به هزینه‌های کمتری منجر گردند) مراحل فوق مجدداً دنبال شوند تا نتیجه مطلوب فراهم شود. نکته‌ای که می‌بایستی به آن توجه نمود این است که زاویه حفاظتی انتخاب شده، زاویه حفاظتی متوسطی می‌باشد که در طول اسپن به وقوع می‌پیوندد. لذا از آنجا که زاویه حفاظتی در طول اسپن از زاویه حفاظتی در محل برج کوچکتر می‌باشد می‌توان زاویه حفاظتی را در محل برج مقداری بزرگتر در نظر گرفت (حداکثر تا 5 درجه). علاوه بر این مقادیر y و h استفاده شده در معادلات ارائه شده در بخشهای قبلی، ارتفاع‌های متوسط بوده و هنگام اعمال آنها به محل برج می‌بایستی از مقدار واقعی آنها در محل برج یعنی y_t (که از معادله 2-41 قابل حصول است) و h_t که از معادله زیر قابل تعیین است، استفاده نمود.

$$\bar{h} = h_t - \frac{2}{3} f_t \quad (42-2)$$

که در آن :

$\bar{h}$: ارتفاع متوسط سیم حفاظت از صاعقه، بر حسب متر

h_t : ارتفاع سیم حفاظت از صاعقه در محل برج، بر حسب متر

f_t : فلش سیم حفاظت از صاعقه، بر حسب متر

2-3- مشخصات سیم حفاظت از صاعقه از دیدگاه الکتریکی

در هنگام اتصال کوتاه‌های نامتقارن به زمین (بویژه اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین)، جریانهای اتصال از طرق مختلف از جمله سیم محافظ هوایی، بدنه برج، اتصال زمین برج، پستهای انتقال و توزیع و غیره برقرار می‌گردد. به این ترتیب میزان جریان اتصال به امپدانسهای سیستم انتقال و تولید، محل اتصال (فاصله تا نزدیکترین پست نیروگاهی یا فشارقوی)، مقاومت زمین پای برج در محل اتصال و سطح مقطع موثر سیم حفاظت از صاعقه، تعداد سیم‌های حفاظت از صاعقه و... بستگی خواهد داشت.

در مواقعی که جریان‌های اتصال کوتاه کوچک هستند، حداقل سطح مقطع سیم حفاظت از صاعقه معمولاً بوسیله ملاحظات مربوط به جریان صاعقه تعیین می‌گردد تا جریان اتصال کوتاه. با این حال، در صورتی که جریان‌های اتصال کوتاه بزرگتر از حدود 20 کیلوآمپر باشند، جریان سیم حفاظت از صاعقه‌ای که سطح مقطع آن براساس جریان صاعقه تعیین شده است می‌تواند از قابلیت عبور جریان سیم مورد نظر فراتر رود. تحت چنین شرایطی، به منظور جلوگیری از صدمه دیدن سیم حفاظت از صاعقه می‌بایستی از هادی با سطح مقطع بزرگتر (یا قابلیت عبور جریان بیشتر) استفاده نمود [20].

از نظر اثرات اتصال کوتاه، نوع و محل اتصال، برخورد صاعقه، شرایط بارگذاری، اسپینها، فلش‌ها، تنش‌های مکانیکی، تحمل بارهای اضافی و... سیم‌های حفاظتی از صاعقه OPGW نیز همانند سیم‌های حفاظت از صاعقه معمولی طراحی و انتخاب می‌شوند. اما به جهت اینکه سیم‌های حفاظت از صاعقه OPGW علاوه بر محافظت سیستم انتقال در مقابل اصابت مستقیم صاعقه به هادی‌های فاز و انتقال جریانهای اتصال کوتاه وظیفه انتقال اطلاعات جهت ارتباطات مخابراتی بین پستها را عهده‌دار هستند، ضروری است که در هنگام تعیین سطح مقطع بخش حامل جریان این قبیل سیم‌های حفاظت از صاعقه تنش‌های مکانیکی، تحمل بارهای اضافی، شرایط بارگذاری، حداکثر درجه حرارت مجاز و... واحدهای فیبر نوری جاسازی شده در داخل یا خارج این قبیل سیم‌ها را نیز در نظر گرفت.

2-3-1- بررسی جریان عبوری از سیم‌های حفاظتی از دیدگاه اتصال کوتاه

بیش از 80 درصد اتصالاتی‌های خطوط انتقال نیرو از نوع تک‌فاز به زمین هستند و این نوع اتصالاتی در شرایط طوفانی، آلودگی و شکستگی مقره‌ها، اتصال اجسام خارجی (شاخه درختان، پرندگان و...) بین فاز و بدنه برج، پارگی سیم فاز، و یا سیم‌های حفاظت از صاعقه، ولتاژهای القایی و جریانهای خزشی و یا عوامل مختلف دیگر اتفاق می‌افتد. قابلیت تحمل سیم‌های حفاظت از صاعقه معمولی یا OPGW در مقابل عبور جریان ناشی از اتصال کوتاه به مدت زمان اتصالاتی و یا سزمان عملکرد رله و برطرف شدن خطا¹ بستگی دارد. این زمان در سیستم‌های HV و EHV حداکثر 20 الی 25 سیکل، برای عملکرد رله پشتیبان در نظر گرفته می‌شود.

1. Fault clearing time



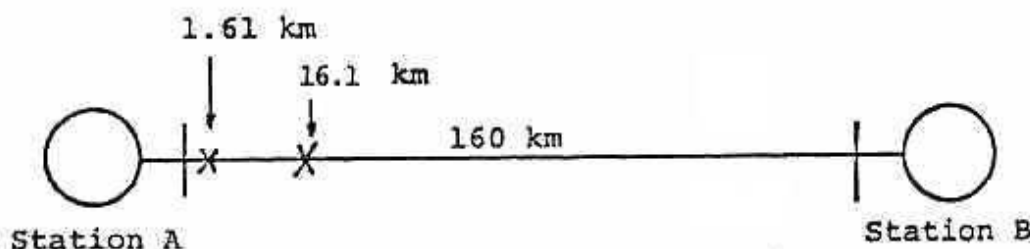
البته در محاسبات اتصال کوتاه و تعیین مشخصات سیستم زمین پستها و نیروگاهها مدت زمان اتصالی خیلی بیشتر (نوعاً 1 تا 3 ثانیه) در نظر گرفته می‌شود.

در مرجع [20] عوامل موثر بر تعیین سطح مقطع سیم حفاظت از صاعقه (از دیدگاه جریانهای اتصال کوتاه) همراه با شبیه‌سازی یک خط انتقال 500 کیلوولت مورد بررسی قرار گرفته است. در ذیل به اجمال برخی از این عوامل را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

- کلیات :

دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه به همراه مکانهای وقوع خطا در شکل (2-19) نشان داده شده است. نقطه A نشان دهنده یک نیروگاه پر قدرت می‌باشد در حالیکه نقطه B معادل تونن مابقی سیستم را نشان می‌دهد. هر یک از این نقاط را در مطالعات شبیه‌سازی می‌توان با یک منبع ایده‌آل به همراه یک امپدانس داخلی در نظر گرفت. در مطالعه مذکور برای پست B امپدانس درصدی معادل با $0/4$ درصد در نظر گرفته شده است و پست A بصورت باس بی نهایت فرض شده است. جزئیات مربوط به نحوه نمایش منابع، امپدانس معادل برجهای، مقاومت پایه زمین برجهای، امپدانس معادل هادی‌های فاز و سیم‌های حفاظت از صاعقه، نحوه شبیه‌سازی و... در مرجع مذکور ارائه گردیده است که در این قسمت جهت پرهیز از طولانی شدن بی‌مورد مطالب، فقط نتایج بررسی‌های انجام گرفته در این مقاله ارائه می‌گردد.

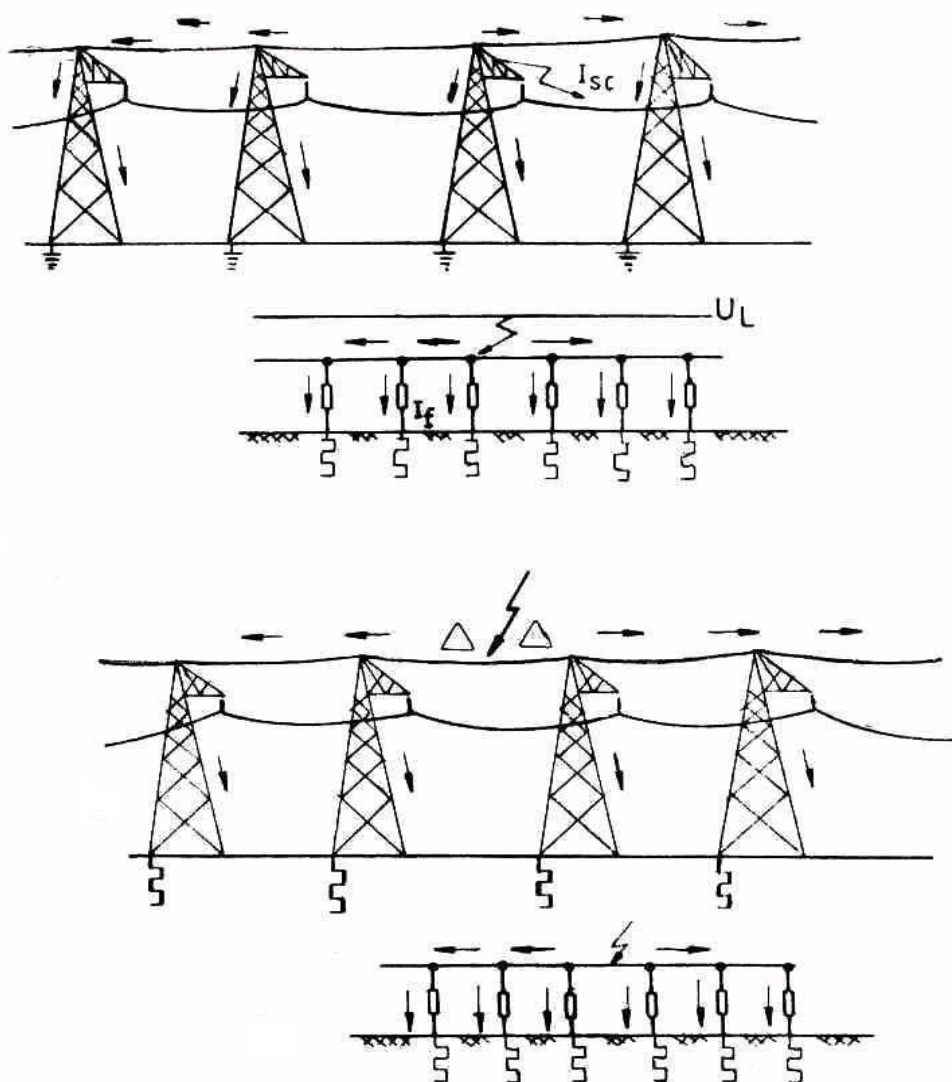
مطالعات تنها براساس اتصال کوتاه تک‌فازی که از طریق برج برقرار می‌شود، انجام گرفته است. به علت نادر بودن احتمال وقوع اتصال کوتاه‌های تک‌فاز در وسط اسپن، این قبیل اتصال کوتاه‌ها، در مطالعات انجام گرفته لحاظ نشده‌اند.



شکل 2-19: دیاگرام تک خطی سیستم نوعی مورد بررسی در مرجع [20] جهت انتخاب سطح مقطع سیم حفاظت از صاعقه خطوط انتقال

جریانهای خطا در اسپن‌های مجاور محل خطا بزرگ بوده و در اسپن‌های دورتر، جریانهای خطا به جهت توزیع جریان در شاخه‌های سری - موازی متشکل از برجهای و اسپن‌ها کاهش می‌یابند. در شکل (2-20) این مسئله نشان داده شده است. بنابراین مگر در مواردی که صریحاً بیان شده است، جریانهای سیم‌های حفاظت از صاعقه‌ای که در این تحلیل‌ها نشان داده شده‌اند جریانهای عبوری از سیم‌های حفاظت از صاعقه مجاور با برج دچار خطا شده هستند.



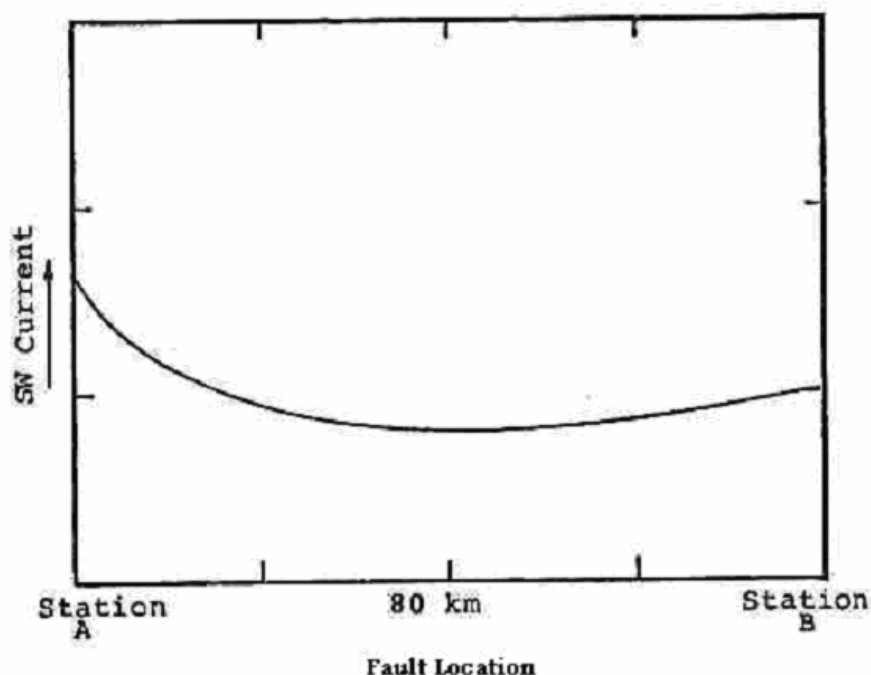


شکل 2-20: نحوه توزیع جریان خطا در امتداد خط انتقال

- اثر مقاومت پایه برج و محل خطا بر روی جریان سیم حفاظت از صاعقه :

جریان سیم حفاظت از صاعقه، همانند جریان خطا به صورت تابعی از محل خطا در امتداد خط انتقال تغییر می کند. این موضوع در شکل (21-2) برای سیستم مورد مطالعه نشان داده شده است.





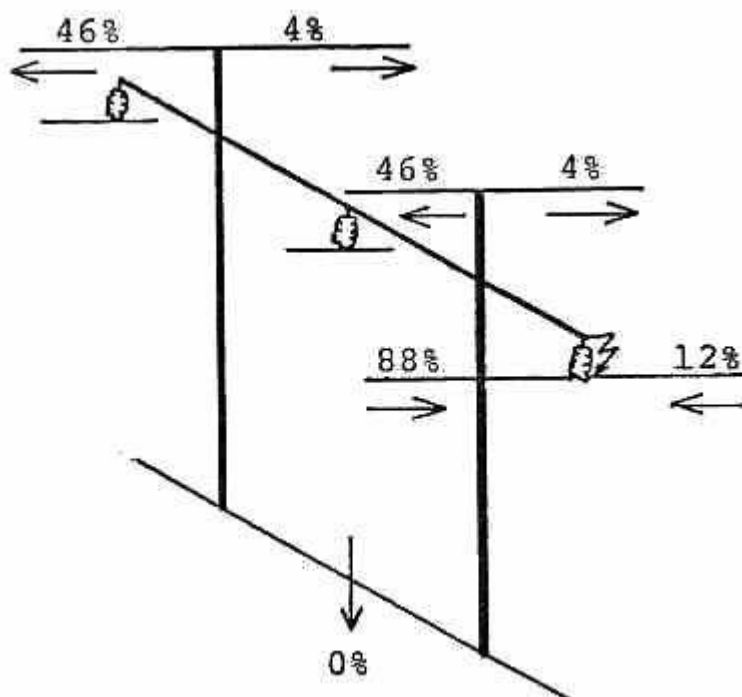
شکل 2-21: نحوه تغییر جریان سیم حفاظت از صاعقه به صورت تابعی از محل خطا

اثر مقاومت پایه برجها بر روی جریان سیم حفاظت از صاعقه به دور یا نزدیک بودن محل خطا از پستهای مجاور (بویژه پست A) بستگی دارد. با این حال، همانطور که بعداً نیز توضیح داده می‌شود، باید به دقت احتمال وجود مقادیر مختلفی از مقاومت‌های پایه برج و ترکیب‌های آنها در اطراف محل خطا در نظر گرفته شود و قضاوت‌های مهندسی بر مبنای آنها جهت تعیین جریان عبوری از سیم حفاظت از صاعقه صورت گیرد.

