

مشخصات فنی عمومی و اجرایی
پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال
طراحی عمومی خطوط نیرو
نشریه شماره ۴۰۲

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
طراحی عمومی خطوط نیرو**

نشریه شماره ۴۰۲

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>



ریاست جمهوری

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی

بسمه تعالی

شماره:	۱۰۰/۸۶۸۱۶
تاریخ:	۱۳۸۶/۶/۳۱

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران

موضوع:

مشخصات فنی عمومی و اجرایی خطوط فوق توزیع و انتقال - طراحی عمومی خطوط 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/۳۳۴۹۷ هـ، مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۴۰۲ دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی خطوط فوق توزیع و انتقال - طراحی عمومی خطوط نیرو» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور، پیمانکاران و عوامل دیگر می‌توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده کنند و در صورتی که روش‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنمای بهتری در اختیار داشته باشند، رعایت مفاد این بخشنامه الزامی نیست.

عوامل یاد شده باید نسخه‌ای از دستورالعمل‌ها، روش‌ها یا راهنماهای جایگزین را به دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله ارسال دارند.

امیرمختار برقی

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

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 اجرائی) 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 - طراحی عمومی خطوط نیرو» می باشد که در سه فصل مشتمل بر کلیات و تعاریف، اصول و مراحل طراحی خطوط نیرو، و نمونه ای از طراحی یک خط فوق توزیع، 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، خطوط فوق توزیع و انتقال - طراحی

عمومی خطوط نیرو - نشریه شماره ۴۰۲

تهیه کننده

این مجموعه به وسیله شرکت مهندسين مشاور نیرو با همکاری آقایان مهندسين حامد نفیسی، سیاوش پاکدکیان، حسین جلالی فراهانی، محمد رضا وحیدی و دکتر عارف درودی و دکتر فرامرز رهبر 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.

وزارت نیرو - سازمان توانیر - مجری طرح	آقای مهندس جمال بیاتی
معاونت هماهنگی و نظارت بر بهره برداری سازمان توانیر	آقای مهندس حسین آخوندی
شرکت مشاورین	آقای مهندس رحمت الله اکرم
سازمان توسعه برق ایران	آقای مهندس بهمن الله مرادی
مهندسين مشاور نیرو	آقای مهندس سیاوش پاکدکیان
مهندسين مشاور نیرو	آقای دکتر عارف درودی
شرکت مشاورین	خانم مهندس زیبا فاخری داریان
شرکت ایران ترانسفو	آقای دکتر محمد کبیری
مهندسين مشاور قدس نیرو	آقای مهندس علی اصغر کسائیان
وزارت نیرو - سازمان توانیر - دبیر کمیته فنی طرح	آقای مهندس احسان الله زمانی

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

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول - کلیات و تعاریف

۳	..... ۱-۱- کلیات
۳	..... ۲-۱- تعاریف
۴	..... ۱-۲-۱- کشش
۴	..... ۲-۲-۱- فلش
۴	..... ۳-۲-۱- اسپن
۴	..... ۴-۲-۱- حداکثر مقاومت کششی
۴	..... ۵-۲-۱- مدول الاستیسیته
۴	..... ۶-۲-۱- اسپن وزن
۴	..... ۷-۲-۱- اسپن باد
۴	..... ۸-۲-۱- برج کششی
۴	..... ۹-۲-۱- سکشن
۴	..... ۱۰-۲-۱- نقاط زاویه
۵	..... ۱۱-۲-۱- پلان
۵	..... ۱۲-۲-۱- پروفیل
۵	..... ۱۳-۲-۱- ضریب بار
۵	..... ۱۴-۲-۱- ضریب تلفات
۵	..... ۱۵-۲-۱- سطح کرونیک
۵	..... ۱۶-۲-۱- قوس برگشتی
۶	..... ۱۷-۲-۱- ولتاژ جرقه بحرانی
۶	..... ۱۸-۲-۱- سیم محافظ
۶	..... ۱۹-۲-۱- نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه
۶	..... ۲۰-۲-۱- نرخ وقوع قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه
۶	..... ۲۱-۲-۱- نرخ قوس برگشتی
۶	..... ۲۲-۲-۱- نرخ وقوع قوس ناشی از صاعقه

۶	..... ۲۳-۲-۱- نرخ وقوع قوس ناشی از موج کلیدزنی
۷	..... ۲۴-۲-۱- فاصله خزشی
۷	..... ۲۵-۲-۱- چگالی صاعقه‌های زمین

فصل دوم - اصول و مراحل طراحی خطوط نیرو

۹	..... ۱-۲- روند طراحی خط
۱۱	..... ۲-۲- مسیریابی و زمین‌شناسی
۱۱	..... ۱-۲-۲- مسیریابی
۱۲	..... ۲-۲-۲- زمین‌شناسی
۱۲	..... ۳-۲- نقشه‌برداری و تهیه پلان و پروفیل
۱۳	..... ۴-۲- تعیین شرایط آب و هوایی
۱۳	..... ۵-۲- انتخاب اولیه برج
۱۴	..... ۶-۲- محاسبات هادی
۱۴	..... ۱-۶-۲- انتخاب اولیه نوع هادی و تعداد باندل
۱۵	..... ۲-۶-۲- بررسی انتخاب اولیه
۱۵	..... ۱-۲-۶-۲- محاسبه پارامترهای الکتریکی خط
۱۵	..... ۲-۲-۶-۲- محاسبه حداکثر دمای هادی
۱۷	..... ۳-۲-۶-۲- جریان اتصال کوتاه
۱۸	..... ۴-۲-۶-۲- محاسبه تلفات
۲۰	..... ۳-۶-۲- انتخاب نهایی هادی
۲۲	..... ۴-۶-۲- عملکرد مکانیکی هادی
۲۲	..... ۱-۴-۶-۲- اسپن طراحی
۲۲	..... ۲-۴-۶-۲- محدوده اسپن‌ها
۲۳	..... ۳-۴-۶-۲- معادله تغییر وضعیت
۲۴	..... ۴-۴-۶-۲- تهیه جدول کشش- فلش هادی
۲۵	..... ۷-۲- محاسبات عایقی
۲۵	..... ۱-۷-۲- محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه
۲۷	..... ۲-۷-۲- محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای کلیدزنی
۲۹	..... ۳-۷-۲- محاسبه فاصله عایقی هادی تا برج بر مبنای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت
۲۹	..... ۴-۷-۲- محاسبه فاصله عایقی هادی تا برج بر مبنای آلودگی محیط
۳۰	..... ۵-۷-۲- انتخاب مقره از نظر الکتریکی

۳۰	..... بررسی ارتفاع استاندارد برج ۶-۷-۲
۳۰	..... بررسی زوایای انحراف زنجیره مقره ۷-۷-۲
۳۲	..... انتخاب سیم محافظ ۸-۷-۲
۳۲	..... ظرفیت جریانی سیم محافظ ۱-۸-۷-۲
۳۳	..... میزان جریان خطای عبوری از سیم محافظ ۲-۸-۷-۲
۳۳	..... تعیین مقاومت پایه برج ۹-۷-۲
۳۵	..... بررسی کارایی سیستم حفاظت از صاعقه ۱۰-۷-۲
۳۸	..... تهیه جدول کشش- فلش سیم محافظ ۱۱-۷-۲
۳۹	..... طراحی سیستم زمین ۱۲-۷-۲
۳۹	..... طراحی سیستم زمین با استفاده از میله‌های زمین ۱-۱۲-۷-۲
۴۰	..... طراحی سیستم زمین با استفاده از کاترپویز ۲-۱۲-۷-۲
۴۱	..... بررسی عملکرد مکانیکی خط ۸-۲
۴۱	..... بارگذاری برج ۱-۸-۲
۴۱	..... محاسبه نیروها در حالت بارگذاری متعادل ۱-۱-۸-۲
۴۶	..... محاسبه نیروها در حالت بارگذاری غیرمتعادل ۲-۱-۸-۲
۴۷	..... بار ناشی از سیم‌کشی و تعمیرات خط ۳-۱-۸-۲
۴۷	..... ضرایب اضافه بار ۴-۱-۸-۲
۴۷	..... منحنی‌های کاربردی ۵-۱-۸-۲
۴۸	..... انتخاب زنجیره مقره و یراق‌آلات از دیدگاه مکانیکی ۲-۸-۲
۴۸	..... انتخاب زنجیره مقره از دیدگاه مکانیکی ۱-۲-۸-۲
۵۰	..... انتخاب یراق‌آلات ۲-۲-۸-۲
۵۰	..... نوسانات خط و انتخاب دمپرها ۳-۸-۲
۵۰	..... نوسانات آتولین ۱-۳-۸-۲
۵۳	..... نوسانات هادی‌های فرعی ۲-۳-۸-۲
۵۳	..... نوسانات گالوپینگ ۳-۳-۸-۲
۵۴	..... برج‌گذاری ۹-۲
۵۴	..... منحنی‌های سیم ۱-۹-۲
۵۵	..... برج‌گذاری روی پروفیل ۲-۹-۲
۵۷	..... پروفیل قطری ۳-۹-۲
۵۸	..... کنتر و فاصله مجاز جانبی ۴-۹-۲
۵۹	..... پیوست (۱-۲): تقسیم‌بندی بارگذاری شرایط آب و هوایی