• خطاهای نزدیک به محل پست:

در شکل (2-22) توزیع جریان‌های خطا در سیم‌های حفاظت از صاعقه، هادی‌های فاز، برج و سیستم زمین بر اثر وقوع خطایی که به فاصله $1/61$ کیلومتری از پست A رخ داده است، نشان داده شده است. نتایج مشابهی برای وقوع خطا در برجهایی که به فاصله کمتر از این مقدار از نقطه A قرار گرفته‌اند، پیش‌بینی می‌گردد. برای استخراج این نتایج فرض شده است که از سیم حفاظت از صاعقه 7#8 AW (Alumo Weld) برای سیستم حفاظت از صاعقه استفاده گردیده و مقاومت پایه برج‌ها نیز برابر 20 اهم در نظر گرفته شده است. جریان‌ها به صورت درصدی از کل جریان خطا نشان داده شده‌اند. همانطور که نشان داده شده است از هر سیم حفاظت از صاعقه در نزدیکی نقطه A حدود 46 درصد از کل جریان خطا عبور می‌نماید (توجه نمایید که سیستم حفاظت از صاعقه سیستم مورد مطالعه از دو سیم حفاظتی تشکیل شده است).

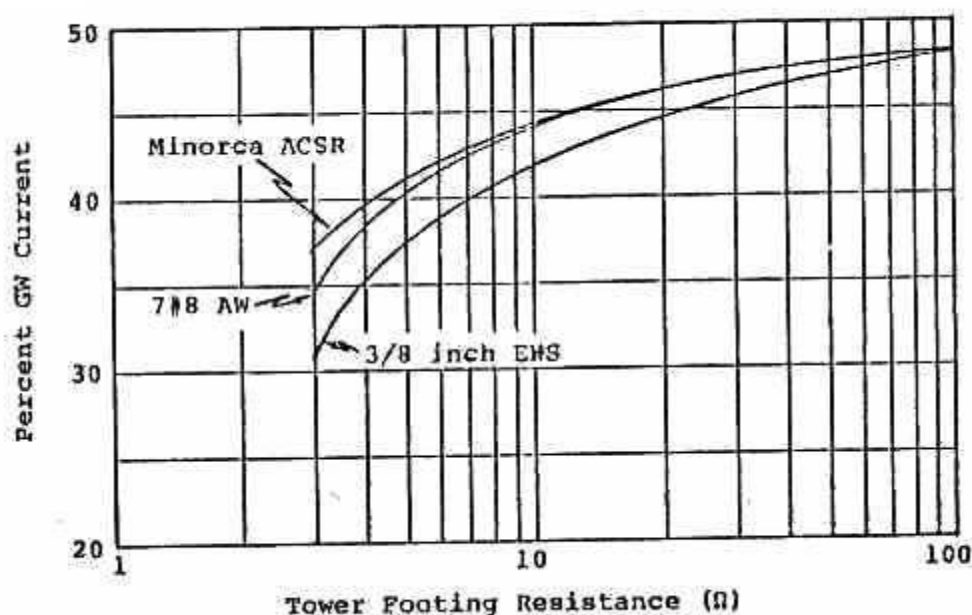




شکل 22-2: توزیع جریانهای خط در سیمهای حفاظت از صاعقه، هادیهای فاز، برج و سیستم زمین برج،
(خطا به فاصله 1/61 کیلومتر از ایستگاه A قرار گرفته است)

چنانچه مقادیر مقاومت پایه برج افزایش یابد بیشتر جریان خطا از طریق سیمهای حفاظت از صاعقه برقرار می گردد. شکل (2-23) اثر مقاومت پایه برج بر روی جریانهای عبوری از سه نوع سیم حفاظت از صاعقه مورد استفاده در سیستم مورد مطالعه را نشان می دهد. مقادیر جریان نشان داده شده بر حسب درصدی از کل جریان خطا و برای هریک از سیمهای حفاظت از صاعقه می باشند. محل خطا در فاصله 1/61 کیلومتری از پست A واقع شده است. نتایج نشان داده شده در شکل (2-23) در برگرنده نتایج نشان داده شده در شکل (2-22) نیز می باشد. در شکل (2-22) حداکثر جریان عبوری از هر سیم حفاظت از صاعقه برابر 46 درصد کل جریان خطا پیش بینی شده بود که این مقدار در شکل (2-23) به ازای سیم حفاظت از صاعقه 7#8 AW و مقاومت پایه برج 20 اهمی قابل استخراج می باشد.





شکل 2-23: جریان عبوری از سیم حفاظت از صاعقه به صورت تابعی از مقاومت پایه برج و به فاصله 1/61 کیلومتر از پست A

براساس نتایج نشان داده شده در شکل‌های (22-2) و (23-2)، نکات زیر قابل استخراج است:

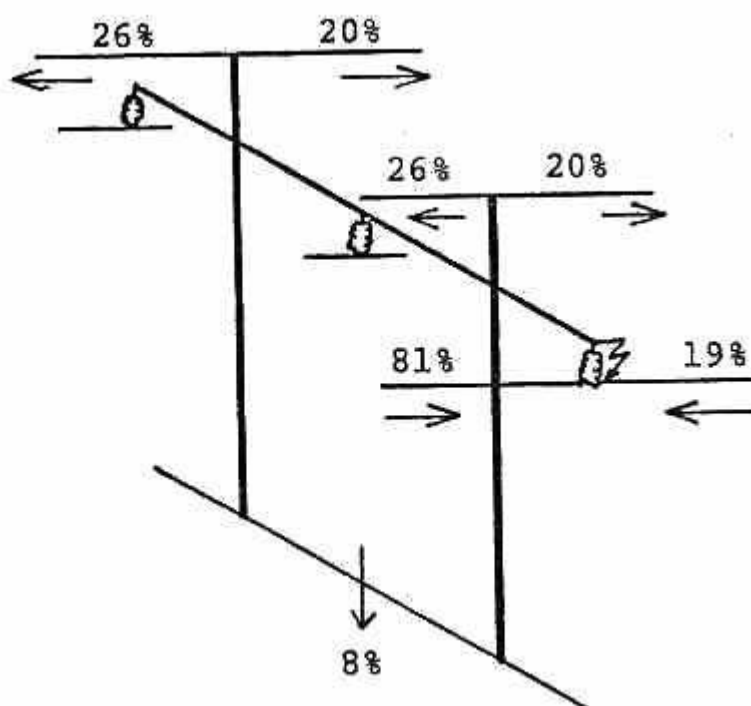
- برای خط‌های نزدیک به پستها (بویژه نقطه A) بیشتر جریان سیم حفاظتی از سیم‌های حفاظتی که مابین برج دچار خطا شده و نزدیکترین پست به محل خطا قرار دارند، عبور می‌نماید.
- برای سیم‌های حفاظتی از نوع ACSR و (ACS)AW جریان سیم حفاظتی بیشتر از نوع EHS می‌باشد. این اثر بویژه در مواقعی که مقاومت پایه برج کوچک می‌باشد بارزتر است.
- در مورد مقاومت‌های پایه برجی که اندازه آنها حدوداً بیش از 15 تا 20 اهم می‌باشد، بیشتر جریان خطا از طریق سیم‌های حفاظتی برقرار می‌شوند.

نتایج فوق مزیت کوچک بودن مقاومت پایه برج‌ها در نزدیکی پست‌ها را به خوبی نشان می‌دهد. به عنوان مثال در مورد سیستم مورد مطالعه کاهش مقاومت پایه برج از مقدار 20 اهم به مقدار 3 اهم، برای سیم حفاظتی $\frac{3}{8}$ اینچی نوع EHS، مقدار جریان عبوری از سیم حفاظتی را به اندازه حدود 30 درصد کاهش می‌دهد. این مسئله در هنگام انتخاب سطح مقطع سیم حفاظتی در مجاورت پستها می‌تواند مفید باشد.



• خطاهای دور از پست :

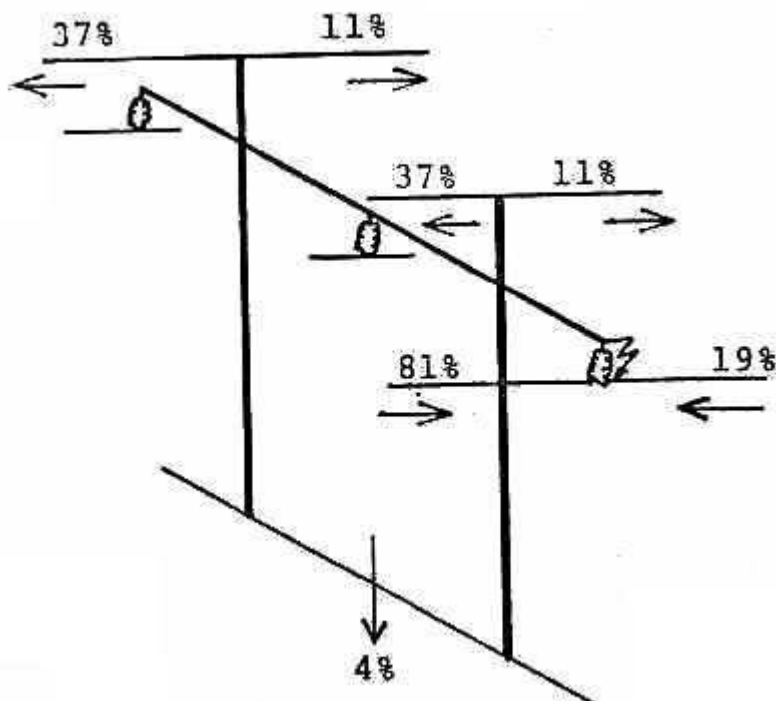
چنانچه محل خطا در فاصله دوردستی از پست قرار داشته باشد، جریان خطا در سیم‌های حفاظتی به نسبت یکسان‌تری تقسیم می‌شود. شکل (24-2) این وضعیت را برای سیستم مورد مطالعه به ازای سیم حفاظتی AW 7#8 و مقاومت پایه برج 20 اهمی نشان می‌دهد. شرایط مشابه وضعیت نشان داده شده در شکل (22-2) می‌باشد با این تفاوت که محل خطا در فاصله 16/1 کیلومتری از نقطه A واقع شده است. نتایج مشابهی برای خطاهایی که محل آنها در وسط خط قرار دارند، پیش‌بینی می‌گردد. مقایسه نتایج بدست آمده از دو تحلیل فوق (محل خطا در فاصله 1/61 و 16/1 کیلومتری از نقطه A) نشان می‌دهد که حداکثر جریان عبوری از هر سیم حفاظتی، بر مبنای درصدی از جریان کل، از 46 درصد به 26 درصد تقلیل می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که برای فواصلی که به اندازه کافی از پست فاصله دارند می‌توان از سیم حفاظتی با قابلیت عبور جریان کوچکتری استفاده نمود.



شکل 24-2: توزیع جریان‌های خطا در سیم‌های حفاظتی، هادی‌های فاز، برج و سیستم زمین برج
(خطا به فاصله 16/1 کیلومتری از پست A قرار گرفته است)

در تحلیل فوق مقاومت پایه برج‌ها یکسان و برابر 20 اهم فرض شده بود. اکنون وضعیتی را در نظر بگیرید که در آن کلیه مقاومت‌های پایه برج‌ها برابر 20 اهم هستند به جزء یک یا دو برج که دارای مقاومت پایه‌ای کوچکی هستند. بعنوان مثال اگر دو برج مجاور برج دچار خطا شده که در سمت پست A قرار دارند دارای مقاومت پایه‌ای برابر با 3 اهم باشند، وضعیت توزیع جریان خطا بصورت نشان داده شده در شکل (25-2) خواهد بود.

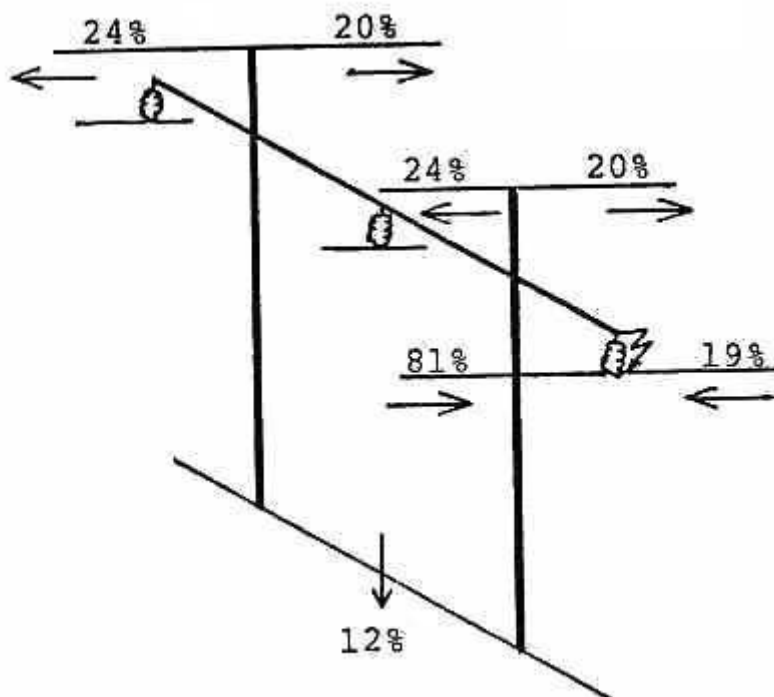




شکل 2-25: توزیع جریان خطا تحت شرایطی که دو برج مجاور برج خطا دیده‌ای که در سمت پست A قرار دارند دارای مقاومت پایه‌ای 3 اهم می‌باشند

محاسبات انجام گرفته نشان داده است که تحت چنین شرایطی حداکثر جریان عبوری از سیم حفاظتی اکنون برابر 37 درصد جریان کل خواهد بود. این مسئله کم اهمیت نمی‌باشد چرا که احتمال وجود چندین برج در طول خط انتقال که مقاومت پایه آنها بسیار کمتر از مقاومت پایه‌ای برجهای مجاورشان باشد، همواره وجود دارد. چنانچه نسبت مابین حداکثر مقاومت پایه برجها افزایش یابد، نسبت توزیع جریان بر روی اسپن مابین برج خطا دیده و برجهایی که مقاومت‌های پایه‌ای آنها کوچک است، افزایش می‌یابد. در مواقعی که مقاومت‌های پایه‌ای کلیه برجها کوچک باشد، توزیع جریان خطا باز هم متفاوت خواهد بود، به عنوان مثال در شکل (2-26) این وضعیت برای مقاومت‌های پایه‌ای برابر با 3 اهم نشان داده شده است. همانند قبل جریان در فاصله 16/1 کیلومتری نقطه A واقع شده است و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از سیم حفاظتی از نوع AW 7#8 انجام شده‌اند.