۶۱	..... پیوست (۲-۲): فاصله مجاز سیم از زمین
۶۳	..... پیوست (۳-۲): تعیین ضریب K_S برای انواع سیم‌های محافظ
۶۵	..... پیوست (۴-۲): منحنی‌های کاربردی
۶۸	..... پیوست (۵-۲): حریم‌های موانع و تأسیسات
۷۰	..... پیوست (۶-۲): نیروی باد روی برج
۷۱	..... پیوست (۷-۲): جدول آفست

فصل سوم - نمونه‌ای از طراحی یک خط فوق توزیع

۷۹	..... ۱-۳- تعریف مسأله
۷۹	..... ۲-۳- مسیریابی و زمین‌شناسی
۸۱	..... ۳-۳- نقشه‌برداری و تهیه پلان و پروفیل
۸۳	..... ۴-۳- تعیین شرایط آب و هوایی
۸۳	..... ۵-۳- انتخاب اولیه برج
۸۷	..... ۶-۳- محاسبات هادی
۸۷	..... ۱-۶-۳- انتخاب اولیه نوع هادی و تعداد باندل
۸۷	..... ۲-۶-۳- بررسی انتخاب اولیه
۸۷	..... ۳-۶-۳- محاسبه پارامترهای الکتریکی خط
۸۹	..... ۳-۶-۳- محاسبه حداکثر دمای هادی
۹۰	..... ۳-۶-۳- جریان اتصال کوتاه
۹۰	..... ۳-۶-۳- محاسبه تلفات
۹۱	..... ۳-۶-۳- انتخاب نهایی
۹۲	..... ۴-۶-۳- عملکرد مکانیکی هادی
۹۲	..... ۳-۶-۳- تعیین اسپن طراحی و محدوده اسپن‌ها
۹۳	..... ۳-۶-۳- تهیه جدول کشش- فلش هادی
۹۷	..... ۷-۳- محاسبات عایقی
۹۷	..... ۳-۷-۱- محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه
۹۸	..... ۳-۷-۲- محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای کلیدزنی
۹۹	..... ۳-۷-۳- محاسبه فاصله عایقی هادی تا برج بر مبنای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت
۱۰۰	..... ۳-۷-۴- محاسبه فاصله خزشی هادی تا برج بر مبنای آلودگی محیط
۱۰۰	..... ۳-۷-۵- انتخاب مقرر از نظر الکتریکی
۱۰۱	..... ۳-۷-۶- بررسی ارتفاع استاندارد برج

۱۰۱	..... بررسی زوایای انحراف زنجیره مقره آویزی	۷-۷-۳
۱۰۱	..... انحراف زنجیره مقره بر اثر باد	۱-۷-۷-۳
۱۰۲	..... بررسی تامین فواصل عایقی	۲-۷-۷-۳
۱۰۴	..... انتخاب سیم محافظ	۸-۷-۳
۱۰۴	..... تعیین مقاومت پایه برج	۹-۷-۳
۱۰۵	..... بررسی کارایی سیستم حفاظت از صاعقه	۱۰-۷-۳
۱۰۷	..... تهیه جدول کشش - فلش سیم محافظ	۱۱-۷-۳
۱۱۰	..... طراحی سیستم زمین	۱۲-۷-۳
۱۱۰	..... بررسی عملکرد مکانیکی خط	۸-۳
۱۱۰	..... بارگذاری برج	۱-۸-۳
۱۱۵	..... انتخاب زنجیره مقره و یراق آلات از دیدگاه مکانیکی	۲-۸-۳
۱۱۵	..... انتخاب دمپرها	۳-۸-۳
۱۱۶	..... برج گذاری	۹-۳
۱۱۹	..... فهرست پارامترها	
۱۲۵	..... مراجع	



مقدمه

در این فصل ابتدا کلیاتی در مورد طراحی خطوط نیرو ارائه و سپس به تعریف تعدادی از اصطلاحات به کار رفته در این خصوص اشاره می‌شود.

۱-۱- کلیات

دیدگاه‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی سبب می‌شود که احداث نیروگاه‌ها در نزدیکی مراکز مصرف همواره عملی نگردد. با توجه به اینکه خطوط نیرو رابط بین مراکز تولید و مصرف هستند هر نوع بی‌دقتی در طراحی و احداث آنها می‌تواند منجر به توقف کوتاه مدت یا بلند مدت انتقال و توزیع انرژی الکتریکی گردد [۱].

برای یک خط نیرو، قدرت انتقالی، طول تقریبی مسیر و افت ولتاژ مجاز (در حدود ۵ درصد) مشخص است. در بخش مطالعات سیستم، سطح ولتاژ و تعداد مدار خط به گونه‌ای مشخص می‌شود که افت ولتاژ مجاز، پایداری شبکه و قابلیت اطمینان مورد نظر تامین گردد. بدین منظور می‌بایستی مطالعاتی چون پخش بار، اتصال کوتاه و پایداری گذرا و دینامیکی صورت گیرد. برای تسهیل بخشی از کار، منحنی‌ها و جداولی تهیه شده است که با استفاده از آنها و با در دست داشتن توان انتقالی و طول خط می‌توان ولتاژ خط، تعداد مدار، نوع هادی و تعداد هادی در فاز را برای دستیابی به افت ولتاژ مورد نظر با رعایت حداکثر درجه حرارت مجاز هادی مشخص نمود [۲].

پس از مشخص شدن ولتاژ و تعداد مدار خط می‌توان کار طراحی را آغاز کرد تا در نهایت نوع و محل قرارگیری برج‌ها و مشخصات فونداسیون، نوع و تعداد هادی‌ها و مشخصات ایزولاسیون خط معین گردد. اصولاً طراحی خط روندی مبتنی بر تکرار بوده و دستیابی به یک طرح بهینه از دیدگاه‌های فنی و اقتصادی، با به‌کارگیری روش‌های طراحی دستی امکان‌پذیر نمی‌باشد. به همین جهت پیشنهاد می‌شود که در طراحی خطوط، نرم‌افزارهای ویژه این کار مورد استفاده قرار گیرند.

در این گزارش روال طراحی خطوط فوق توزیع و انتقال بر مبنای استفاده از برج‌های تیپ ارائه می‌شود. با این حال در هر پروژه، طراح باید با لحاظ کردن هزینه‌های طراحی، ساخت نمونه اولیه و انجام آزمون‌های نوعی امکان استفاده از برج‌های جدید را نیز مدنظر قرار دهد. طراحی برج‌های خاص برای یک خط بویژه در خطوط طولانی با سطح ولتاژ بالا می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌های برج و فونداسیون شود. باید توجه داشت که موارد فوق، بخش قابل توجهی از هزینه احداث یک خط را به خود اختصاص می‌دهند.

۲-۱- تعاریف

در این بخش به تعریف تعدادی از اصطلاحات مورد استفاده در ادامه این گزارش اشاره می‌شود.

۱-۲-۱- کشش

کشش مقدار نیرویی است که اگر سیم در نقطه‌ای پاره شود باید در همان نقطه اعمال شود تا سیم شکل سابق خود را حفظ کند. راستای کشش در هر نقطه‌ای از سیم در امتداد خط مماس بر سیم است.