شکل 2-26: توزیع جریان خطا تحت شرایطی که کلیه برج‌ها دارای مقاومت پایه‌ای 3 اهمی هستند و خطا در فاصله 16/1 کیلومتری از نقطه A واقع شده است

در این حالت حداکثر جریان سیم حفاظتی برابر 24 درصد جریان خطای کل می‌باشد و این در حالی است که در وضعیت مشابهی مطابق شکل (2-24) برای خط‌هایی که در فاصله 1/61 کیلومتری ایستگاه A واقع شده‌اند مقدار جریان عبوری از هر سیم حفاظتی برابر 34 درصد کل جریان می‌باشد. حال این سوال پیش می‌آید که آیا وجود چندین برج با مقاومت پایه‌ای بزرگ می‌تواند جریان عبوری از سیم حفاظتی را تحت تاثیر قرار دهد، در حالیکه سایر برج‌ها دارای مقاومت پایه‌ای کوچکی هستند؟ پاسخ این سوال منفی می‌باشد، چرا که جریان خطا قبل از تقسیم شدن در شاخه‌های موازی تشکیل شده از برج‌هایی که مقاومت‌های پایه‌ای آنها کوچکتر است، تعداد اسپن بیشتری را طی خواهد نمود، اما حداکثر جریان در اسپن‌های مجاور با برج خطا دیده اساساً با مقادیر نشان داده شده در شکل (2-26) تفاوت چندانی نخواهد داشت.

نتایج فوق نشان می‌دهد که به ازای تقسیم نسبتاً یکسان جریان سیم حفاظتی در اسپن‌هایی که در مجاورت برج دچار خطا شده قرار دارند، مزایایی در خصوص ظرفیت مجاز جریان سیم‌های حفاظتی ممکن است حاصل گردد، در صورتی که مقاومت پایه برج‌ها در طول خط پایین باشد، حداکثر مقدار جریان سیم‌های حفاظتی 25 تا 30 درصد جریان خطا خواهد بود و در صورتی که برج‌هایی با مقاومت پایه‌ای کوچک به طور پراکنده در طول خطی که مقاومت‌های پایه اغلب برج‌های آن بزرگ است قرارداشته باشد، حداکثر مقدار جریان عبوری از هر سیم حفاظتی 35 تا 45 درصد کل جریان خطا پیش‌بینی می‌گردد.



- تقسیم جریان بین سیم‌های حفاظتی در یک اسپن :

در تحلیل‌های انجام گرفته قبلی، تقسیم جریان بین سیم‌های حفاظتی موجود در یک اسپن یکسان فرض شده بود. به عبارت دیگر مقاومتی از برج که ما بین هادی دچار خطا شده و سیم‌های حفاظتی قرار می‌گیرد یکسان در نظر گرفته شده است. اما در واقع به علت عدم تقارن پیش آمده در هنگام بروز خطا این مقاومت‌ها یکسان نمی‌باشد. در صورتی که مقاومت مسیرهای برقراری جریان خطا مابین هادی فاز دچار خطا شده و سیم‌های حفاظتی متفاوت باشد میزان جریان عبوری از دو سیم حفاظتی موجود در یک اسپن متفاوت خواهد بود. به عنوان نمونه در شرایط نادری ممکن است که یکی از سیم‌های حفاظتی، به دلایلی همچون فرسایش از بدنه برج ایزوله شده باشد، تحت چنین شرایطی کل جریانی که می‌بایستی از دو سیم حفاظتی عبور کرده از یک سیم حفاظتی عبور می‌نماید. این مسئله ممکن است موجب گرم شدن بیش از حد سیم حفاظتی مذکور گردیده و موجبات صدمه دیدن آن فراهم گردد. اما از آنجایی که تعداد مشکلات پدید آمده برای سیم‌های حفاظتی از این جهت بسیار محدود است لزومی به در نظر گرفتن این مقادیر نخواهد بود. با این حال از آنجایی که بدون تردید مسائل دیگری برای بروز اختلاف در مقاومت‌های مسیر برقراری جریان بین هادی فاز خطا دیده و سیم‌های حفاظتی وجود دارد، به نظر می‌رسد که استفاده از نسبت $\frac{55}{45}$ به جای نسبت $\frac{50}{50}$ برای سایر آثار ناشناخته دیگر مناسب باشد.

- جریان‌های خطا :

میزان ظرفیت مجاز عبور جریان از سیم حفاظتی به اندازه و مدت زمان جریان عبوری از سیم حفاظتی وابسته است. جریان خطا تابعی از مدت زمان رفع خطا، راکتانس سیستم و اثر سیستم تحریک واحدهای نیروگاهی می‌باشد. در این بین، مدت زمان رفع خطا دارای بیشترین تاثیر است چرا که آثار مشخصه دو پارامتر دیگر بوسیله این پارامتر دیکته می‌گردند. علاوه بر این میزان مولفه dc جریان خطا نیز حائز اهمیت می‌باشد.

• مدت زمان رفع خطا :

در سیستم‌های EHV مدت زمان رفع خطا می‌تواند محدوده‌ای از چند سیکل برای سیستم‌های حفاظتی اولیه، تا مقادیر بیشتری در حدود 15 تا 20 سیکل، برای سیستم‌های حفاظتی پشتیبان، به طول انجامد. در هنگام انتخاب مقطع سیم حفاظتی حداکثر مدت زمان رفع خطا می‌بایستی در نظر گرفته شود.

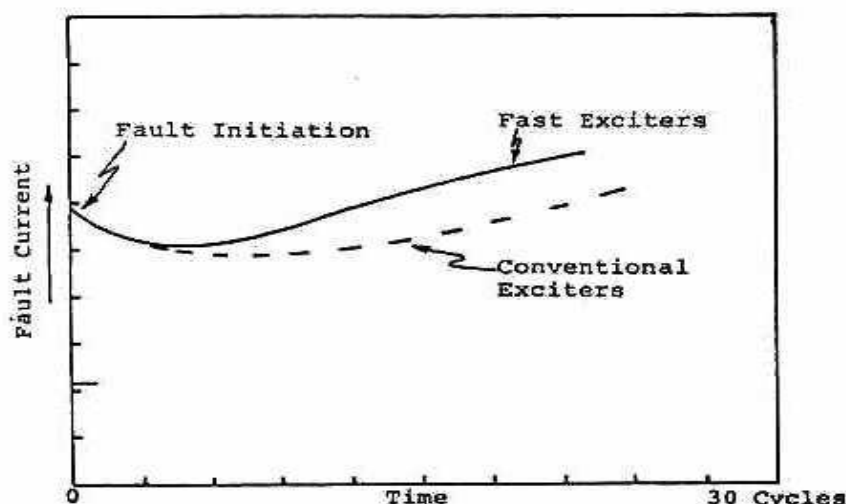
• راکتانس سیستم :

پس از وقوع اتصال کوتاه، راکتانس ژنراتور در طول زمان تغییر می‌کند. در چندین سیکل اولیه، راکتانس زیرگذاری ژنراتور، X_d'' نشان‌دهنده راکتانس ژنراتور می‌باشد. پس از چندین سیکل (بسته به ثابت زمانی ماشین)، راکتانس گذرای ژنراتور، X_d' را می‌توان برای نمایش راکتانس ژنراتور به کار برد. از جهت پیشینه تاریخی در هنگام انجام محاسبات سیم‌های حفاظتی، مدت زمان عملکرد سیستم‌های حفاظتی پشتیبان به عنوان مدت زمان رفع خطا، استفاده می‌شود و برای محاسبه جریان اتصال کوتاه از راکتانس گذرای ژنراتورها، X_d' ، استفاده می‌گردد. این تعریف ممکن است مقداری خطا را به دنبال داشته باشد چرا که در طی چندین سیکل اولیه خطا جریانه‌های بزرگتری به سیم‌های حفاظتی اعمال می‌گردد. با این حال، اگر ثابت زمانی ماشین کوچک باشد این خطا ناچیز خواهد بود.



• سیستم‌های تحریک سریع :

استفاده از سیستم‌های تحریک سریع در واحدهای نیروگاهی موجب پیچیده‌تر شدن مسئله شده است. در سیستم‌های تحریک قدیمی با وجود تغییر راکتانس ماشین در طی اتصال کوتاه، ولتاژ پشت راکتانس ماشین به سرعت تغییر نمی‌نمود اما استفاده از سیستم‌های تحریک سریع موجب افزایش سریع ولتاژ ژنراتور در مدت زمان کوتاهی شده و این مسئله افزایش قابل توجهی در جریان اتصال کوتاه را به همراه داشته است. این اثر در شکل (2-27) نشان داده شده است.



شکل 2-27: اثر سیستم تحریک بر روی میزان جریان خطا

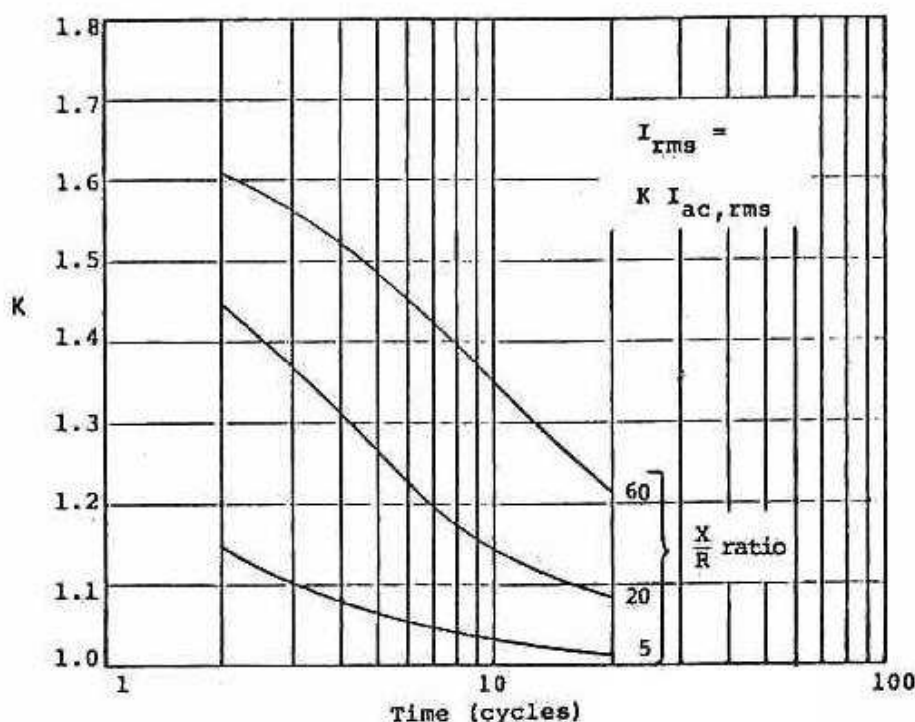
شکل (2-27) بر اساس مطالعات انجام گرفته با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی تهیه شده است. در این شکل دو منحنی نشان داده شده‌اند که منحنی پایینی نشان دهنده جریان خطا در هنگام استفاده از سیستم‌های تحریک متداول قدیمی می‌باشد و منحنی فوقانی نشان دهنده جریان خطا در هنگام استفاده از سیستم‌های تحریک سریع می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که سیستم‌های تحریک سریع به طور قابل ملاحظه‌ای جریان خطا و از این رو جریان عبوری از سیم‌های حفاظتی را افزایش می‌دهند.

بهترین روش برای تعیین میزان جریان موثر عبوری از سیم حفاظتی، اجرای شبیه‌سازی‌های دینامیکی سیستم در طی خطا و تعیین دقیق جریان خطا به صورت تابعی از زمان می‌باشد. با این حال براساس تحلیل RI^2 جریان خطا منطقی به نظر می‌رسد که به طور تقریبی برای ساده‌سازی محاسبات جریان خطا با استفاده از X_d'' برای نمایش راکتانس ژنراتورها، محاسبه گردد. این تعریف می‌بایستی منجر به جریان موثر نسبتاً نزدیکی به مقدار واقعی گردد.

• سهم مولفه dc جریان خطا :

جریان خطا می‌تواند دارای مقدار قابل توجهی مولفه dc باشد. میزان مولفه dc در نزدیکی نیروگاه‌ها زیاد است، اما با این وجود در صورت استفاده از سیم‌های حفاظتی با مقاومت بسیار پایین، ممکن است که این اثر در طول خط نیز قابل توجه باشد. سهم مولفه dc جریان اتصال کوتاه تابعی از نسبت X/R و لحظه وقوع اتصال کوتاه می‌باشد. تحلیل‌های قبلی نشان داد که برای خطاهای نزدیک پست بیشتر جریان خطای فرکانس قدرت از سیم‌های حفاظتی عبور می‌نماید. اگر چه که با دقت زیادی

بررسی نشده است اما براساس مقاومت در نظر گرفته شده در اطراف محل خطا و پست، به نظر می‌رسد منطقی باشد که فرض کنیم بیشتر مولفه dc هم از سیم‌های حفاظتی عبور می‌نماید. منحنی‌های نشان داده شده در شکل (2-28) نشان دهنده جریان موثر عبوری از سیم حفاظتی (جریان اعمال شده برای گرم شدن سیم حفاظتی) به صورت تابعی از نسبت X/R و مدت زمان تداوم خطا می‌باشند. می‌بایستی دقت نمود که اطلاعات بر مبنای وقوع اتصال کوتاه در بدترین زمان ممکن (زمانی که حداثر مولفه dc ظاهر می‌گردد) می‌باشند.



شکل 2-28: اثر مولفه dc جریان اتصال کوتاه بر روی جریان عبوری از سیم حفاظت از صاعقه

به عنوان مثال برای مدت زمان رفع خطای 10 سیکل و نسبت X/R برابر با 20، نتایج فوق نشان می‌دهند که مقدار مؤثر مولفه ac جریان خطا می‌بایستی در ضریب $1/15$ ضرب گردد تا جریان موثر گرم‌کننده‌ای که به سیم‌های حفاظتی اعمال می‌گردد، تعیین شود. این جریان در واقع میزان جریان موثری است که سهم مولفه‌های dc و ac را در گرم کردن سیم حفاظتی نشان می‌دهد.

- خلاصه و نتیجه‌گیری :

- پیشنهاد می‌شود که نیازمندی‌های سیم حفاظتی براساس زمان‌های رفع خطای تعیین شده بوسیله حفاظت پشتیبان تعیین گردد.
- اگر سیستم‌های تحریک سریع در نیروگاه‌ها استفاده نشده است، آنگاه مقدار X_d' ممکن است برای تعیین جریان خطا مورد استفاده قرار گیرد، اگر چه جریان خطای بزرگتری را در حین چند سیکل اولیه خطا می‌بایستی در نظر گرفت.
- اگر سیستم‌های تحریک سریع در نیروگاه‌ها استفاده شده‌اند، آنگاه شبیه‌سازی‌های دینامیکی دقیقی می‌بایستی برای تعیین جریان خطا مورد استفاده قرار گیرد. راه تقریبی و ساده‌تر دیگر این است که از مقدار راکتانس X_d'' ژنراتورها برای تعیین جریان خطا استفاده گردد.
- پیشنهاد می‌شود که اثر مولفه dc نیز برای خطاهای مجاور پست در نظر گرفته شود.

- در مجاورت پست بیشتر جریان خطا در سیم‌های حفاظت از صاعقه‌ای که در سمت پست قرار دارند جاری می‌شود، در صورت کوچک بودن مقاومت پایه برج‌ها (در حدود 3 اهم)، از هر سیم حفاظت از صاعقه در حدود 30 الی 40 درصد کل جریان خطا (با فرض وجود دو سیم حفاظت از صاعقه) عبور می‌کند و در صورت بزرگ بودن مقاومت پایه برج‌ها (در حدود 20 الی 30 اهم)، از هر سیم حفاظت از صاعقه در حدود 45 تا 48 درصد کل جریان خطا (با فرض وجود دو سیم حفاظت از صاعقه) عبور می‌کند.
- برای خطاهایی که در فاصله دوری از پست اتفاق می‌افتد، حداکثر جریان عبوری از هر سیم حفاظتی حدود 40 درصد کل جریان خطا (با فرض وجود دو سیم حفاظت از صاعقه) خواهد بود.
- از آنجائی که جریان عبوری از سیم‌های حفاظت از صاعقه در نزدیکی پست با مقدار آن در فواصل دورتر متفاوت است می‌توان با انجام تحلیل‌های مناسب از دو سایز مختلف برای سیم‌های حفاظت از صاعقه مجاور پست و فواصل دورتر استفاده نمود و هزینه‌های سیستم حفاظت از صاعقه را کاهش داد. این مسئله بویژه در مورد خطوط انتقال طولانی می‌تواند مقرون به صرفه باشد. جهت انجام تحلیل‌ها می‌توان از روش‌های ارائه شده در مقالات معتبری همچون مراجع [20-22] و مراجع مندرج در آنها استفاده نمود.