۱-۲-۲-۱- فلش

بزرگترین فاصله قائم بین منحنی سیم و خطی که از نقاط اتصال هادی به دو برج مجاور می‌گذرد را فلش می‌نامند.

۱-۲-۳-۱- اسپن

فاصله افقی بین دو برج مجاور را اسپن می‌نامند.

۱-۲-۴-۱- حداکثر مقاومت کششی

حداکثر مقاومت کششی مقدار ماکزیمم کششی است که اگر به سیم وارد شود، سیم شروع به پاره شدن خواهد کرد.

۱-۲-۵-۱- مدول الاستیسیته

نسبت تغییر تنش به تغییر ازدیاد طول نسبی سیم، مدول الاستیسیته نام دارد.

۱-۲-۶-۱- اسپن وزن

فاصله افقی بین نقاط می‌نیمم سیم‌های دو اسپن مجاور را اسپن وزنی می‌نامند.

۱-۲-۷-۱- اسپن باد

به فاصله افقی بین نقاط وسط دو اسپن مجاور، اسپن باد گفته می‌شود.

۱-۲-۸-۱- برج کششی

برج کششی به برجی گفته می‌شود که برای تغییر امتداد مسیر خط و قرار گرفتن در زوایا طراحی می‌شود و می‌تواند اختلاف کشش سیم‌های دو طرف را تحمل کند و معمولاً به صورت ۱۵ تا ۳۰ درجه، ۳۰ تا ۶۰ درجه و ۶۰ تا ۹۰ درجه تقسیم‌بندی می‌شود.

۱-۲-۹-۱- سکشن

قسمتی از خط انتقال است که محدود به دو برج کششی بوده و میان آن دو تعدادی برج آویزی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۱۰-۱- نقاط زاویه

محل قرارگیری برج‌های کششی در مسیر خط انتقال را نقاط زاویه می‌نامند.

۱-۲-۱۱- پلان

دید از بالای مسیر خط انتقال که نشان‌دهنده وضعیت زمین و عوارض موجود در حاشیه باند مسیر عبور خط است پلان نام دارد. عرض برداشت پلان حدود ۵۰ متر از هر طرف مسیر خط و معمولاً مقیاس آن ۱:۲۰۰۰ می‌باشد.

۱-۲-۱۲- پروفیل

دید از جانب مسیر خط انتقال که نشان‌دهنده پستی و بلندی‌های مسیر عبور خط بوده و برشی از محور مرکزی خط انتقال و زمین را نشان می‌دهد پروفیل نام دارد. پروفیل با مقیاس ۱:۲۰۰۰ در طول و ۱:۵۰۰ در ارتفاع ترسیم می‌شود.

۱-۲-۱۳- ضریب بار

ضریب بار با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$(۱-۱) \quad \text{ضریب بار} = \frac{\text{انرژی انتقالی در دوره مطالعه}}{\text{پیک بار خط انتقال} \times \text{ساعات بهره‌برداری}}$$

۱-۲-۱۴- ضریب تلفات

ضریب تلفات با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$(۲-۱) \quad \text{ضریب تلفات} = \frac{\text{تلفات انرژی در دوره مطالعه}}{\text{تلفات در بار پیک} \times \text{ساعات بهره‌برداری}}$$

۱-۲-۱۵- سطح کرونیک^۱

تعداد متوسط روزها یا ساعاتی از سال است که رعدوبرق در یک مکان مشخص به وقوع می‌پیوندد. سطح کرونیک به دو گونه یر تقسیم‌بندی می‌شود:

- سطح کرونیک روزانه: تعداد روزهایی از سال که رعدوبرق در آن روز مشاهده می‌گردد.
- سطح کرونیک ساعتی: تعداد ساعت‌هایی از سال که رعدوبرق در آن ساعت مشاهده می‌گردد.

۱-۲-۱۶- قوس برگشتی^۲

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

1. Keraunic level
2. Back flashover

۱-۲-۱۷- ولتاژ جرقه بحرانی^۱ (CFO)

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

۱-۲-۱۸- سیم محافظ^۲

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

۱-۲-۱۹- نرخ خطای سیستم حفاظت از صاعقه^۳ (SFR)

تعداد کل ضربات صاعقه‌ای است که در سال، از سیستم حفاظت از صاعقه عبور کرده و به هادی‌های فاز برخورد می‌نمایند. این واقعه ممکن است منجر به بروز قوس شود یا به بروز قوسی منتهی نگردد.

۱-۲-۲۰- نرخ وقوع قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه^۴ (SFFOR)

تعداد ضربات صاعقه‌ای است که در سال، از سیستم حفاظت از صاعقه عبور کرده و به هادی‌های فاز برخورد نموده و موجب بروز قوس الکتریکی در خط می‌گردند.

۱-۲-۲۱- نرخ قوس برگشتی^۵ (BFR)

تعداد قطعی‌های هر صد کیلومتر خط در سال که به واسطه قوس برگشتی به وجود می‌آیند، نرخ قوس برگشتی (BFR) نام دارد.

۱-۲-۲۲- نرخ وقوع قوس ناشی از صاعقه^۶ (LSFOR)

به مجموع نرخ قوس برگشتی (BFR) و نرخ وقوع قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR)، نرخ وقوع قوس ناشی از صاعقه اطلاق می‌شود.

۱-۲-۲۳- نرخ وقوع قوس ناشی از موج کلیدزنی^۷ (SSFOR)

تعداد قطعی‌های خط به ازای تعداد دفعات کلیدزنی مشخص (به طور معمول برای ۱۰۰ بار کلیدزنی)، نرخ وقوع قوس ناشی از موج کلیدزنی (SSFOR) نام دارد.

-
1. Critical flashover voltage
 2. Shield wire
 3. Shielding failure rate
 4. Shielding failure flashover rate
 5. Back flashover rate
 6. Lighting surge flashover rate
 7. Switching surge flashover rate

۱-۲-۲۴ - فاصله خزشی^۱

برای اینکه جریان الکتریکی بین دو قسمت فلزی مقره‌ها جاری گردد لازم است، از روی عایق‌ها عبور کند، به طوری که هرچه این فاصله بیشتر باشد، امکان نشت کمتر است. که این فاصله را فاصله خزشی می‌نامند.

۱-۲-۲۵ - چگالی صاعقه‌های زمین^۲ (GFD)