2-3-2- تعیین میزان ظرفیت عبور جریان از سیم‌های حفاظت از صاعقه:

در صورت عبور جریان صاعقه و جریان‌های اتصال کوتاه از سیم‌های حفاظت از صاعقه، تلفات اهمی RI^2 موجب گرم شدن مواد تشکیل دهنده سیم‌های حفاظت از صاعقه می‌گردد. بسته به مواد تشکیل دهنده این سیم‌ها، مقدار افزایش دما اگر از حد معینی فراتر رود موجب صدمه دیدگی سیم‌های حفاظت از صاعقه شده و استقامت مکانیکی آنها را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین، هدف از محاسبات ظرفیت عبور جریان از سیم‌های حفاظت از صاعقه تعیین مقدار مجاز جریانی است که تحت شرایط مشخصی (درجه حرارت اولیه، درجه حرارت نهایی، مدت زمان اتصالی و...) می‌تواند از سیم‌های حفاظت از صاعقه عبور نماید بدون اینکه موجب آسیب دیدن و یا کاهش استقامت مکانیکی آنها گردد. ظرفیت عبور جریان سیم‌های حفاظت از صاعقه تابع عوامل مختلفی همچون: مقاومت مخصوص، جرم، گرمای ویژه¹، چگالی و ضریب حرارتی مقاومت هادی‌ها می‌باشد. علاوه بر این، مقدار این ظرفیت تابع درجه حرارت‌های اولیه و نهایی هادی‌ها نیز می‌باشد. با استفاده از معادله مشخصه زیر می‌توان ظرفیت مجاز جریان عبوری از سیم‌های حفاظت از صاعقه را تعیین نمود [20]:

$$I = \sqrt{\frac{JA^2 D S \ln(1 + \alpha(\varphi - \varphi_0))}{\rho \alpha t \times 10^4}} \quad (43-2)$$

که در آن:

I: مقدار موثر جریان سیم محافظ بر حسب آمپر

ρ : مقاومت مخصوص سیم محافظ بر حسب اهم - سانتیمتر

J: مقدار ثابتی برابر با 4/185 بر حسب ژول بر کالری

A: سطح مقطع سیم محافظ بر حسب میلی‌متر مربع



1. Specific heat

S : گرمای ویژه بر حسب کالری بر گرم بر درجه سانتی گراد

D : چگالی سیم محافظ بر حسب گرم بر سانتیمترمکعب

α : ضریب حرارتی مقاومت سیم محافظ بر حسب عکس درجه سانتیگراد

t : مدت زمان اتصال کوتاه بر حسب ثانیه

ϕ_0 : درجه حرارت اولیه سیم محافظ بر حسب درجه سانتیگراد

ϕ : درجه حرارت نهایی سیم محافظ بر حسب درجه سانتیگراد

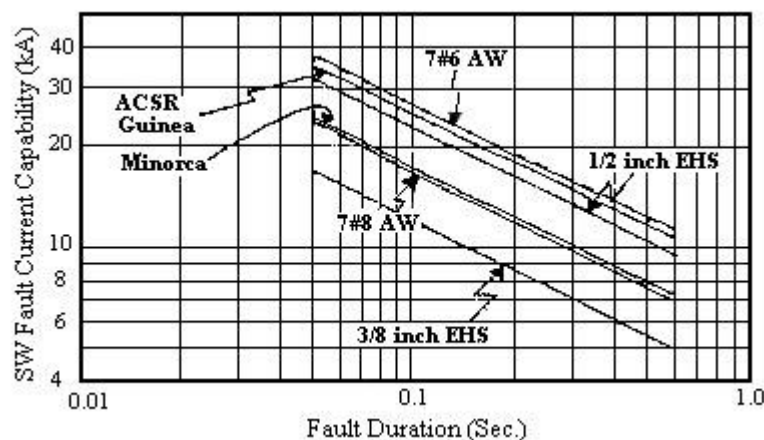
در استخراج رابطه فوق فرضیات زیر در نظر گرفته شده است :

- طول هادی بی نهایت فرض شده است.
- میزان تشعشعات حرارتی ناچیز فرض شده است.
- گرمای ویژه در گستره حرارتی مورد نظر ثابت فرض شده است.
- مقاومت به صورت تابعی از درجه حرارت در نظر گرفته شده است.

چنانچه اثر وابستگی گرمای ویژه به درجه حرارت در نظر گرفته شود، معادله مورد نیاز برای محاسبه جریان مجاز عبوری از سیم محافظ بسیار پیچیده می گردد. با این حال، تحقیقات نشان داده است که در صورتی که گرمای ویژه به صورت تابعی از درجه حرارت در نظر گرفته شود، میزان جریان مجازی که تحت چنین شرایطی برای یک سیم حفاظتی معین تعیین می شود بیش از میزان جریان مجازی خواهد بود که بوسیله رابطه (2-43) برای همان سیم بدست می آید. بنابراین، میزان جریان مجاز تعیین شده بوسیله رابطه (2-43) مقداری محافظه کارانه خواهد بود.

رابطه (2-43) برای برخی از انواع سیم های محافظ متداول مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج حاصل از آن در شکل (2-29) نشان داده شده است. در جدول (2-1) نیز مقادیر نوعی برای پارامترهای مورد استفاده در رابطه (2-43) پیشنهاد شده است و در استخراج نتایج شکل (2-29) نیز از این مقادیر استفاده شده است [20 و 23].





شکل 29-2: ظرفیت عبور جریان از سیم محافظ بر حسب مدت زمان خطا برای برخی از سیم‌های محافظ متداول

جدول (1-2)-مقادیر نمونه‌ای پیشنهاد شده برای پارامترهای مورد استفاده در رابطه (2-43)

نوع سیم حفاظت از صاعقه			واحد	پارامتر
ACSR	EHS	AW(ACS)		
$2/87 * 10^{-6}$	$15/9 * 10^{-6}$	$8/53 * 10^{-6}$	Ohm-cm	ρ
0/0040	0/0035	0/0036	$\frac{1}{^{\circ}C}$	α
200	400	400	$^{\circ}C$	ϕ
40	40	40	$^{\circ}C$	ϕ_0
2/70	7/86	6/66	$\frac{gram}{cm^3}$	D
0/210	0/118	0/118	$\frac{Cal}{gram / ^{\circ}C}$	S

پارامترهای نمونه‌ای ارائه شده در جدول (1-2) بر مبنای اطلاعات تجربی ارائه شده در مرجع [23] و براساس کاتالوگ‌های سازندگان سیم‌های محافظ تهیه شده‌اند [20]. اطلاعات سیم‌های محافظ از نوع EHS اساساً همان اطلاعاتی هستند که برای فولاد استفاده می‌شود. در اطلاعات پیشنهاد شده برای سیم‌های محافظ هوایی از نوع AW (ACS) اثر هر دوماه آلومینیوم و فولاد لحاظ شده است و در نهایت اطلاعات ارائه شده برای سیم‌های محافظ از نوع ACSR بر مبنای اطلاعات آلومینیوم می‌باشد چرا که هسته فولادی در پدیده گرم شدن سیم حفاظتی نقش ناچیزی را برعهده دارد.

برای سیم‌های حفاظتی از نوع EHS حداکثر دمای کاری برابر 400 درجه سانتیگراد انتخاب شده است، چرا که فراتر از این درجه حرارت، امکان ذوب شدن روکش روی قرارداد شده بر روی مفتولها وجود دارد. در تحقیقات انجام شده در مرجع [23]، حداکثر درجه حرارت کاری 400 و 200 درجه سانتیگراد به ترتیب برای سیم‌های محافظ از نوع AW و ACSR انتخاب شده است. این مقادیر به این جهت انتخاب شده‌اند که در درجه حرارتهای فراتر از این مقادیر هادی‌ها استقامت مکانیکی خود را از دست می‌دهند.

چنانچه جریان اتصالی که انتظار می‌رود از سیم حفاظتی عبور نماید مشخص باشد، با استفاده از رابطه (2-43) می‌توان سطح مقطع سیم حفاظتی را از دیدگاه ظرفیت عبور جریان‌های خط تعیین نمود. برای منظور می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$A_{SC} = 100I \sqrt{\frac{\rho \alpha t}{JDS \ln(1 + \alpha(\phi - \phi_0))}} \quad (44-2)$$

که در آن کلیه پارامترها همانند قبل تعریف می‌شوند و A_{SC} سطح مقطع مطلوب از دیدگاه ظرفیت عبور جریان اتصال کوتاه می‌باشد. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد در برخی موارد ممکن است سطح مقطع سیم حفاظتی متأثر از جریان‌های صاعقه نیز باشد، بنابراین سطح مقطع سیم حفاظت از صاعقه می‌بایستی از این دیدگاه نیز کنترل شود. برای این منظور معادله زیر می‌بایستی برای حداکثر صاعقه‌های مورد پیش‌بینی در طول مسیر خط انتقال همواره برقرار باشد:

$$K^2 \int_0^t I_L^2(t) dt < \frac{J A_L^2 D S \ln(1 + \alpha(\phi - \phi_0))}{\rho \alpha \times 10^4} \quad (45-2)$$

که در آن پارامترها همانند قبل تعریف می‌شوند و A_L حداقل سطح مقطع سیم حفاظتی از دیدگاه ظرفیت عبور جریان صاعقه می‌باشد. در عبارت سمت چپ $I_L(t)$ تابع زمانی شکل موج صاعقه می‌باشد که به صورت پارامتری بر حسب زمان و واحد آمپر بیان می‌گردد. مقدار انتگرال عبارت سمت چپ معادله (2-45) برای صاعقه‌ها یک کمیت آماری است و حداکثر میزان مشاهده شده برای این کمیت در حدود $10^6 \sim 10^7 A^2 \cdot Sec$ (با احتمال مشاهده‌ای کمتر از یک درصد) می‌باشد. K پارامتری است که نحوه تقسیم جریان صاعقه در سیم یا سیم‌های حفاظتی را نشان می‌دهد. اکثر صاعقه‌های برخورد کننده به خط انتقال، به برج اصابت می‌کنند (حدود 60 درصد) و جریان ناشی از برخورد صاعقه در طول سیم‌های محافظ و بخشی نیز از طریق بدنه برج و مقاومت زمین آن تخلیه می‌گردد که سهم هر کدام به امپدانس موجی سیم‌های محافظ، برج‌ها و مقاومت پایه بستگی دارد. در این حالت عموماً مقدار K کوچکتر از 0/5 می‌باشد. بویژه اگر در سیستم حفاظت از صاعقه از دو سیم حفاظتی استفاده شده باشد در حدود 40 درصد صاعقه‌های برخوردی دیگر نیز در حد فاصل مابین برج‌ها به سیم‌های حفاظتی اصابت می‌کنند که تحت چنین شرایطی، جریان صاعقه به نسبت یکسان مابین دو قسمت سیم حفاظتی مورد اصابت قرار گرفته تقسیم می‌شود، تحت چنین شرایطی مقدار K برابر 0/5 خواهد بود.

چنانچه بدترین حالت ممکنه را در نظر بگیریم (یعنی $K = 0/5$ و مقدار $10^7 A^2 \cdot Sec$ برای صاعقه) سطح مقطع مطلوب سیم‌های حفاظت از صاعقه بر مبنای جریان‌های صاعقه از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$A_L > \sqrt{\frac{2.5 \times 10^{10} \times \rho \alpha}{JDS \ln(1 + \alpha(\phi - \phi_0))}} \quad (46-2)$$

چنانچه پارامترهای نوعی پیشنهاد شده از جدول (2-1) در رابطه (2-46) جاگذاری شوند، حداقل مقدار سطح مقطع سیم‌های حفاظتی از نوع ACS(AW)، EHS و ACSR از دیدگاه ظرفیت عبور جریان صاعقه به صورت زیر استخراج می‌گردند:

- برای سیم‌های حفاظتی از نوع ACS(AW): $A_L > 17 \text{ mm}^2$
- برای سیم‌های حفاظتی از نوع EHS: $A_L > 21 \text{ mm}^2$
- برای سیم‌های حفاظتی از نوع ACSR: $A_L > 16 \text{ mm}^2$



بدیهی است که سطح مقطع نهایی یک سطح مقطع استاندارد می باشد که براساس بزرگترین مقدار استخراج شده برای A_{SC} و A_L انتخاب می گردد.

برای انتخاب مقطع مناسب در شرایط اتصال کوتاه و صاعقه جهت سیم های حفاظت از صاعقه OPGW می توان سطح مقطع زره یا سطح مقطع سیم های فولادی روکش آلومینیوم و یا آلیاژ آلومینیوم، که برابر سطح مقطع کل منهای سطح مقطع واحدهای نوری و مواد پرکننده می باشد را مشابه روش فوق محاسبه نمود. برای اینکار می توان از اطلاعات ارائه شده در جدول (2-1) جهت محاسبه سطح مقطع مناسب سیم های حفاظت از صاعقه OPGW بهره برد. حداکثر درجه حرارت مجاز سیم های حفاظتی OPGW می بایستی بر اساس مقادیر ارائه شده از سوی سازنده انتخاب گردد. انتخاب نامناسب حداکثر درجه حرارت مجاز سیم های حفاظتی OPGW ممکن است موجب صدمه دیدن واحدهای فیبرنوری جاسازی شده در این سیم ها گردد و علاوه بر آن ممکن است استقامت مکانیکی این قبیل سیم های حفاظتی را نیز کاهش دهد. به عنوان مثال حداکثر درجه حرارت مجاز سیم های حفاظتی OPGW با بافر سیلیکونی برابر 300 درجه سانتیگراد و با بافر آکریلیک برابر 180 درجه سانتیگراد در نظر گرفته می شود [24].

توجه :

در مورد سیم های حفاظتی که از چندین ماده مختلف تشکیل شده اند (مانند ACSR و OPGW) به علت تغییرات متفاوت مقاومت هر بخش تشکیل دهنده سیم حفاظتی در اثر حرارت ایجاد شده بواسطه عبور جریانهای اتصال کوتاه یا صاعقه، ممکن است که تقریبهای بکار رفته جهت استخراج روابط حاکم بر ظرفیت مجاز عبور جریان سیم های حفاظتی در پاره ای از موارد منجر به نتایجی گردند که از لحاظ فنی و اقتصادی توجیه ناپذیر نباشد. براین اساس پیشنهاد می گردد که سطح مقطع نهایی براساس مشخصات فنی ارائه شده از سوی سازنده سیم حفاظتی انتخاب گردد. این مسئله بویژه در مورد سیم های حفاظتی OPGW که تعداد مواد بکار رفته در آن نسبت به سیم های حفاظتی معمولی بالاتر و حساسیت آن به درجه حرارت نهایی بیشتر است (به علت وجود واحدهای فیبرنوری مستقر در این قبیل سیم های حفاظت از صاعقه) از اهمیت افزونتری برخوردار است.

2-4- مشخصات سیم حفاظت از صاعقه از دیدگاه مکانیکی

در برخی موارد محاسبات مکانیکی می تواند عامل تعیین کننده مشخصات سیم حفاظت از صاعقه باشد. محاسبات مکانیکی مربوط به سیم های حفاظت از صاعقه شامل تعیین نیروهای وارد بر سیم ها، کشش و فلش آنها می باشد. واضح است که انتخاب سیم های حفاظتی خطوط انتقال از نظر مکانیکی و میزان کشش و وزن آنها در محاسبات مربوط به دکلها و انتخاب نوع آنها نیز مؤثر می باشد. به طور کلی یک خط از نظر مکانیکی باید چنان طرح گردد که بتواند بدترین حالات محتمل را تحمل کند اما نه بدترین حالات ممکن را، دلیل این امر آن است که هزینه خط ممکن است بیش از اندازه گران تمام شود لذا مسائل اقتصادی را در این طراحی می بایستی در نظر گرفت.