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

1. Creepage distance
2. Ground flash density



مقدمه

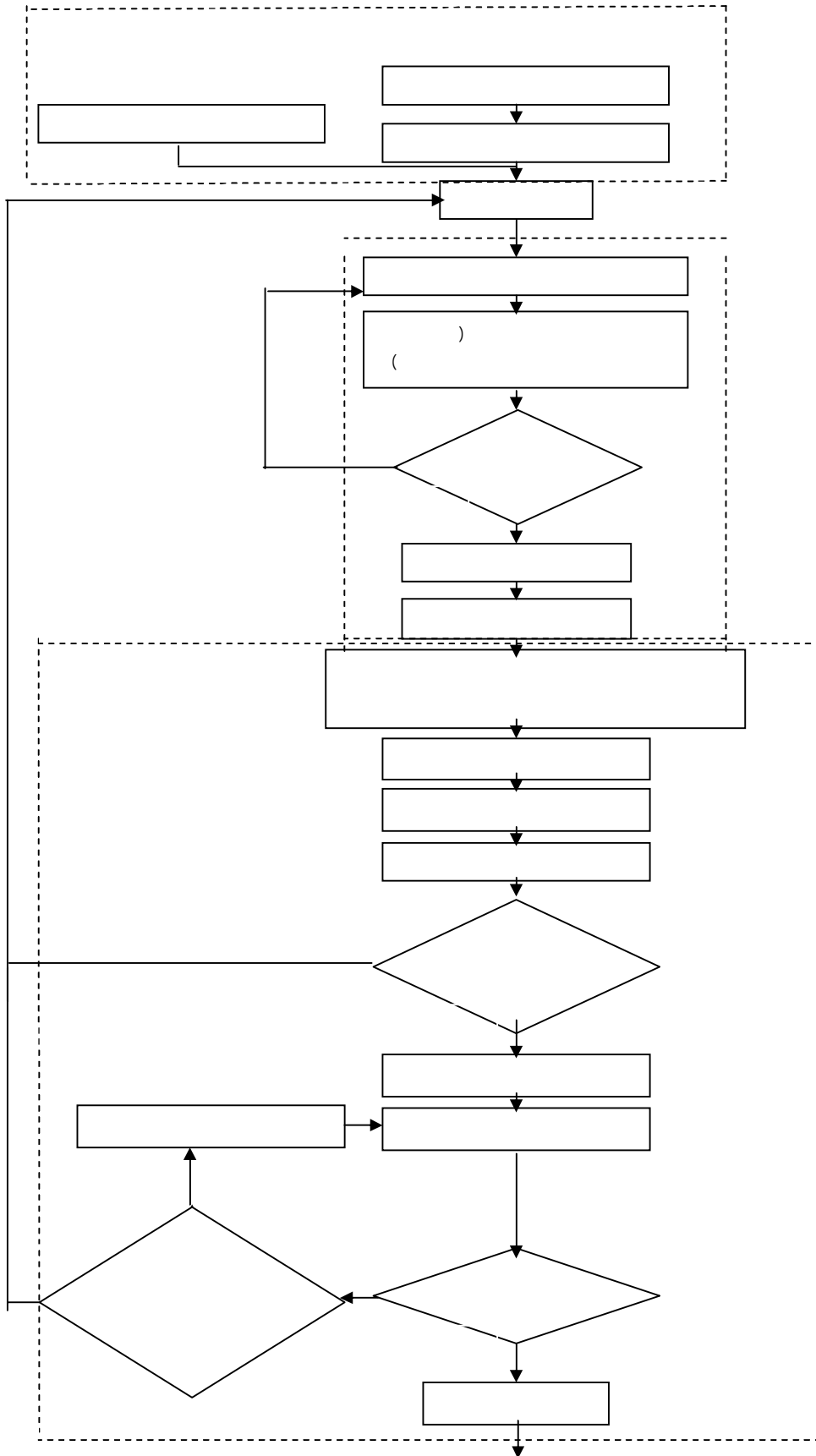
در این فصل ابتدا روند طراحی خطوط ارائه می‌شود. این روند بیانگر مراحل کلی طراحی خط است. در ادامه، هر یک از این مراحل به طور مجزا و همراه با جزئیات مورد بررسی قرار می‌گیرند.

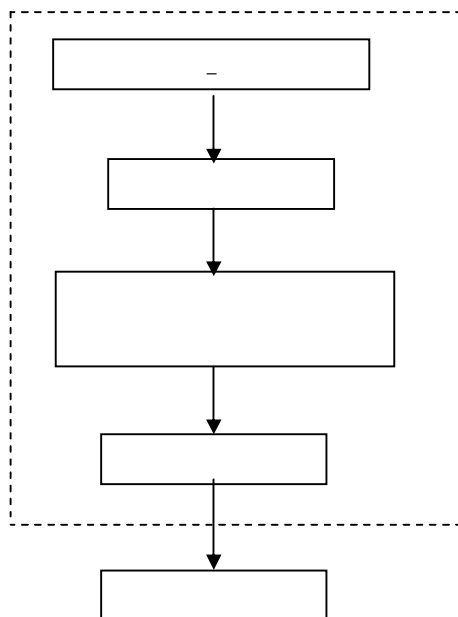
۱-۲- روند طراحی خط

شکل (۱-۲) روند طراحی خط بر مبنای استفاده از برج‌های تیپ را نشان می‌دهد. طراحی خط به بخش‌های کلی زیر تقسیم شده

است:

- مطالعات اولیه
- انتخاب برج
- محاسبات هادی
- محاسبات عایقی
- بررسی عملکرد مکانیکی خط
- برج‌گذاری





شکل ۲-۱: روند طراحی خط

در ادامه هر یک از موارد مطرح شده در این روند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲- مسیریابی و زمین‌شناسی

۲-۲-۱- مسیریابی

یکی از مهم‌ترین اقدامات اولیه جهت طراحی خطوط نیرو مسیریابی آن است. علیرغم اینکه مسیریابی بخش کوچکی از هزینه‌های طرح و اجرای خطوط نیرو را تشکیل می‌دهد، به دلیل نقش مهم آن در مکان‌یابی خط انتقال در ارتباط با سایر تأسیسات و عوارض مجاور خط و همچنین تأثیر قابل توجه آن بر هزینه‌های اجرای خط باید مورد بررسی دقیق قرار گیرد. هدف از مسیریابی تعیین مسیری مناسب و تا حد امکان کوتاه برای اتصال نقاط ابتدا و انتهای خط و نیز افزایش قابلیت اطمینان بهره‌برداری از خط می‌باشد.

اساسی‌ترین عامل در مسیریابی یک خط، یافتن کوتاه‌ترین راه بین پست‌های ابتدا و انتهای خط و در حالت ایده‌آل، ارتباط آنها با یک خط مستقیم است. زیرا هرچه مسیر خط کوتاه‌تر باشد، هزینه تجهیزات و مواد لازم از قبیل هادی و سیم محافظ، آهن‌آلات برج‌ها، فونداسیون، مقره‌ها و یراق‌آلات، هزینه عملیات اجرایی و ساختمانی از قبیل نقشه‌برداری، زمین‌شناسی و مکانیک خاک، احداث فونداسیون، نصب برج و سیم‌کشی و هزینه‌های جاری مانند تعمیرات و نگهداری نیز کمتر خواهد بود. علاوه بر این کاهش افت ولتاژ و تلفات توان و انرژی خط نیز از دیگر مزایای کاهش طول مسیر خط است. با این حال در عمل به دلیل وجود عوارض و موانع متعدد در طول مسیر خط و نیز لزوم رعایت اصول فنی و ایمنی، مسیر انتخاب‌شده مستقیم نخواهد بود.

مسیر باید به‌گونه‌ای تعیین شود که حتی‌الامکان از عبور خط از مناطق شهری و روستایی، زمین‌های سست، مناطقی با آلودگی زیاد طبیعی و صنعتی، باغات و زمین‌های کشاورزی با ارزش، مناطق جنگلی، زمین‌های رانشی و کوهستانهای دارای قابلیت سنگ‌لغزشی و نیز تلاقی آن با خطوط آب، گاز، نفت، برق، جاده‌ها، راه‌آهن، رودخانه، سیل و دره اجتناب شود. به علاوه باید از ایجاد زوایای

بی‌مورد در خط پرهیز نمود. در انتخاب نهایی مسیر بهینه باید علاوه بر موارد مذکور، نکاتی چون رعایت حریم‌ها و تداخل خط با سایر طرح‌های عمرانی، عبور خط از محیط‌های طبیعی و تبعات زیست محیطی آن و مسائل بهره‌برداری و نگهداری خط مورد توجه قرار گیرد. جزئیات مسیریابی خط در نشریه «مسیریابی خطوط» [۳] از همین سری نشریات آمده است.

۲-۲-۲- زمین‌شناسی

پایه برج‌های خطوط نیرو همچون سایر سازه‌ها در داخل زمین قرار می‌گیرند. لذا بررسی و مطالعه ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی محل پایه برج‌ها از اساسی‌ترین مطالعات طراحی خطوط است. با توجه به وسعت مسیر خطوط نیرو، مطالعه تفصیلی پایه تک‌تک برج‌ها هزینه زیادی خواهد داشت اما با اتخاذ روش‌های ویژه و بررسی نقاط خاص از مسیر می‌توان حدود باربری و نوع زمین مسیر خط را جهت تعیین نوع فونداسیون‌های لازم مشخص نمود.

مطالعات زمین‌شناسی یک خط نیرو در واقع در مرحله مسیریابی آن آغاز می‌شود. پس از تعیین نقاط اصلی مسیر اولیه حضور کارشناس زمین‌شناسی در گروه مسیریابی الزامی است. به هنگام انجام عملیات مسیریابی، طراح خط به همراه نقشه‌بردار و با توجه به نکات فنی و اقتصادی و محدودیت‌های طرح، نقاطی از مسیر را که خط مشخصاً از آنها عبور خواهد کرد تعیین می‌کند. به موازات این عملیات کارشناس زمین‌شناسی از دیدگاه مسائل تخصصی خود مسیر را مورد بررسی قرار داده و وجود هرگونه پدیده زمین‌شناسی خطرناک یا عوارضی که در آینده و پس از احداث خط احتمال وقوع آنها خواهد بود را ارزیابی می‌کند تا در صورت لزوم گزینه‌های مناسب‌تری انتخاب شوند.

در مرحله مسیریابی کلیات زمین‌شناسی اعم از موارد عمومی و مهندسی مورد بررسی قرار می‌گیرد و مطالعات کامل‌تر زمین‌شناسی پس از نهایی شدن مسیر و تهیه نقشه آن صورت می‌پذیرد. در مرحله مطالعات جامع، مسیر از نظر عوارض زمین‌شناسی که ممکن است در زمان اجرای خط یا بهره‌برداری از آن مشکل‌ساز شود مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرد و نتایج به صورت گزارشی اعلام می‌گردد. در گزارش مذکور راه‌حل‌های اجرایی برای احتراز از مشکلات موجود و قابل پیش‌بینی نیز ارائه می‌شود. اگر تمهیدات خاص برای رفع مشکلات مقرون به صرفه نباشد زمین‌شناس گزینه مناسب برای پرهیز از مسیر نامطلوب را پیشنهاد خواهد کرد. در ادامه، تقسیم‌بندی بنیادین زمین مسیر خط از نقطه‌نظر نوع فونداسیون‌ها و نحوه گودبرداری از دیدگاه اجرایی انجام می‌شود. این تقسیم‌بندی براساس میزان دشواری کار و ابزار مورد نیاز صورت می‌پذیرد. در نهایت گزارش زمین‌شناسی مهندسی به همراه یک نقشه ارائه می‌گردد. جزئیات کار در نشریه "زمین‌شناسی خطوط نیرو" از همین سری نشریات تشریح شده است [۴].

۲-۳- نقشه‌برداری و تهیه پلان و پروفیل

پس از تثبیت محور خط بر روی زمین و انعکاس آن در نقشه‌های موجود، عملیات نقشه‌برداری از مسیر خط آغاز می‌شود. این عملیات که جهت تعیین محل دقیق نقاط زاویه و اندازه‌گیری طول سکشن‌ها و در نهایت تهیه نقشه‌های پلان و پروفیل صورت می‌گیرد باید از دقت مناسبی برخوردار باشد تا بتوان در اجرای خط از نقشه‌های تهیه شده با اطمینان استفاده نمود. جزئیات مربوط به نقشه‌برداری خط در مرجع [۵] آمده است.

۲-۴- تعیین شرایط آب و هوایی

به منظور انجام محاسبات مکانیکی (محاسبات کشش- فلش هادی و سیم محافظ و محاسبات بارگذاری برج)، آگاهی از شرایط آب و هوایی منطقه (مناطق) عبور خط ضروری است. ایران به چهار منطقه آب و هوایی سبک، متوسط، سنگین و فوق سنگین تقسیم می‌شود که ویژگی‌های هر منطقه در پیوست (۱-۲) آمده است. در هنگام طراحی خط، آمار سالیانه هواشناسی ایستگاه(های) سینوپتیک واقع در مسیر مورد بررسی قرار می‌گیرد و رده آب و هوایی منطقه مشخص می‌شود. زیرا محاسبات مکانیکی و انتخاب ضرایب اضافه بار باید بر این اساس انجام گیرد.

۲-۵- انتخاب اولیه برج

در صورت استفاده از برج‌های تپ در طراحی خط، پس از طی مراحل فوق باید انتخاب اولیه برج صورت گیرد تا محاسبه پارامترهای الکتریکی خط (پس از انتخاب هادی) و انجام محاسبات عایقی امکان‌پذیر شود. بدین‌منظور ابتدا بر مبنای تجربیات قبلی از میان برج‌های موجود انتخاب صورت می‌گیرد. در طی مراحل بعدی طراحی، برج انتخابی با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه از نظر ارتفاع برج و فواصل بازوها از یکدیگر و بدنه و زاویه انحراف زنجیره مقرر (کارایی برج از دیدگاه عایقی) و از نظر نیروهای قابل تحمل برج و حدود اسپن‌های باد و وزن (عملکرد مکانیکی برج) و نیز از دیدگاه اقتصادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در صورت عدم تطابق با شرایط، با برج دیگر جایگزین می‌شود. در یک طراحی بهینه، برج انتخابی باید علاوه بر تأمین ملزومات الکتریکی (فواصل عایقی) و مکانیکی (نیروهای قابل تحمل)، حداقل هزینه را در پی داشته باشد.

برج‌ها را از نظر موقعیت قرارگیری در خط می‌توان به ۴ گروه عمده تقسیم کرد.

- برج وسط خط یا آویزی: این برج‌ها در مسیر مستقیم خط و همراه با زنجیره‌های آویزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. زاویه مجاز انحراف آنها بسته به نوع تا حداکثر ۱۵ درجه است.

- برج زاویه: این برج‌ها برای تغییر امتداد مسیر خط و همراه با زنجیره‌های کششی به کار می‌روند. بسته به نوع، زوایای انحراف تا حداکثر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه امکان‌پذیر است.

- برج انتهایی: این برج‌ها در ابتدا و انتهای خط و برای اتصال خط به پست مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- برج کششی (سکشن): برای تقویت سکشن بعد از هر ۱۰ یا ۱۵ برج آویزی یک برج کششی (با زاویه کم) استفاده می‌شود.

در ایران برای خطوط ۶۳ تا ۴۰۰ کیلوولت عمدتاً از برج‌های فلزی مشبک و خودایستا استفاده می‌شود. به عنوان نمونه در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت برای خطوط تک مداره، برج‌های تپ N (آویزی)، A (زاویه سبک) و C (زاویه سنگین و انتهایی) به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند و در سطح ولتاژ ۱۳۲ کیلوولت برج MS، HS، T30 و T60 و در سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت برج با طرح موسوم به آونگانی در انواع DC0، DC10، DC30، DC60 و DC90 و برج‌های طرح روملکترو در انواع LS، HS، T30، T60 و در سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت برج LA، MA و HA کاربرد گسترده‌ای دارند.

جزئیات طراحی و انتخاب انواع برج در نشریه "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی پایه‌های خطوط هوایی انتقال نیرو" [۷] آمده است.

۲-۶- محاسبات هادی

در خطوط نیرو، انتقال انرژی از طریق هادی‌ها صورت می‌گیرد. از نظر اقتصادی درصد قابل ملاحظه‌ای از هزینه احداث خط صرف تهیه و نصب هادی‌ها می‌شود. همچنین هزینه تلفات انرژی در خط با جنس و مقطع هادی ارتباط مستقیم دارد. به علاوه هدف از نصب فونداسیون و برج تنها نگهداری هادی‌ها در فاصله مناسبی از زمین و از یکدیگر است. نقش زنجیره مقرر و یراق‌آلات آن نیز نگهداری هادی‌ها ضمن حفظ فاصله مناسب آنها تا برج می‌باشد. نصب سیم محافظ نیز به منظور جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه به هادی‌ها صورت می‌گیرد. با توجه به موارد فوق دقت در انتخاب هادی از دیدگاه‌های فنی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۸].

۲-۶-۱- انتخاب اولیه نوع هادی و تعداد باندل

در طراحی خطوط نیرو در سطوح فوق توزیع و انتقال عمدتاً از هادی‌های ACSR استفاده می‌شود. در مواردی که شدت آلودگی در مسیر خط زیاد نیست می‌توان از هادی‌های با مغزی فولاد گالوانیزه (ACSR/GS) که ارزاتر از دیگر انواع هادی‌های آلومینیومی یعنی ACSR/AS یا ACSR/AW می‌باشد استفاده نمود. به هرحال استفاده از دو نوع هادی اخیر میزان خوردگی هادی‌ها را در مناطق آلوده کاهش می‌دهد. گزینه دیگر برای مناطق آلوده، هادی ACSR/GS همراه با گریس محافظ است. به منظور اجتناب از تنوع در هادی‌های مصرفی، تعدادی از آنها به عنوان استاندارد ملی معرفی شده‌اند [۹]. در انتخاب هادی‌های استاندارد، معیارهای فنی و اقتصادی با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی، سطوح ولتاژ و هزینه‌های روز کشور لحاظ گشته است. هادی‌های مذکور عبارتند از: Lynx, Hawk, Squab, Starling, Canary, Curlew و Grackle. برای آشنایی با جزئیات هادی‌های خطوط، مشخصات هادی‌های استاندارد و روابط محاسباتی می‌توان به نشریه "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی هادی‌های خطوط انتقال" مراجعه کرد [۹].