شرایط بارگذاری برای سیم محافظ معمولاً همان شرایط انتخاب شده برای هادی های فاز در مناطق مختلف بارگذاری می باشد، با این تفاوت که علاوه بر رعایت ضرایب اطمینان مجاز برای هر حالت خاص بارگذاری، لازم است حداقل فاصله هوایی و زاویه حفاظت مورد نیاز بین سیم محافظ و هادی های فاز در وسط اسپین و در بدترین حالت بارگذاری کنترل گردد.

چون سیم محافظ نسبت به هادی های فاز وزن واحد طول کمتر و ماکزیمم مقاومت کششی بیشتری دارد فلش آن تحت بارگذاری یکسان کمتر خواهد شد و چون فلش کم است در هوای سرد که سیم انقباض پیدا می کند در مناطق کوهستانی ممکن

است نیروی بالا برنده ایجاد شود. بنابراین سیم محافظ را معمولاً شل تر می‌کشند. با این کار مسئله نیروی بالا برنده تقریباً حل می‌شود و در طراحی راحت تر می‌توان محل برجها را روی پروفیل طراحی انتخاب کرد چرا که اگر فلش کم باشد و در بیشتر نقاط نیروی بالا برنده داشته باشیم باید اسپن ها را کوتاهتر و پایه ها را بلندتر انتخاب کنیم تا نیروی بالا برنده نداشته باشیم و همچنین باشل تر گرفتن سیم های محافظ نیروی کشش کمتر می‌شود و می‌توان قسمتهایی از پایه را که سیم محافظ به آنها وصل می‌شود، ضعیف تر طراحی کرد. البته می‌بایستی توجه نمود که فلش کم دارای این مزیت است که حفاظت از هادی های فاز بهبود می‌یابد و هادی های فاز در مقابل صاعقه مصونیت بیشتری پیدا می‌کنند. از طرفی مسئله گالوپینگ (جدا شدن یخ بصورت یکپارچه از روی سیم های محافظ یا هادی های فاز و ایجاد نوسانهای عمودی) را نیز می‌بایستی در نظر گرفت.

در طراحی خطوط انتقال باید در تمامی شرایط جوی منطقه مورد نظر کشش و فلش محاسبه شوند. سیم های محافظ تحت تاثیر پدیده های خارجی مختلفی قرار می‌گیرند و کشش و فلش آنها با درجه حرارت و نیروی باد و یخ تغییر می‌کند. بعنوان مثال کاهش درجه حرارت باعث کم شدن طول سیم و در نتیجه افزایش کشش می‌گردد و افزایش درجه حرارت باعث ازدیاد طول سیم و در نتیجه افزایش فلش سیم می‌شود و باد و یخ نیز سبب اضافه شدن کشش سیم می‌شوند. در عمل، سیم کشی ابتدا روی قرقره انجام می‌گیرد و پس از تنظیم فلش سیم به کلمپ بسته می‌شود و پس از سیم کشی باید مطمئن بود که:

- فاصله سیم محافظ هوایی از سیم هادی در بدترین شرایط بارگذاری از حد مجاز کمتر نشود.

- کشش در سخت ترین شرایط با ضریب اطمینان لازم از مقدار مجاز بیشتر نشود.

از این رو کشش در موقع نصب باید مقدار صحیحی داشته باشد و طوری انتخاب شود که در بدترین شرایط مقادیر کشش و فلش سیم از مقادیر مجاز تجاوز نمایند.

فاصله سیم محافظ و هادی های فاز روی برجهای مختلف باید طوری انتخاب شود که فاصله سیم محافظ با سیم هادی در وسط اسپن باتوجه به متفاوت بودن فلش این دو سیم در حالات مختلف بارگذاری و شرایط کاری سیستم کمتر از مقدار مجاز نباشد. این مسئله در اسپنهای بزرگتر از اسپن معادل و بخصوص در حالت بارگذاری نامتعادل اهمیت داشته و لازم به کنترل است. حالت بارگیری نامتعادل سیم محافظ و هادی های فاز از این نظر محتمل است که هادی های فاز به جهت عبور جریان الکتریکی از آنها گرمتر از سیم محافظ بوده و لذا بار یخ آن زودتر آب شده و می‌افتد. بعضی از طراحان خطوط انتقال رعایت 80 درصد فلش هادی های فاز را برای سیم محافظ در حالت بارگذاری معمول (EDS)¹، جهت کنترل فاصله هوایی در وسط اسپن، کافی می‌دانند. ولی باتوجه به مطالبی که در این بخش توضیح داده شد این شرط در همه موارد بخصوص در مناطق بارگذاری سنگین و فوق سنگین کافی نبوده و توصیه می‌شود که جهت کنترل فاصله کلیه حالات بارگذاری که احتمال کاهش قابل توجه فاصله مابین سیم حفاظت از صاعقه و هادی های فاز وجود دارد مورد بررسی قرار گیرند.



1 Every day stress

نیازمندیها و آزمونها



مقدمه

در این فصل نحوه انجام آزمونهای سیمهای حفاظتی مورد استفاده در سیستم حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو جهت اطمینان از عملکرد صحیح و مورد انتظار آنها تشریح می گردد.

3-1- سیمهای حفاظتی معمولی

آزمونهای سیمهای حفاظتی معمولی همچون: ACS (AW)، GS (HS و EHS) و ACSR شامل آزمونهای نوعی و نمونه ای به شرح ذیل می باشند:

آزمونهای نوعی¹ شامل:

- آزمون اتصالات در رشته های آلومینیومی
- آزمون منحنی های تنش - کرنش بر روی هادی
- آزمون نیروی گسیختگی هادی

آزمونهای نمونه ای² شامل:

- آزمونهای کشش بر روی مفتولهای آلومینیومی و فولادی
- آزمون پیچش مفتولهای آلومینیومی
- آزمون مقاومت الکتریکی مفتولهای آلومینیومی
- آزمون تنش در یک درصد افزایش طول روی مفتولهای فولادی
- آزمون خاصیت لوله شدن روی مفتولهای فولادی
- آزمون پوشش فلز روی در مفتولهای فولادی
- اندازه گیری سطح مقطع هادی
- اندازه گیری قطر نهایی هادی
- اندازه گیری جرم در واحد طول هادی (چگالی خطی)
- آزمون گسیختگی رشته های آلومینیومی و فولادی پس از تابیده شدن
- آزمون وضعیت سطح هادی
- آزمون نسبت لایه و جهت لایه هادی

توجه:

از آنجایی که رویه انجام آزمونهای فوق مشابه روشهای بکار گرفته شده برای سایر هادی های خطوط انتقال می باشد، از ارائه آزمونها در این بخش صرف نظر گردیده و تنها آزمونهای مربوط به سیمهای حفاظتی مبتنی بر تکنولوژی فیبر نوری (OPGW) در

1.Type test
2. Sample test



این فصل ارائه می‌گردد. جهت انجام آزمونهای سیم‌های حفاظتی معمولی می‌توان از گزارش "هادی‌های خطوط انتقال نیرو" از مجموعه حاضر استفاده نمود.

2-3- سیم‌های حفاظتی مبتنی بر تکنولوژی فیبر نوری (OPGW)

در این بخش نیازمندیهای الکتریکی، مکانیکی و نوری و روشهای آزمون سیم‌های حفاظتی مبتنی بر تکنولوژی فیبر نوری (OPGW) ارائه می‌گردد.

3-2-1- تعاریف

- سیم محافظ هوایی مبتنی بر تکنولوژی فیبر نوری (OPGW)

سیم حفاظتی که علاوه بر وظیفه حفاظت خطوط انتقال در مقابل اثرات ناشی از برخورد صاعقه، وظیفه انتقال سیگنالهای مخابراتی را نیز بر عهده دارد. این سیگنالهای مخابراتی از طریق فیبر نوری داخل هادی OPGW منتقل می‌گردد.

- واحد نوری¹

بخشی از هادی OPGW که از فیبرهای نوری و مواد محافظت‌کننده آنها تشکیل شده‌است. مواد محافظت‌کننده ممکن است که از جنس مواد فلزی یا غیرفلزی و یا هر دو تشکیل شده باشد. این مواد می‌توانند قسمتی از بخشهای تحمل‌کننده نیروهای مکانیکی و بخشهای حامل جریان الکتریکی OPGW نیز باشند.

- حداکثر کشش مجاز (MAT)²

حداکثر کشش مورد انتظار در بدترین شرایط بارگذاری یا هر مقدار مشخص دیگر، حداکثر کشش مجاز نامیده می‌شود.

- استقامت کششی نامی (RTS)³

مقدار نیروی کششی محاسبه‌شده‌ای که هادی OPGW را در آستانه پارگی قرار می‌دهد، استقامت کششی نامی نامیده می‌شود.

- حد کشیدگی⁴

حداکثر کشیدگی است که هادی OPGW می‌تواند بدون افزایش طول⁵ در فیبرهای نوری متحمل شود.

- حداکثر میزان مجاز بیضویت (MAOC)⁶

این پارامتر نشان‌دهنده حداکثر میزان بیضویت مجاز در یک هادی OPGW یا المانهای آن بوده که توسط سازنده تعیین می‌شود.

1. Optical unit

2. Max. Allowable Tension

3. Rated Tensile Strength

4. Strain Margin

5. Longitudinal

6. Max. Allowable ovality



3-2-2- OPGW آزمونهای

3-2-2-1- طبقه‌بندی آزمونها

- آزمونهای نوعی:

آزمونهای نوعی به منظور تحقیق اصول پایه‌ای طراحی انجام می‌گیرند. تکرار این قبیل آزمونها یا انتخاب آنها تنها در صورتی مورد نیاز خواهد بود که تغییراتی در واحد نوری یا مواد استفاده شده در OPGW صورت گرفته باشد. موارد و مراحل آزمون واقعی که می‌بایستی انجام گیرد و معیارهای پذیرش برای هر آزمون می‌بایستی براساس توافق حاصل شده بین خریدار و سازنده تعیین گردد. آزمونهای نوعی می‌بایستی تنها بر روی آن دسته از OPGW ها که کلیه نیازمندیهای آزمونهای نمونه‌ای مربوطه را برآورده ساخته‌اند انجام گیرند.

- آزمونهای نمونه‌ای:

آزمونهای نمونه‌ای به منظور تضمین کیفیت OPGW و مطابقت آن با نیازمندیهای این بخش از استاندارد انجام می‌شوند.

3-2-2-2- آزمونهای مورد نیاز:

- آزمونهای نوعی:

- برروی فیبرهای نوری

آزمونهای نوعی که بر روی فیبرهای نوری به عمل می‌آیند بایستی مطابق با روشهای آزمون ارائه شده در استاندارد IEC شماره 60793 باشند.

• برروی OPGW کامل

این آزمونها عبارتند از:

الف) آزمون تنش - کرنش¹

ب) آزمون کشش²

ج) آزمون قرقره³

د) آزمون آئولین⁴

هـ) آزمون گالوپینگ⁵

و) آزمون پیری⁶

ز) آزمون چرخه حرارتی⁷

-
1. Stress- strain test
 2. Tensile test
 3. Sheave test
 4. Aeolian test
 5. Galloping test
 6. Creep test
 7. Temperature cycling test



(ح) آزمون نفوذ آب¹

(ط) آزمون اتصال کوتاه²

(ی) آزمون صاعقه³

- آزمونهای نمونه‌ای :

• بر روی فیبرهای نوری

اندازه‌گیری‌های تضعیف نوری فیبر⁴ می‌بایستی مطابق با یکی از روشهای ارائه شده در استاندارد IEC شماره 4-1-60793 انجام گیرند.

نرخ نمونه‌برداری می‌بایستی 100 درصد باشد.

برای سایر مشخصه‌های فیبر، نرخ‌های نمونه‌برداری می‌بایستی مطابق با توافق سازنده و خریدار تعیین گردند.

• بر روی واحد نوری

این آزمونها عبارتند از:

(الف) آزمون ابعادی

(ب) آزمون استقامت کششی و ازدیاد طول

(ج) آزمون مقاومت الکتریکی

توجه :

آزمون استقامت کششی و ازدیاد طول و آزمون مقاومت الکتریکی تنها در صورتی که واحد نوری در محاسبات انجام گرفته برای مقادیر RTS و مقاومت OPGW کامل، در نظر گرفته شده باشد انجام می‌شوند.

نرخ نمونه‌برداری برای این آزمونها 10 درصد می‌باشد.

در پیوست (1-3) روشهایی برای محاسبه استقامت کششی نامی، سطح مقطع لایه‌های متشکل از مفتولهایی که به شکل قطاعی هستند، مدول الاستیسیته، ضریب انبساط خطی و مقاومت dc ارائه شده است.

• بر روی مفتولها قبل از بافته شدن :

این آزمونها عبارتند از:

(الف) مطابق استاندارد IEC شماره 60104 برای مفتولهای آلیاژ آلومینیوم - سیلیکون - منیزیم.

(ب) مطابق استاندارد IEC شماره 60888 برای مفتولهای فولادی با روکش روی.

(ج) مطابق استاندارد IEC شماره 60889 برای مفتولهای آلومینیومی.

(د) مطابق استاندارد IEC شماره 61232 برای مفتولهای فولادی روکش شده با آلومینیوم.

نرخ نمونه‌برداری برای این آزمونها می‌بایستی 10 درصد باشد.

1. Water penetration test

2. Short circuit test

3. Lightning test

4. Fibre optical attenuation measurements



• بر روی OPGW کامل :

OPGW کامل می بایستی نیازمندیهای ارائه شده در بند (2-2-6) استاندارد IEC شماره 61089 را برآورده نماید. نرخ نمونه برداری برای این آزمونها برابر 10 درصد است.

3-2-2-3- بازرسی¹

بازرسی آزمونها می بایستی مطابق با نیازمندیهای بخش (7-6) استاندارد IEC شماره 61089 صورت گیرد.

3-2-3- نیازمندیهای آزمون

3-2-3-1- آزمون تنش - کرنش

آزمونهای تنش - کرنش می بایستی به منظور تعیین رفتار مکانیکی OPGW و قتیکه بار کششی به آن اعمال می شود انجام گیرند. این آزمونها می بایستی مطابق با روش ارائه شده در پیوست B استاندارد IEC شماره 61089 انجام شوند. طول نمونه آزمون می بایستی بزرگتر از 10 متر باشد (در صورت توافق بین سازنده و خریدار نمونه ای با طولهای کوتاهتر ممکن است استفاده شود). از فیتینگهای انتهایی مناسبی که به تائید خریدار رسیده است می بایستی استفاده شود. در حین آزمون هیچ گونه صدمه دیدگی قابل رؤیتی نباید در رشته های OPGW مشاهده گردد. کلیه مقادیر تنش و کرنش بدست آمده در حین آزمون بایستی به صورت جدولی ثبت گردند.

مواقعی که آزمونهای استقامت گسیختگی OPGW مورد نیاز هستند، OPGW باید نیرویی که مقدارش نباید کمتر از 95 درصد RTS آن باشد را تحمل کند. در این حین هیچ یک از مقتولهای آن نمی بایستی گسیخته شوند.

3-2-3-2- آزمون عملکرد کششی²

آزمون عملکرد کششی به منظور تعیین رفتار نوری OPGW تحت بار کششی و با توجه به موارد زیر می بایستی مطابق با پیوست B استاندارد IEC شماره 61089 به عمل آید:

- عملکرد نوری (تغییرات تضعیف نوری)
- کشیدگی فیبر
- حد کشیدگی

شرایط بارگذاری مطابق پیوست B از استاندارد IEC شماره 61089 خواهد بود.

طول نمونه OPGW که تحت تنش قرار می گیرد می بایستی حداقل 10 متر (در صورت توافق بین سازنده و خریدار طولهای کوتاهتری می تواند مورد استفاده قرار گیرد) باشد. نمونه فیبر نوری می بایستی برای آزمون سنجش تضعیف نوری حداقل 100 متر و



1. Inspection

2. Tensile performance test

برای آزمون سنجش کشیدگی حداقل 30 متر طول داشته باشد. تضعیف نوری فیبر می‌بایستی با استفاده از یک منبع نور و دستگاه اندازه‌گیری قدرتی¹ که به دو انتهای فیبر تحت آزمون متصل شده‌اند سنجیده شود.

ممکن است یک دستگاه اندازه‌گیری بازتابش نور در حوزه زمان (OTDR)² برای انجام این آزمون مورد استفاده قرار گیرد، اما حداقل طول فیبر نوری می‌بایستی براساس مشخصه‌های OTDR تعیین گردد. نمونه آزمون می‌بایستی به فیتینگهای انتهایی مناسبی منتهی شود و این کار می‌بایستی به شیوه‌ای صورت گیرد که قبل از آغاز کشش، هیچیک از المانهای واحد نوری نتواند نسبت به OPGW حرکت کند.

در خاتمه آزمون، معیارهای زیر می‌بایستی در نظر گرفته شوند:

- هرگونه افزایش دائمی یا موقت در میزان تضعیف نور که بیش از مقدار مشخص شده باشد (تحت بارگذاری حداکثر کشش مجاز روی OPGW) می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.
- حد کشیدگی کمتر از مقدار مشخص شده تا حداکثر کشش مجاز (MAT) می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.

3-3-2-3- آزمون قرقه

آزمون قرقه می‌بایستی به منظور بازبینی این مسئله که آیا نصب OPGW موجب صدمه دیدگی یا خرابی آن می‌شود، یا نه به عمل آید. دو آرایش برای این آزمون در پیوست (2-3) ارائه شده‌اند که هر کدام از آنها با توافق بین سازنده و خریدار می‌تواند انتخاب گردد.

در خاتمه آزمون، معیارهای زیر می‌بایستی در نظر گرفته شوند:

- هرگونه افزایش دائمی در میزان تضعیف نور که بیش از مقدار مشخص شده باشد می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.
- بیضویت واحد نوری تحت شرایط زیر نمی‌بایستی بیش از حداکثر میزان مجاز بیضویت (MAOC) واحد نوری باشد:

$$MAOC = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} \% \quad (1-3)$$

که در آن:

d_1 = حداکثر قطر اندازه‌گیری شده کابل یا المان مورد نظر می‌باشد.

d_2 = حداقل قطر کابل یا المان مورد نظر است که سطح مقطع یکسانی همچون d_1 را دارا می‌باشد.

علاوه بر این، هرگونه صدمه‌ای که موجب خرابی مشخصات OPGW می‌گردد نمی‌بایستی وجود داشته باشد.

3-3-2-4- آزمون ارتعاشات آئولین

در آزمون ارتعاشات آئولین رفتار OPGW در قبال پدیده خستگی³ و همچنین مشخصه‌های نوری فیبرهای تحت نمونه ارتعاشات آئولین بررسی می‌شود. آرایش و مقدمات آزمون مورد نظر در پیوست (3-3) ارائه شده است. در خاتمه آزمون، معیارهای زیر می‌بایستی در نظر گرفته شوند:

1. Power meter

2. Optical time domain Reflectometer

3. Fatigue



- هرگونه افزایش دائمی یا موقت در میزان تضعیف نور، که بیش از مقدار مشخص شده باشد، می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.
- بیضویت واحد نوری نمی‌بایستی بیش از MAOC واحد نوری باشد (تحت شرایطی که MAOC از رابطه 1-3 محاسبه شده است).
- هرگونه صدمه مکانیکی به رشته‌ها، همچون پاره‌شدن مقتولها می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.

3-2-3-5-آزمون گالوپینگ (در مواقعی که لزوم انجام آن مشخص شده باشد)

- در آزمون ارتعاشات گالوپینگ رفتار OPGW در قبال پدیده خستگی و همچنین مشخصه‌های نوری فیبرها تحت نمونه حرکت گالوپینگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. آرایش و مقدمات آزمون مورد نظر در پیوست (3-4) ارائه شده‌است.
- در خاتمه آزمون، معیارهای زیر می‌بایستی در نظر گرفته شوند:
- هر گونه افزایش دائمی یا موقت در میزان تضعیف نور که بیش از مقدار مشخص شده باشد، می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.
 - بیضویت واحد نوری نمی‌بایستی بیش از MAOC واحد نوری باشد (تحت شرایطی که MAOC از رابطه 1-3 محاسبه شده است).
 - هرگونه صدمه مکانیکی به رشته‌ها، همچون پاره‌شدن مقتولها می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.

3-2-3-6-آزمون پیری (در مواقعی که لزوم انجام آن مشخص شده باشد):

آزمون پیری می‌بایستی مطابق با دستورالعمل‌های ارائه شده در استاندارد IEC شماره 61395 انجام شود.

3-2-3-7-آزمون چرخه حرارتی (در مواقعی که لزوم انجام آن مشخص شده باشد):

آزمون چرخه حرارتی می‌بایستی مطابق با روش ارائه شده در استاندارد IEC شماره F1 - 1 - 60794 با پارامترهای آزمونی به شرح ذیل، انجام شود:

- طول فیبر: حداقل 500 متر
- تعداد فیبرها: براساس توافق بین سازنده و خریدار مشخص می‌شود.
- تعداد چرخه‌ها: 2 چرخه بجز مواردی که بین سازنده و خریدار توافق شده‌است.
- نرخ افزایش¹: نرخ افزایش مناسبی انتخاب می‌شود.
- نرخ خنک‌کنندگی²: نرخ خنک‌کنندگی مناسبی انتخاب می‌شود.
- حداکثر درجه حرارت: براساس توافق بین سازنده و خریدار تعیین می‌شود.
- حداقل درجه حرارت: براساس توافق بین سازنده و خریدار تعیین می‌شود.

1. Rampe rate

2. Cooling rate



- مدت زمان غوطه‌ور کردن¹: حداکثر 24 ساعت، بجز مواردی که بین سازنده و خریدار توافق شده است. این آزمون بایستی روی OPGW کامل اعمال گردد.
- در خاتمه آزمون، هر گونه افزایش دائمی یا موقت در میزان تضعیف نور که بیش از مقدار مشخص شده باشد می بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.

3-2-3-8- آزمون نفوذ آب (در مواقعی که لزوم انجام آن مشخص شده باشد)

- آزمون نفوذ آب بایستی بر روی واحدهای نوری که شامل اجزای مسدودکننده نفوذ آب مناسبی (با یا بدون لوله‌های فلزی) هستند، مطابق با روش ارائه شده در استاندارد IEC شماره F5 - 1 - 60794 انجام گیرد.
- در خاتمه آزمون، هیچ‌گونه رطوبتی در انتهای نمونه آزمون نمی‌بایستی مشاهده گردد.

3-2-3-9- آزمون اتصال کوتاه

- در آزمون اتصال کوتاه رفتار OPGW و مشخصه‌های فیبرها تحت شرایط اتصال کوتاه نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. آرایش و مقدمات آزمون مورد نظر در پیوست (3-5) ارائه شده است.
- در خاتمه آزمون، معیارهای زیر می‌بایستی در نظر گرفته شوند:
- هرگونه افزایش دائمی یا موقت در میزان تضعیف نور که بیش از مقدار مشخص شده باشد، می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.
 - حداکثر درجه حرارتی که هر یک از اجزای OPGW (زره یا واحد نوری) به آن می‌رسد می‌بایستی در محدوده مشخص شده توسط سازنده قرار گیرد.
- پس از آزمون اتصال کوتاه، نمونه‌ای که تحت آزمون قرار گرفته است، به منظور تعیین استقامت کششی می‌بایستی تحت آزمون کششی قرار گیرد. نمونه مورد نظر می‌بایستی نیروی کششی مشخصی را (مقدار این نیرو نباید کمتر از 75 درصد RTS هادی باشد) بدون پاره شدن هر یک از مفتولهایش تحمل نماید. در خاتمه آزمون، هسته نوری می‌بایستی به منظور اطمینان از عدم بروز صدمه دیدگی و خسارت به اجزای غیر فلزی‌اش مورد بازرسی قرار گیرد.

3-2-3-10- آزمون صاعقه

- دو روش در پیوست‌های (3-6) و (3-7) جهت انجام این آزمون ارائه شده‌اند که هر کدام از آنها می‌توانند براساس توافق بین سازنده و خریدار انتخاب گردد.

- آزمون اثباتی برای یک شرایط صاعقه مشخص :

- در این آزمون OPGW و اجزای آن می‌بایستی افزایش دمای کوتاه‌مدتی که به واسطه جریان ضربه صاعقه مشخصی در آنها بوجود آمده است را بدون هیچ‌گونه آسیبی تحمل نمایند.
- ترتیب و مقدمات یک آزمون نمونه‌ای در پیوست (3-6) ارائه شده است.

1. Soak time



مونیتورینگ نوری OPGW می‌بایستی براساس توافق بین سازنده و خریدار به عمل آید.

در خاتمه آزمون، معیارهای زیر می‌بایستی در نظر گرفته شوند:

- هر گونه افزایش دائمی یا موقت در میزان تضعیف نور که بیش از مقدار مشخص شده باشد، می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.

- اگر یک یا تعدادی مفتول پاره شوند، آنگاه استقامت باقی‌مانده OPGW می‌بایستی برای مفتولهایی که پاره نشده‌اند محاسبه گردد. اگر استقامت باقی‌مانده محاسبه شده کمتر از 75 درصد RTS ادعا شده اولیه باشد، این وضعیت می‌بایستی به عنوان خطا تلقی گردد.

- آزمون ارزیابی برای تعیین پایداری OPGW در برابر صاعقه هنگام مقایسه با سیم محافظ معادل آن:

این آزمون می‌بایستی رفتار OPGW را هنگامی که تحت شرایط مشخص با سیم محافظ معادل خود مقایسه می‌شود، مورد ارزیابی قرار دهد.

مونیتورینگ OPGW می‌بایستی براساس توافق بین سازنده و خریدار به عمل آید.

آرایش و مقدمات یک آزمون نمونه در پیوست (3-7) ارائه شده است.

تعداد مفتولهایی که پاره می‌شوند می‌بایستی با آن تعدادی که در سیم محافظ معادل پاره می‌شوند مقایسه شوند. معیار رد یا پذیرش برای این آزمون می‌بایستی براساس توافق بین سازنده و خریدار مشخص گردد.



پیوست 3-1: روشهای توصیه‌ای برای محاسبه استقامت کششی نامی (RTS)، سطح مقطع یک لایه از مفتولهای قطاعی، مدول الاستیسیته، ضریب انبساط خطی و مقاومت dc :

- محاسبه استقامت کششی نامی (RTS) :

این محاسبه می‌بایستی براساس استقامت کششی زره و واحد نوری (در موارد ممکن) قبل از بافته شدن انجام گیرد. اگر OPGW از نوع Ax، Ax/Syz یا Ax/Ay می‌باشد، RTS مطابق با استاندارد IEC شماره 61089 محاسبه می‌گردد. در مواردی که اجزای تحمل کننده نیرو فولاد یا فولاد روکش شده با آلومینیوم هستند، RTS برابر 90 درصد مجموع استقامت کششی هر یک از مفتولها می‌باشد.

- محاسبه سطح مقطع یک لایه از مفتولهای قطاعی یا Z شکل :

سطح مقطع در چنین مواردی از رابطه زیر تعیین می‌گردد :

$$A = (D_o^2 - D_i^2)(\pi/4)f \quad (2-3)$$

که در آن :

A = کل سطح مقطع مفتول (mm^2)

D_o = قطر خارجی لایه (mm)

D_i = قطر داخلی لایه (mm)

f = ضریب فاصله مابین مفتولها می‌باشد که مقادیر نوعی آن برای مفتولهای فولادی روکش شده با آلومینیوم و مفتولهای فولادی با روکش روی برابر 0/9 و برای مفتولهای آلومینیومی و آلیاژ آلومینیومی برابر 0/92 می‌باشد.

- محاسبه مدول الاستیسیته نهایی (E) :

مقدار این کمیت از رابطه زیر تعیین می‌گردد :

$$E = \frac{\sum(E_n \cdot A_n)}{\sum A_n} \quad (3-3)$$

که در آن :

E_n : مقدار مدول ماده n (N/mm^2)

A_n : سطح مقطع ماده n (mm^2)

این رابطه مدولهای ثابتی را متناظر با منحنی خطی تنش - کرنش ارائه می‌نماید. این تقریبی از مدولهای الاستیسیته واقعی است که از طریق آزمون معرفی شده در بند (3-2-3) بدست می‌آیند.

- محاسبه ضریب انبساط خطی (b) :

مقدار این کمیت از رابطه زیر تعیین می‌شود :

$$\beta = \frac{\sum(\beta_n \cdot E_n \cdot A_n)}{\sum(E_n \cdot A_n)} \quad (4-3)$$

که در آن :

E_n : مقدار مدول ماده n (N/mm^2)

A_n : سطح مقطع ماده n (mm^2)



β_n : مقدار ضریب انبساط خطی ماده n (K^{-1}) می باشد.

- محاسبه مقاومت dc :

مقدار این کمیت از رابطه زیر تعیین می شود :

$$R = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{R_n}} \quad (5-3)$$

که در آن :

R : مقاومت dc خطی OPGW کامل (Ω/km)

R_n : مقاومت dc خطی ماده n (Ω/km) است. R_n را می توان از رابطه زیر بدست آورد :

$$R_n = \frac{\rho}{\sum A_i / F_i} \quad (6-3)$$

که در آن :

ρ : مقاومت ویژه ماده ($\Omega.mm^2/km$)

A_i : سطح مقطع ماده در لایه i ام (mm^2)

F_i : نسبت لایه، i امین لایه می باشد.

در مواقعی که واحد نوری، المان مرکزی OPGW است $F_i=1$ خواهد بود.

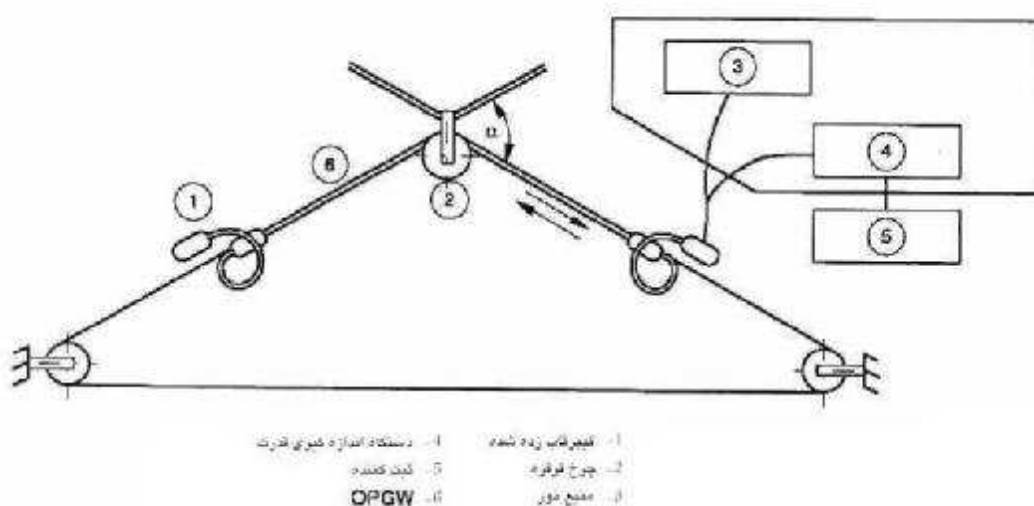


پیوست 3-2: روشهای آزمون قرقره

الف - روش اول :

- تهیه و تدارک آزمون

آرایش نمونه‌ای که برای آزمون قرقره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد در شکل (3-1) نشان داده شده است. نمونه آزمون می‌بایستی از دو طرف به فیتینگهای انتهایی مناسبی منتهی شده باشد و طول آن می‌بایستی حداقل 100 متر باشد. تضعیف نوری فیبر باید با استفاده از یک منبع نوری و دستگاه اندازه‌گیری قدرتی¹ که به هر یک از دو انتهای فیبر تحت آزمون متصل شده است، سنجیده شود. یک OTDR ممکن است مورد استفاده قرار گیرد، اما حداقل طول فیبر نوری می‌بایستی بوسیله مشخصه‌های OTDR تعیین گردد.