در طراحی خطوط ابتدا با توجه به سطح ولتاژ، توان انتقالی و طول خط، نوع هادی و تعداد هادی در فاز با در نظر گرفتن روابط محاسباتی مطابق با مرجع [۹]، تجربیات قبلی و پروژه‌های مشابه انتخاب می‌شود. سپس انتخاب اولیه به محک گذاشته می‌شود تا از برآورده شدن ویژگی‌های مورد نظر اطمینان حاصل گردد. در روند محاسبات، در صورت لزوم نوع هادی یا تعداد هادی‌های فرعی عوض می‌شود تا طرح بهینه به لحاظ فنی و اقتصادی حاصل گردد. البته باید توجه داشت که معرفی هادی‌های استاندارد با در نظر گرفتن معیارهای گوناگون صورت گرفته و لذا انتخاب هادی از میان آنها اصولاً معیارها را برآورده خواهد ساخت. به عنوان انتخاب اولیه هادی برای طراحی خطوط با سطوح ولتاژ مختلف موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

Lynx: خطوط ۶۳ کیلوولت

Hawk یا Squab: خطوط ۱۳۲ کیلوولت

Starling یا Canary: خطوط ۲۳۰ کیلوولت

Curlew: خطوط ۴۰۰ کیلوولت

۲-۶-۲- بررسی انتخاب اولیه

۲-۶-۲-۱- محاسبه پارامترهای الکتریکی خط [۱]

با معلوم بودن شعاع هادی r ، تعداد هادی‌های فرعی n_b و فاصله آنها از یکدیگر d_b و ابعاد برج (فواصل فازها) می‌توان راکتانس سلفی X_L ، راکتانس خازنی X_C و امپدانس موجی Z_1 خط را به دست آورد.

الف) راکتانس سلفی

راکتانس سلفی خط از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$X_L = 0.1447 \log \frac{GMD}{GMR_c} \quad (1-2)$$

X_L راکتانس سلفی (اهم بر کیلومتر هر فاز)، GMD فاصله متوسط هندسی فازها و GMR_c شعاع معادل هادی‌های یک فاز می‌باشد.

ب) راکتانس خازنی

X_C از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X_C = 0.1318 \log \frac{GMD}{r_c} \quad (2-2)$$

که r_c شعاع معادل هادی و X_C راکتانس خازنی (مگا اهم کیلومتر) است.

پ) امپدانس موجی خط

امپدانس است که در آن توان راکتیو تولیدی خط $\frac{V^2}{X_C}$ با توان راکتیو مصرفی آن $X_L I^2$ برابر باشد (V ولتاژ فاز است). این امپدانس از رابطه (۳-۲) بدست می‌آید:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{1}{c}} \quad (3-2)$$

I اندوکتانس $(\frac{X_L}{\omega})$ و c کاپاسیتانس $(\frac{1}{\omega X_C})$ خط است.

۲-۶-۲-۲- محاسبه حداکثر دمای هادی

با معلوم بودن حداکثر توان انتقالی (با در نظر گرفتن رشد بار و عمر مفید خط) در فاز صفر و سطح ولتاژ خط و فرض مقداری برای ضریب توان می‌توان مقدار تقریبی حداکثر جریان عبوری از خط را به دست آورده و با استفاده از آن حداکثر دمای هادی را محاسبه نمود. حداکثر دمای هادی در تهیه جدول کشش - فلش هادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور باید معادله تعادل حرارتی برای هادی حل شود.

$$P_j + P_{sol} = P_{rad} + P_{conv} \quad (4-2)$$

در این رابطه P_j حرارت تولید شده در هادی به واسطه اثر ژولی (w/m) ، P_{sol} توان حرارتی جذب شده از خورشید در سطح هادی (w/m) ، P_{rad} حرارت خارج شده از هادی به ترتیب بر اثر تشعشع حرارت و همرفت گرما (w/m) می‌باشند. روابط زیر نحوه محاسبه چهار کمیت فوق را نشان می‌دهند [۲۴].

$$P_j = R_T I^2 \quad (5-2)$$

$$P_{sol} = \gamma.d.S_i \quad (6-2)$$

$$P_{rad} = S_B \pi d K_r (T_2^4 - T_1^4) \quad (7-2)$$

$$P_{conv} = \lambda.Nu.(T_2 - T_1)\pi \quad (8-2)$$

در روابط فوق:

R_T : مقاومت هادی در دمای T_2 (اهم بر متر)

γ : ضریب جذب انرژی خورشید که عددی بین ۰/۳ تا ۰/۹ است و برای هادی‌های آلومینیمی معمولاً برابر ۰/۵ فرض می‌شود. با گذشت زمان و سیاه شدن هادی این ضریب افزایش یافته و به حدود ۰/۹ نیز می‌رسد.

d : قطر هادی (متر)

S_i : شدت اشعه خورشید در محل خط است که اگر مقداری برای آن در دسترس نباشد می‌توان آن را ۹۰۰ وات بر مترمربع فرض کرد.

S_B : ثابت بولتزمن ($5/67 \times 10^{-8} \text{ w m}^{-2} \text{ k}^{-4}$)

K_r : ضریبی که بیانگر ضریب صدور تشعشع از هادی نسبت به اجسام تیره می‌باشد و مقدار آن برای آلومینیم و آلیاژهای آن را می‌توان ۰/۶ در نظر گرفت.

T_1 : دمای متوسط محیط (درجه کلونین)

T_2 : دمای نهایی هادی (درجه کلونین)

λ : مقداری ثابت برابر با $0/02585 \text{ w.m}^{-1} \text{ k}^{-1}$

Nu : عدد ناسلت که از رابطه (۹-۲) به دست می‌آید:

$$Nu = 0.65 Re^{0.2} + 0.23 Re^{0.61} \quad (9-2)$$

Re : عدد رینولدز است که از رابطه (۱۰-۲) به دست می‌آید:

$$Re = 1.644 \times 10^9 \nu d [T_1 + 0.5(T_2 - T_1)]^{-1.78} \quad (10-2)$$

ν : سرعت باد دائمی که مقدار آن ۰/۶۱ متر بر ثانیه (معادل ۲ فوت بر ثانیه) فرض می‌شود.

R_T در رابطه (۵-۲) به دمای هادی (مجهول مسأله) بستگی دارد. رابطه این دو کمیت به صورت زیر است:

$$R_T = R_{20} \times \frac{M + T_C}{M + 20} \quad (11-2)$$

R_{20} مقاومت هادی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و T_C دمای هادی برحسب درجه سانتی‌گراد است. مقدار M را می‌توان برای هادی‌های ACSR تقریباً برابر ۲۲۳ فرض نمود. بنابراین معادله تعادل حرارتی برای محاسبه حداکثر دمای هادی در جریان I مطابق رابطه (۱۲-۲) خواهد بود:

$$R_{20} \times \frac{M + T_C}{M + 20} I^2 + \gamma.d.S_i = S_B \pi d K_r [T_2^4 - T_1^4] + \lambda.Nu.(T_2 - T_1)\pi \quad (12-2)$$

در این رابطه $T_2 = T_C + ۲۷۳$ و T_1 حداکثر دمای محیط (طبق آمار هواشناسی) برحسب درجه کلونین است. به این ترتیب با حل معادله فوق مجهول T_C به دست می‌آید. دمای به دست آمده نباید از حداکثر مقدار مجاز دمای هادی (برای هادی‌های ACSR) برابر

80°C فرض می‌شود) تجاوز کند. به علاوه T_c (پس از اعمال حاشیه ایمنی و در نظر گرفتن پیری سیم) برای محاسبه حداکثر فلش سیم مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

برای آگاهی از مقادیر معمول، در جدول (۱-۲) جریان مجاز هادی‌های استاندارد ملی تحت شرایط ارتفاع منطقه ۱۰۰۰ متر، حداکثر دمای مجاز هادی 80°C ، توان تابشی خورشید $0.1023 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ ، ضریب دفع و جذب هادی 0.9 و سرعت باد $0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ به ازای سه دمای محیطی مختلف آمده است.

جدول ۱-۲: حداکثر جریان مجاز هادی‌های استاندارد ملی تحت شرایط معین و دماهای محیطی مختلف

نام هادی	40°C	45°C	50°C
Lynx	۴۲۹	۳۹۰	۳۴۴
Hawk	۵۲۵	۴۷۶	۴۲۱
Squab	۶۰۵	۵۴۸	۴۸۳
Starling	۶۷۷	۶۱۲	۵۳۹
Canary	۷۷۷	۷۰۱	۶۱۵
Curlew	۸۴۵	۷۶۲	۶۶۷
Grackle	۹۳۰	۸۳۷	۷۳۱

۲-۶-۲-۳- جریان اتصال کوتاه [۱]

هادی انتخابی باید بتواند جریانهای اتصال کوتاه مورد انتظار را در مدت زمان معین تحمل کند. در جدول (۲-۲) نمونه سطوح اتصال کوتاه در ولتاژهای مختلف داده شده است. زمان رفع اتصال کوتاه نیز باتوجه به احتمال عدم عملکرد صحیح رله‌های اصلی و بسته به زمان عملکرد رله‌های پشتیبان و تأخیر در عملکرد کلیدها بسته به نظر طراح بین 0.1 تا 1 ثانیه فرض می‌شود. باید توجه داشت که سطوح اتصال کوتاه داده شده در جدول (۲-۲) بیانگر جریان اتصال کوتاه در شینه پست‌ها هستند و جریان اتصال کوتاه مورد انتظار هادی خط از مطالعات سیستم به دست می‌آید.

جدول ۲-۲: سطح اتصال کوتاه در ولتاژهای فوق توزیع و انتقال شبکه ایران

۴۰۰	۳۳۰	۱۳۲	۶۳	سطح ولتاژ (کیلوولت)
۵۰	۴۰	۳۱/۵	۲۰	سطح اتصال کوتاه (کیلوآمپر)

حداکثر دمای مجاز هادی‌های ACSR در حالت اتصال کوتاه 180°C است. برای بررسی کارایی هادی انتخابی از نظر جریانهای اتصال کوتاه، باتوجه به سطح مقطع هادی جریان اتصال کوتاه قابل تحمل آن از رابطه (۲-۱۳) به دست آمده و با حداکثر جریان اتصال کوتاه عبوری از خط مقایسه می‌شود.

$$I_{sc} = K_{sc} \frac{A}{\sqrt{t_c}} \quad (2-13)$$

در این رابطه K_{sc} برای هادی‌های ACSR برابر ۸۵ و t_c برابر زمان رفع اتصال کوتاه فرض می‌شود. A سطح مقطع هادی برحسب میلی‌مترمربع و I_{sc} جریان اتصال کوتاه برحسب آمپر است.

۲-۶-۲-۴- محاسبه تلفات

تلفات خط شامل تلفات اهمی و تلفات کرونا است که متوسط اولی بسیار بزرگتر از متوسط دومی است اما پیک دومی از پیک اولی بزرگتر است.

۲-۶-۲-۱- تلفات اهمی

در فرکانس ۵۰ هرتر مقاومت‌های ac و dc تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. با این حال می‌توان از رابطه (۲-۱۴) مقاومت ac هادی را برحسب مقاومت dc آن به دست آورد:

$$R_{ac} = R_{dc} + 1.5 \times 10^{-3} (R_{dc}^{0.25} - R_{dc}^{-0.25})^2 \quad (۲-۱۴)$$

تلفات اهمی خط را می‌توان از رابطه (۲-۱۵) به دست آورد:

$$P_L = 3R_u (I^2 - I I_{CH} \sin\theta + \frac{1}{3} I_{CH}^2) \quad (۲-۱۵)$$

P_L تلفات اهمی خط در بار پیک (مگاوات)، R_u مقاومت موثر هر فاز با در نظر گرفتن تعداد باندل و اثر پوستی در دمای حداکثر هادی (اهم)، I حداکثر جریان (کیلوآمپر) و I_{CH} جریان شارژ خط و $\cos\theta$ ضریب توان خط است.

$$I_{CH} = \frac{V_L}{\sqrt{3} X_C} \quad (۲-۱۶)$$

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \cos^2\theta} \quad (۲-۱۷)$$

V_L ولتاژ فاز-فاز خط (کیلوولت) می‌باشد. در خطوط کوتاه (کمتر از ۱۰۰ کیلومتر) جریان شارژ خط کوچک است و لذا می‌توان تلفات اهمی را از رابطه (۲-۱۸) به دست آورد.

$$P_L = \frac{R_u P^2}{V_L^2 \cos^2\theta} \quad (۲-۱۸)$$

P توان انتقالی نامی خط است. تلفات اهمی نباید از ۵ درصد توان انتقالی خط بیشتر شود.

۲-۶-۲-۲- تلفات کرونا

اگر شدت میدان (گرادیان ولتاژ) در اطراف هادی از گرادیان ولتاژ بحرانی g_c بیشتر شود کرونا آغاز می‌گردد. برای محدود کردن تلفات کرونا مقطع هادی باید به گونه‌ای انتخاب شود که گرادیان ولتاژ در سطح آن از گرادیان ولتاژ بحرانی در شرایط آب و هوایی منطقه (E.D.S) بیشتر نشود. به طور معمول برای محدود کردن اختلالات رادیویی، گرادیان ولتاژ در سطح هادی در گستره ۱۴ تا ۱۷ کیلوولت بر سانتی‌متر محدود می‌شود. گرادیان ولتاژ در سطح هادی رشته‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$g = \frac{V}{r \ln(GMD/r)} \quad (۲-۱۹)$$

g گرادیان ولتاژ در سطح هادی (کیلوولت بر سانتی‌متر)، V ولتاژ فاز (کیلوولت) و r شعاع هادی (سانتی‌متر) است. در خطوط بانندل داریم:

$$g = \frac{K_c \cdot V}{n_b \cdot r \cdot \ln(GMD/r_b)} \quad (20-2)$$

$$K_c = 1 + \frac{2r}{d_b} (n_b - 1) \sin \frac{\pi}{n_b}$$

$$r_b = \sqrt[n_b]{n_b \cdot r \left(\frac{d_b}{2 \sin(\pi/n_b)} \right)^{n_b - 1}}$$

در روابط فوق n_b تعداد هادی در فاز و d_b فاصله میان دو هادی فرعی است. باید توجه داشت که افزایش تعداد هادی در فاز صرفاً برای کاهش گرادیان ولتاژ توجیه اقتصادی ندارد. برای بررسی تلفات کرونای خط، مقدار آن در شرایط آب و هوایی خوب محاسبه و با مقدار مجاز مقایسه می‌شود. مقادیر مجاز در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول ۳-۲: مقادیر مجاز تلفات کرونا در واحد طول خط برای سطوح ولتاژی مختلف

۴۰۰	۲۳۰	۱۳۲	ولتاژ خط (کیلوولت)
۱/۰۶۲۵	۰/۶۲۵	۰/۰۶۲۵	تلفات کرونای سه فاز (کیلووات بر کیلومتر)

کرونا در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت قابل توجه نمی‌باشد. تلفات کرونا در هوای خوب را می‌توان از رابطه (۲۱-۲) به دست آورد.

$$P_C = 3 \times 20.9 \times 10^{-6} \frac{fV^2F}{\left[\log \left(\frac{2GMD}{d} \right) \right]^2} \cdot L \quad (21-2)$$

در این رابطه P_C تلفات کرونای خط در هوای خوب (کیلووات)، L طول خط (کیلومتر)، f فرکانس (هرتز)، V ولتاژ موثر فاز به زمین (کیلوولت)، d قطر هادی، GMD فاصله متوسط هندسی فازها و F ضریب کرونا است که از جدول (۳-۲) به دست می‌آید.