شکل 3-1: آرایش نوعی برای انجام روش اول آزمون قرقره

- شرایط آزمون :

شرایط عمومی آزمون به شرح ذیل می‌باشد :

- زاویه کشش (α) : 30 درجه، بجز مواردی که بین سازنده و خریدار توافق شده است.
- بار کششی : 15 درصد RTS، بجز مواردی که بین سازنده و خریدار توافق شده است.
- تعداد سیکل‌ها : 10 (یک رفت و برگشت یک سیکل در نظر گرفته می‌شود).
- قطر قرقره : براساس توافق بین سازنده و خریدار تعیین می‌گردد.



1. Power meter

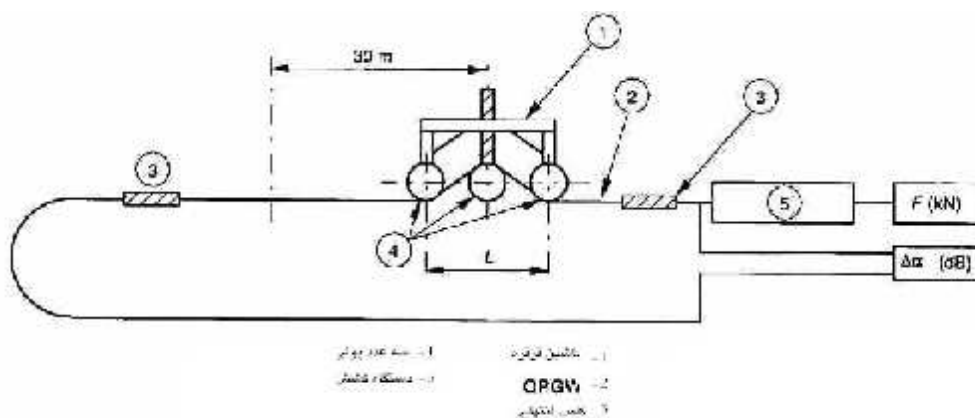
- رویه آزمون :

حداقل 5 متر از طول OPGW می‌بایستی از طریق قرقه برای تعداد رفت و برگشت مورد نیاز کشیده شود. قبل از اولین کشش، آغاز، میانه و انتهای این طول می‌بایستی علامت گذاری گردد. تضعیف نور می‌بایستی در حین آزمون اندازه‌گیری شود. پس از انجام آزمون، میزان بیضویت OPGW و المانهای آن می‌بایستی تعیین شده و با مقادیر MAOC نسبی‌شان در هر یک از نقاط علامت گذاری شده مقایسه گردند.

ب - روش دوم :

- تهیه و تدارک آزمون :

آرایش نمونه‌ای که برای آزمون قرقه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد در شکل (2-3) نشان داده شده است. توضیحات مشابه روش اول است.



شکل 2-3: آرایش نوعی برای انجام روش دوم آزمون قرقه

- شرایط آزمون :

شرایط عمومی آزمون به شرح ذیل می‌باشند :

- زاویه کشش در قرقه وسطی : 30 درجه، بجز مواردی که بین سازنده و خریدار توافق شده است.
- بار کششی : 15 درصد RTS، بجز مواردی که بین سازنده و خریدار توافق شده است.
- قطر قرقه و فاصله L : با توافق بین سازنده و خریدار تعیین می‌شود.

- رویه آزمون :

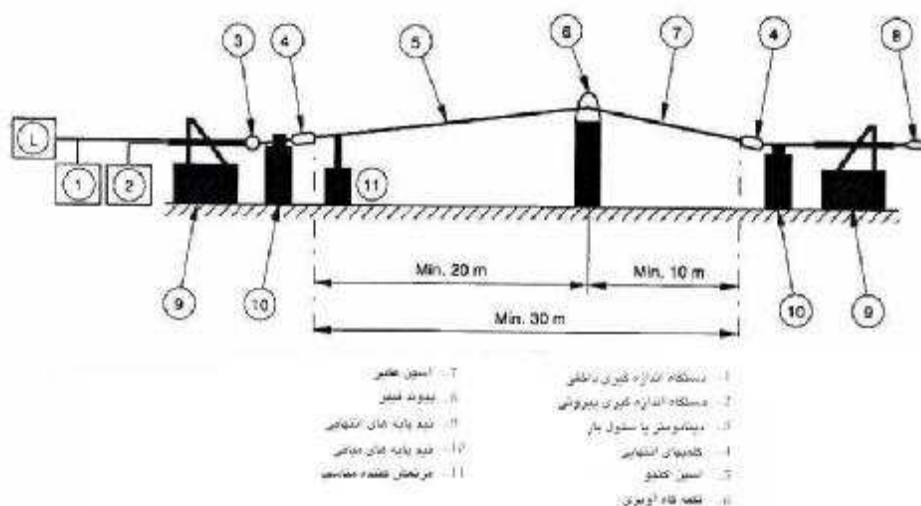
حداقل 50 متر از طول OPGW می‌بایستی تا 15 درصد RTS بارگذاری شود. ماشین قرقه می‌بایستی در فاصله 30 متری طول OPGW تحت آزمون، برای تعداد رفت و برگشت‌های مشخصی، حرکت نماید.

قبل از آغاز اولین سیکل ابتدا، میانه و انتهای این طول می‌بایستی علامت‌گذاری گردد. تضعیف نور می‌بایستی در حین آزمون اندازه‌گیری شود. پس از انجام آزمون، میزان بیضویت OPGW و المانهای آن می‌بایستی تعیین شده و با مقادیر MAOC نسبی‌شان در نقاط علامت گذاری شده مقایسه گردند.

پیوست 3-3: روش آزمون ارتعاشات آئولین

- تهیه و تدارک آزمون

یک آرایش نمونه‌ای که می‌تواند جهت انجام آزمون ارتعاشات آئولین مورد استفاده قرار گیرد در شکل (3-3) نشان داده شده است.



شکل 3-3: آرایش نوعی برای انجام آزمون ارتعاشات آئولین

نمونه آزمون می‌بایستی از دو طرف، پیش از آغاز عملیات کشش، به گونه‌ای به تجهیزات مربوطه متصل شود که فیبر نوری نتواند نسبت به OPGW حرکتی داشته باشد. یک دینامومتر، سلول بار¹، پرتوسنج کالبره شده² یا هر وسیله مشابه دیگر می‌تواند جهت سنجش میزان کشش OPGW مورد استفاده قرار گیرد. به منظور حفظ کشش ثابت در هنگام تغییر درجه حرارت در حین انجام آزمون می‌بایستی از تجهیزات مناسبی استفاده گردد.

طول کلی اسپن مابین دو انتها می‌بایستی حداقل 30 متر باشد. در دو سوم فاصله یکی از تیرهای انتهایی باید تیر آویزی قرار گیرد و حداقل اسپن موثر باید 20 متر باشد. اسپن می‌بایستی به گونه‌ای تدارک دیده شود که زاویه فلش استاتیک OPGW نسبت به سطح افق در اسپن اکتیو برابر $1/5 \pm 0/5$ درجه باشد.

به منظور کنترل اندازه ارتعاشات عمودی OPGW در نقاط آزاد³ می‌بایستی از وسایل مناسبی استفاده گردد.

یک وسیله مرتعش‌کننده الکترونیکی قابل کنترل⁴ می‌بایستی جهت تحریک OPGW در جهت عمودی مورد استفاده قرار گیرد. آرمیچر این وسیله می‌بایستی به OPGW به طریق مطمئن اتصال یابد و به صورت عمود بر آن قرار گیرد. مرتعش‌کننده می‌بایستی در داخل اسپن به گونه‌ای قرار گیرد که قادر به تولید حداقل 6 ارتعاش در اسپن اکتیو باشد.

1. Load cell
2. Calibrated beam
3. Antinode
4. An electronically controlled shaker



حداقل طول فیبر نوری در این آزمون 100 متر می باشد.

تضعیف نور فیبر می بایستی با استفاده از یک منبع نور و دستگاه سنجش قدرتی که به یکی از دو انتهای فیبر تحت آزمون متصل شده اند، سنجیده شود.

- شرایط آزمون :

شرایط آزمون می بایستی براساس یکی از دو وضعیت تشریح شده ذیل انتخاب گردد :

شرایط الف :

- تعداد سیکل های ارتعاشی : حداقل 10^7
- فرکانس ارتعاشات : 40 ± 10 هرتز
- بارکشی برای OPGW : 20 ± 5 درصد RTS
- کشیدگی سطح OPGW : ± 100 micro strain

نکات :

الف) وسایل سنجش کشیدگی در بالا و پائین OPGW نصب می شوند و تا حد امکان به نقاط انتهایی نزدیک می باشند.

ب) بار کششی برای نزدیکترین فرکانس تشدید متناظر تنظیم می گردد.

شرایط ب :

- تعداد چرخه های ارتعاشی : حداقل 10^7
- فرکانس ارتعاشات : $\frac{830}{d} \pm 10$ هرتز
- بارکشی برای OPGW : 20 ± 5 درصد RTS

اندازه پیک تا پیک ارتعاشات برای OPGW هایی که از مفتولهای به شرح ذیل ساخته شده اند، می بایستی برابر باشد با :

- برای فولادهای همگن یا فولاد با روکش آلومینیوم : $\frac{d}{3} \pm 10\%$ (mm)

- برای آلومینیوم یا آلیاژهای آن : $\frac{d}{5} \pm 10\%$ (mm)

که در آن d قطر OPGW برحسب میلیمتر می باشد.

نکته :

فرکانس ارتعاشات برای نزدیکترین فرکانس تشدید متناظر تنظیم می گردد.

- رویه آزمون :

در مراحل اولیه، اسپن آزمون مستلزم سنجش های پیوسته ای می باشد و ثبت اطلاعات مکانیکی و نوری می بایستی تقریباً هر 15 دقیقه یکبار صورت گیرد تا مادامیکه اسپن به حالت تعادل می رسد.

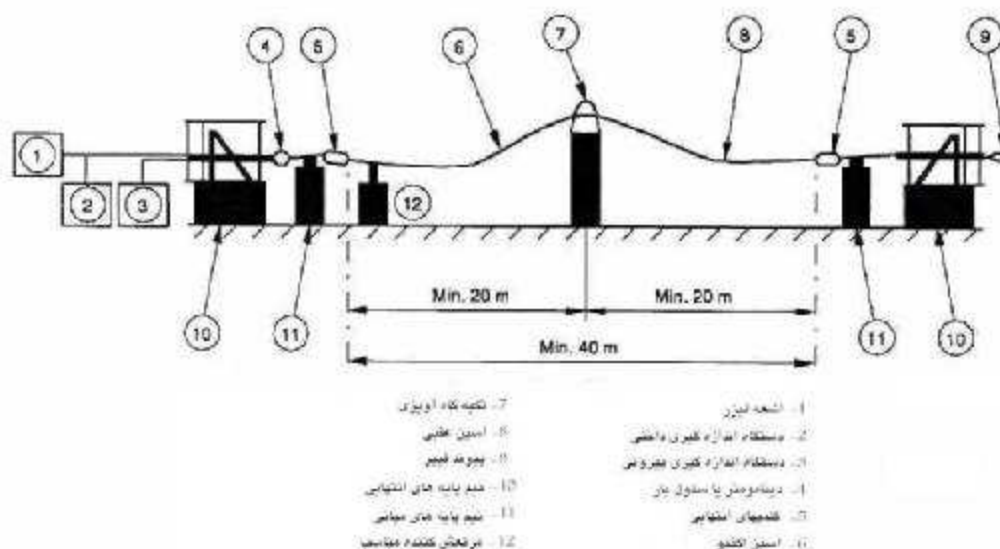
اندازه گیری های بعدی می بایستی حداقل دو بار در روز و معمولاً در ابتدا و انتهای روز صورت می گیرد.

اندازه گیری های نهایی می بایستی حداقل 2 ساعت پس از اتمام آزمون ارتعاش انجام گیرند.



پیوست 3-4: روش آزمون گالوپینگ

آرایش نمونه‌ای که برای انجام آزمون گالوپینگ می‌تواند از آن استفاده نمود در شکل (3-4) نشان داده شده است.



شکل 3-4: آرایش نوعی برای انجام آزمون گالوپینگ

حداقل طول کلی اسپن مابین فیتینگ‌ها می‌بایستی 40 متر باشد. نمونه آزمون باید به گونه‌ای به تجهیزات مربوطه متصل شود که فیبرهای نوری نتوانند نسبت به OPGW حرکتی داشته باشند. از یک دینامومتر، سلول بار، پرتوسنج کالیبره شده یا هر وسیله مشابه دیگر می‌توان جهت سنجش میزان کشش OPGW استفاده نمود. به منظور حفظ کشش ثابت در اثر تغییرات درجه حرارت در حین انجام آزمون، تجهیزات مناسبی باید مورد استفاده قرار گیرد. OPGW می‌بایستی حداقل تا 2 درصد RTS خود تحت کشش قرار گیرد.

یک وسیله آویزی مناسب می‌بایستی در حد فاصل مابین دو انتها قرار گیرد. ارتفاع این وسیله می‌بایستی به گونه‌ای باشد که زاویه فلش استاتیک بیش از یک درجه نباشد. وسیله آویزی می‌بایستی به استراکچر نگهدارنده‌اش به گونه‌ای متصل شود که گالوپینگ در اسپن غیر مؤثر (اسپن عقب)¹ حاصل گردد. این وضعیت را می‌توان با استفاده از ابزار آلای که اجازه حرکت آزادانه را به وسیله آویزی می‌دهند فراهم نمود.

تجهیزات مناسبی باید جهت اندازه‌گیری و مونیورینگ اندازه گالوپینگ نیم حلقه² و تک حلقه³ پیش‌بینی گردند.

یک مرتعش‌کننده مناسب می‌بایستی جهت حرکت OPGW در صفحه عمود مورد استفاده قرار گیرد. آرمیچر وسیله

مرتعش‌کننده می‌بایستی به طریق مطمئنی به OPGW بسته شده و به صورت عمود بر آن قرار گیرد.

1. Back span

2. Mid-loop (antinode)

3. Single loop



حداقل طول فیبرهای نوری در این آزمون 100 متر می باشد.

تضعیف نور فیبر می بایستی با استفاده از یک منبع نوری و یک وسیله سنجش قدرت متصل به یکی از دو انتهای فیبر تحت آزمون، سنجیده شود.

- شرایط آزمون :

OPGW می بایستی حداقل در معرض 10^5 سیکل گالوپینگ قرار گیرد. فرکانس آزمون می بایستی بین 1 تا 4 هرتز باشد و ممکن است به صورت فرکانس رزونانس تک حلقه یا جفت حلقه ای باشد. نسبت پیک تا پیک اندازه نیم حلقه به طول حلقه می بایستی در حالیکه اندازه گیری در اسپن اکتیو انجام می گیرد، در مقدار تقریبی 1/25 باقی بماند.

- رویه آزمون :

اطلاعات مکانیکی و نوری می بایستی تقریباً هر 500 سیکل یا تقریباً هر 15 دقیقه یکبار اندازه گیری و ثبت شوند. دستگاه سنجش قدرت نور می بایستی به طور دائم اطلاعات را حداقل یک ساعت قبل از آزمون و حداقل 2 ساعت پس از آزمون قرائت نماید.



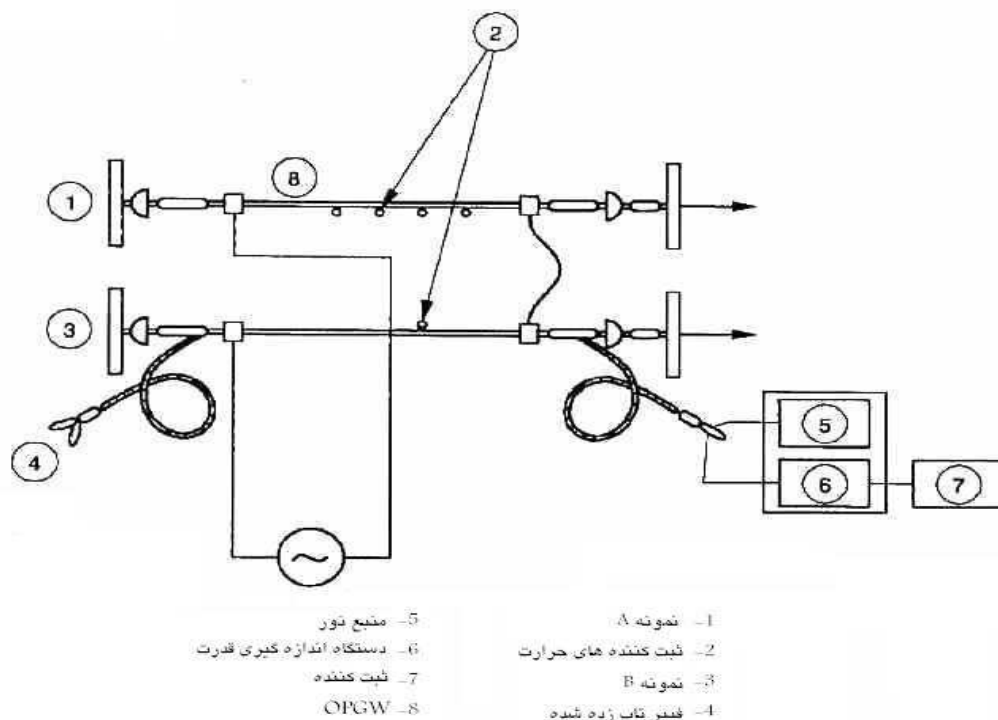
پیوست (3-5): روش آزمون اتصال کوتاه

- تهیه و تدارک آزمون

برای انجام این آزمون می‌توان از آزمون یک نمونه‌ای یا دو نمونه‌ای به شرح ذیل استفاده نمود:

• آزمون دو نمونه‌ای:

هر دو نمونه آزمون می‌بایستی در هر یک از دو انتهای خویش به فیتینگهای مناسبی منتهی شوند. در نمونه A، یک یا چند ترموکوپل می‌بایستی به داخل سوراخهایی که در داخل واحد نوری به منظور مونیتور کردن از درجه حرارت واحد نوری تدارک دیده شده‌اند فرو برده شوند. در نمونه B، یک یا چند ترموکوپل می‌بایستی با مفتولهای OPGW، به منظور مونیتورینگ درجه حرارت OPGW، در تماس باشند. تضعیف نوری فیبر می‌بایستی با استفاده از یک منبع نور و یک دستگاه سنجش قدرت که به یکی از دو انتهای فیبر تحت آزمون متصل شده‌اند، اندازه‌گیری شود. یک آرایش نمونه جهت انجام آزمون اتصال کوتاه دو نمونه‌ای در شکل (3-5) نشان داده شده است.



شکل 3-5: آرایش نوعی جهت انجام آزمون اتصال کوتاه دو نمونه‌ای

• آزمون یک نمونه‌ای:

نمونه آزمون می‌بایستی از هر دو انتها به فیتینگهای مناسبی منتهی شود. یک یا چند ترموکوپل می‌بایستی از طریق رشته‌های OPGW با سطح واحد نوری، به منظور مونیتورینگ درجه حرارت آن، در تماس باشند. یک یا چند ترموکوپل می‌بایستی با مفتولهای OPGW، به منظور مونیتورینگ از درجه حرارت OPGW، در تماس باشند. تضعیف نور فیبر می‌بایستی با استفاده از یک منبع نور و یک دستگاه سنجش قدرت که به یکی از دو انتهای فیبر تحت آزمون متصل شده‌اند، اندازه‌گیری شود.

- شرایط آزمون :

شرایط عمومی آزمون به شرح ذیل می باشد :

- بار کششی : 15 ± 5 درصد RTS
- طول نمونه : حداقل 10 متر
- طول فیبر تحت آزمون : حداقل 100 متر
- درجه حرارت اولیه نمونه : براساس توافق بین سازنده و خریدار تعیین می گردد.
- مدت زمان تداوم جریان اتصال کوتاه : براساس توافق بین سازنده و خریدار تعیین می گردد.
- تعداد پالسها : حداقل 2 پالس.
- شکل موج جریان اتصال کوتاه : می بایستی پس از 3 سیکل متقارن شود.
- فرکانس : 55 ± 10 هرتز

- رویه آزمون

قبل از اعمال پالسهای جریانی به OPGW دمای اولیه آن می بایستی در درجه حرارت 40 ± 5 درجه سانتیگراد تنظیم شود. درحد فاصل مابین اعمال پالسها می بایستی به OPGW اجازه داده شود تا مجدداً تا این درجه حرارت خنک شود. تضعیف نور فیبرهای تحت آزمون می بایستی به طور دائم حداقل از 2 دقیقه قبل تا 5 دقیقه پس از اعمال هر پالس جریانی اندازه گیری شود. دمای OPGW و واحد نوری می بایستی اندازه گیری شوند.



پیوست (3-6): آزمونهای برای شرایط صاعقه

- تهیه و تدارک آزمون :

آزمونهای میبایستی بر روی نقطه میانی OPGW نمونه انجام گیرند. طول این نمونه میبایستی کمتر از 10 متر باشد. حداقل طول فیبر تحت آزمون میبایستی 100 متر باشد.

تضعیف نور فیبر میبایستی با استفاده از یک منبع نور و یک دستگاه سنجش قدرت که به یکی از دو انتهای فیبر تحت آزمون متصل شده‌اند، اندازه‌گیری شود.

- شرایط آزمون :

نمونه آزمون میبایستی در معرض موج ضربه صاعقه شبیه‌سازی شده‌ای قرار گیرد. این موج ضربه صاعقه از چهار بخش تشکیل شده است که مشخصات آنها در جدول زیر ارائه شده است.

جدول 3-1: مشخصات موج ضربه صاعقه مورد استفاده در آزمونهای صاعقه

بخش	پارامتر	مقدار	تولرانس
موج ضربه اولیه	پیک جریان	120KA	$\pm 10\%$
	انرژی ضربه	$2(KA)^2 \cdot sec$	$\pm 10\%$
	طول پالس	$< 500\mu sec$	—
	زمان خیز موج	$< 25\mu sec$	—
جریان میانی	متوسط جریان	2KA	$\pm 10\%$
	طول پالس	$< 5msec$	—
	مقدار بار انتقال یافته	10c	$\pm 10\%$
	پیک جریان	*A	—
جریان دائمی	مدت زمان تداوم	*msec	—
	بار انتقال یافته	*c	$\pm 10\%$
	پیک جریان	100 KA	$\pm 10\%$
	انرژی ضربه	$0.25 (KA)^2 \cdot sec$	$\pm 10\%$
موج ضربه مجدد	طول پالس	$< 500\mu sec$	—

* با توافق بین سازنده و خریدار مشخص می‌شود.

- رویه آزمون :

قبل از اعمال موج ضربه جریانی به OPGW، دمای اولیه آن میبایستی در درجه حرارت 40 ± 5 درجه سانتی‌گراد تنظیم شود. قبل از هر اعمال موج میبایستی به OPGW اجازه داده شود تا مجدداً تا این دما خنک شود.

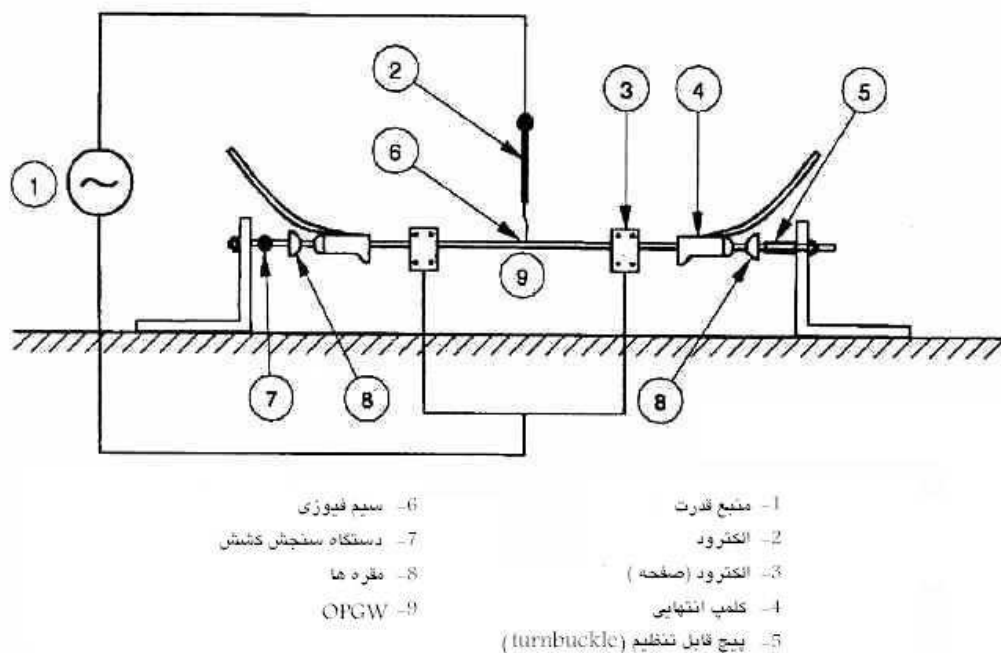
آزمونهای صاعقه میبایستی پنج بار بر روی یک نمونه OPGW انجام گیرد، ولی در هر بار این آزمونها باید بر روی مکانهای متفاوتی از نمونه به عمل آیند.



پیوست (3-7): روش آزمونی برای تعیین ظرفیت پایداری OPGW در مقابل ضربات صاعقه

- تهیه و تدارک آزمون :

آرایش نمونه‌ای که می‌تواند برای انجام آزمون صاعقه مورد استفاده قرار گیرد در شکل (3-6) نشان داده شده است. یک میله آهنی به عنوان الکتروود می‌بایستی در مکانی واقع در بالای OPGW مورد استفاده قرار گیرد. الکتروود و OPGW باید با استفاده از یک سیم فیوزی به یکدیگر متصل شده و فاصله آنها می‌بایستی 1 ± 5 سانتی‌متر باشد. بار کششی اعمال شده به OPGW نمونه می‌بایستی 2 درصد RTS یا 2 کیلونیوتن (هر کدام که کوچکتر هستند) باشد.



شکل 3-6: آرایش نوعی جهت انجام آزمون صاعقه OPGW

- رویه آزمون :

مقدار اولیه انرژی تخلیه صاعقه و نرخ افزایش آن می‌بایستی مشابه با مقادیر اعمال شده به سیم محافظ معادل آن باشد و می‌بایستی براساس مشخصه‌های سیم محافظ تعیین شود. انرژی تخلیه می‌بایستی تا زمانی که تخریب OPGW به وقوع می‌پیوندد افزایش یابد.



فهرست منابع و مراجع :

- [1] A. R. Hileman, "Insulation coordination for power systems", marcel dekker publisher, 1999, ISBN : 0-8247-9957-7.
- [2] CIGRE working group 33.01, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines", "Technical brochure No. 63, Oct.1991.
- [3] IEEE working group on lightning performance of transmission lines, "A simplified method for estimating the lightning performance of transmission lines", IEEE Trans. on PA&S, Apr. 1985, pp. 919-932.
- [4] F. S. Young, J. M. Clayton and A.R. Hileman, "Shielding of transmission lines", AIEEE Trans. 61S, 1951, pp. 132-154.
- [5] G. E. Brown and E. R. Witehead, "Field and analytical studies of Transmission line shielding-II", IEEE Trans. on PA&S, 1969, pp. 617-626.
- [6] E. R. Love, "Improvements on the lightning stroke modeling and application to design of EHV and UHV transmission lines", "M. Sc. Thesis, university of Colorado, 1973.
- [7] IEEE working group, "Estimating the lightning performance of transmission lines II-Updates to analytical models", IEEE Trans. on power delivery, Jul. 1993, pp. 1254-1267.
- [8] A. M. Mousa and K. D. Srivastava, "A Revised electrogeometric model for the termination of lightning strokes on grounded objects", proceedings of international aerospace conference on lightning and static electricity, Oklahoma city, Apr. 1988, pp. 342-352.
- [9] IEEE standard 998-1996, "Guide for direct stroke shielding of substations".
- [10] A. J. Eriksson, "An improved electrogeometric model for Transmission line shielding analysis", IEEE Trans. on power delivery, Jul.1987, pp. 871-886.
- [11] A. J. Eriksson, "The incidence of lightning strike to Transmission lines", IEEE Trans. on power delivery, Jul.1987, pp. 859-870.
- [12] J. G. Anderson, "Lightning performance of Transmission lines", chapter 12 of Transmission line reference book, palo alto CA : Electric power research institute.
- [13] C. F. Wagner and A. R. Hileman, "The lightning stroke-II", A IEEE Trans. on PA&S, Oct. 1961, pp. 622-242.
- [14] R. Lindholm, "Induced over voltages on transmission lines and their bearing on the lightning performance of medium voltage networks", diploic gotebery, gthenburg, Sweden, 1955, also see Trans. of Chalmers university of technology (gothenberg, Sweden), 188, 1957, pp.1-17.
- [15] S. Rusck, "Induced lightning over voltage on power transmission lines with special reference to over voltage protection of low voltage networks", Trans. of Royall institute of technology (Stockholm, Sweden), 120, 1958.
- [16] C. F. Wagner, "The relation between stroke current and the velocity of the return stroke", IEEE Trans. on PA&S, Oct. 1963, pp. 609-617.
- [17] "Transmission line reference book 345KV and above", published by EPRI, 3412 Hillview avenue, palo alto, CA 94304, 1979.
- [18] ASTM B416-93, "Standard specification for concentric-lay-stranded aluminum-clad steel conductors", 1993.
- [19] ASTM A475-95, "Standard specification for zinc-coated steel wire strand", 1995.
- [20] S. R. Lambert, "Minimum shield wire size-fault current considerations", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS 102, No. 3, March 1983, pp. 572-578.



- [21] L. M. Popovice, "Practical method for evaluating ground fault current distribution in station, towers and ground wires", IEEE Trans. on power delivery, Vol. 13, No.1, January 1998, pp. 123-128.
- [22] F. Dawalibi, G. B. Niles, "Measurements and computations of fault current distribution on overhead transmission lines", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS, No. 3, March 1984, pp. 553-560.
- [23] "Current carrying capacity of skywires", Ontario hydro research quarterly, fourth quarter, 1965.
- [24] R. Kimata, K. Yoshida, T. A. Schehade, Dr. L. Varga, Dr. O. Gunter, "Development of an application program to calculate short circuit temperature rise in OPGW", Furukaw review No. 18, 1999, pp. 45-50.



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 «مشفصات فنی عمومی و اجرایی
پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال -
سیستم حفاظت از صاعقه در خطوط هوایی
انتقال نیرو» جلد دوم از مجموعه دو جلدی
است. در این مجلد مباحث مربوط به معرفی و
شناخت سیستم حفاظت خطوط هوایی انتقال
نیرو در برابر صاعقه، اصول و مبانی طراحی
سیستم حفاظت از برفورد مستقیم صاعقه به
خطوط هوایی انتقال نیرو، الزامات استاندارد و
آزمون های مورد نیاز، می باشد که در چهار فصل
و هفت پیوست ارائه شده است.