جدول ۲-۴: ضریب کرونا برحسب نسبت V/V_0

V/V_0	F	V/V_0	F	V/V_0	F	V/V_0	F
1.00	0.037	1.26	0.120	1.52	1.10	1.78	4.72
1.02	0.039	1.28	0.136	1.54	1.80	1.80	4.95
1.04	0.042	1.30	0.154	1.56	1.59	1.82	5.17
1.06	0.046	1.32	0.176	1.58	1.88	1.84	5.39
1.08	0.048	1.34	0.200	1.60	2.20	1.86	5.60
1.10	0.052	1.36	0.220	1.62	2.52	1.88	5.81
1.12	0.057	1.38	0.260	1.64	2.83	1.90	6.01
1.14	0.063	1.40	0.30	1.66	3.13	1.92	6.21
1.16	0.069	1.42	0.39	1.68	3.42	1.94	6.41
1.18	0.072	1.44	0.48	1.70	3.70	1.96	6.61
1.20	0.082	1.46	0.68	1.72	3.97	1.98	6.81
1.22	0.092	1.48	0.74	1.74	4.25	2.00	7.00
1.24	0.105	1.50	0.90	1.76	4.48		

V_0 ولتاژ شروع کرونا است که از رابطه (۲-۲۲) به دست می‌آید:

$$V_0 = 21.1 \times m \times r \times (\delta_d)^{\frac{2}{3}} \times \text{Ln} \frac{\text{GMD}}{r} \quad (2-22)$$

m ضریبی است که برای هادی‌های رشته‌ای بین 0.83 (برای هادی فرسوده) تا 0.88 (برای هادی نو) انتخاب می‌شود. δ_d

ضریب چگالی هوا بوده و برابر است با:

$$\delta_d = \frac{3.92 \times b}{273 + T_m} \quad (2-23)$$

در این رابطه b فشار هوا (سانتی‌متر جیوه) و T_m حداکثر دمای محیط ($^{\circ}\text{C}$) است.

۲-۶-۳- انتخاب نهایی هادی

پس از اینکه نوع هادی و تعداد باندل انتخابی در همه مراحل بخش ۲-۶-۲ مورد تأیید قرار گرفت می‌توان امکان استفاده از انواع دیگر هادی با تعداد باندل متفاوت را مورد سنجش قرار داد. در این مرحله در صورتی که اطلاعات دقیق‌تر جهت محاسبه تغییر سرمایه‌گذاری اولیه (هزینه‌های تهیه و نصب هادی، برج و فونداسیون) و تغییر ارزش حال هزینه‌های جاری (تلفات، تعمیر و نگهداری) با تغییر نوع هادی و تعداد باندل در دست باشد می‌توان طرح را از نظر اقتصادی بهینه کرد. برای آشنایی با نحوه محاسبات اقتصادی می‌توان از مرجع [۹] استفاده نمود.

پس از نهایی‌شدن نوع هادی و تعداد باندل می‌توان تلفات انرژی (اهمی) سالیانه خط را محاسبه نمود (البته در صورتی که محاسبات اقتصادی صورت گرفته باشد تلفات انرژی گزینه مورد نظر قبلاً مشخص شده است). بدین منظور باید ابتدا مقداری برای ضریب بار LF انتخاب نمود و سپس ضریب تلفات LSF را محاسبه کرد. برای محاسبه ضریب تلفات برحسب ضریب بار مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است [۱]. یک مدل عبارت است از:

$$\text{LSF} = a \cdot \text{LF}^2 + (1 - a) \cdot \text{LF} \quad (2-24)$$

مقدار a برای سه گروه از مصرف‌کنندگان مطابق زیر پیشنهاد شده است:

- مصارف صنعتی بزرگ $a = 0/98$

- متوسط شبکه سراسری $a = 0/95$

- مصارف مناطق گرمسیری $a = 0/8$

مدل دیگر به صورت رابطه (۲-۲۵) بیان می‌شود [۱]:

$$LSF = K_L \cdot LF^2$$

(۲-۲۵)

مقدار K_L را می‌توان از جدول (۲-۵) تعیین نمود:

جدول ۲-۵: ضریب K_L برای محاسبه ضریب تلفات برحسب ضریب بار

مقدار K_L	محدوده ضریب بار	نوع مصرف
۱/۰۳	۰/۷ - ۰/۸	مناطق صنعتی
۱/۰۶	۰/۶ - ۰/۷	شهرهای بزرگ
۱/۰۹	۰/۵ - ۰/۶	شهرهای متوسط
۱/۱۱	۰/۴ - ۰/۵	مناطق کشاورزی
۱/۱۲	۰/۳ - ۰/۴	مناطق گرمسیری
۱/۰۸	حدود ۰/۶	متوسط بار شبکه سراسری

اکنون می‌توان میزان انرژی تلف شده در خط در طی یک سال را به دست آورد.

$$W_y = (P_L \times LSF + P_C) \times C_L \times 8760 \quad (۲-۲۶)$$

W_y اتلاف انرژی سالیانه خط (کیلووات ساعت) و C_L تعداد مدار خط است. تلفات کرونای خط برابر با مقدار آن در هوای خوب

در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای الکتریکی خط از روابط زیر حاصل می‌شوند.

- حداکثر توان انتقالی P_m (مگاوات)

$$P_m = \frac{V_L^2}{X_L} \quad (۲-۲۷)$$

X_L راکتانس سلفی خط (اهم) و V_L ولتاژ خط (کیلوولت) است.

- توان طبیعی خط P_0 (مگاوات)

$$P_0 = \frac{V_L^2}{Z_1} \quad (۲-۲۸)$$

- توان راکتیو شارژ خط Q (مگاوار)

$$Q = P_0 \sigma \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^2 - 1 \right] \quad (۲-۲۹)$$

P توان انتقالی خط (مگاوات) و σ طول موج طبیعی خط است که از رابطه (۲-۳۰) به دست می‌آید:

$$\sigma = \frac{2\pi fL}{\delta} \quad (۲-۳۰)$$

f فرکانس خط (هرتز) و δ سرعت نور (کیلومتر بر ثانیه) و L طول خط (کیلومتر) می‌باشد.

۲-۶-۴- عملکرد مکانیکی هادی

خط انتقال انرژی علاوه بر تأمین مشخصات الکتریکی دلخواه باید از نظر مکانیکی هم قابل اطمینان باشد. به کمک محاسبات مکانیکی می‌توان با توجه به نیروهای ناشی از انواع بارگذاری، کشش سیم را کنترل نمود.

۲-۶-۴-۱- اسپن طراحی

اسپن طراحی اسپنی است که علاوه بر تأمین ضریب اطمینان کافی برای هادی در سخت‌ترین شرایط آب و هوایی منجر به کمترین هزینه گردد. چنین اسپنی را اسپن اقتصادی نیز می‌نامند. با افزایش طول اسپن تعداد برج‌ها کم می‌شود اما در عوض فلش زیاد شده و بر ارتفاع برج‌ها افزوده می‌گردد. در مقابل با کاهش طول اسپن از ارتفاع هر برج کاسته و بر تعداد برج‌ها افزوده می‌گردد. لذا باید در جستجوی اقتصادی‌ترین اسپن بود. بدین منظور ابتدا باید کلیه اسپن‌هایی که ضریب اطمینان کافی را برای هادی خط فراهم می‌کنند مشخص شوند. سپس برای هر یک از آنها کل وزن برج و فونداسیون لازم برای خط برآورد گردد.

به این ترتیب قیمت خط به ازای اسپن‌های مختلف محاسبه می‌شود و طبیعتاً اسپنی که کمترین هزینه را برای خط به همراه داشته باشد اسپن اقتصادی است. برای تعیین مقدار دقیق اسپن اقتصادی هر پروژه باید باتوجه به قیمت روز تجهیزات و هزینه نصب آنها از برنامه‌های کامپیوتری کمک گرفت. انجام این کار بویژه برای پروژه‌های ولتاژ بالا با مسیر طولانی و شرایط آب و هوایی سنگین پیشنهاد می‌شود. با این حال به عنوان یک راهنمای عملی می‌توان مقادیر زیر را به عنوان اسپن اقتصادی خطوط با ولتاژهای مختلف معرفی نمود.

۶۳ کیلوولت: ۲۵۰ متر

۱۳۲ کیلوولت: ۳۰۰ تا ۳۵۰ متر

۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت: ۴۰۰ متر

برای آشنایی با نحوه تعیین مقدار دقیق اسپن اقتصادی می‌توان به مرجع [۱۰] مراجعه نمود.

۲-۶-۴-۲- محدوده اسپن‌ها

در هنگام برج‌گذاری سعی بر این است که فاصله بین دو برج متوالی برابر اسپن طراحی باشد. با این حال به دلیل پستی و بلندی مسیر و موانع جغرافیایی آن، این امر در پاره‌ای از نقاط مسیر امکان‌پذیر نیست. در صورت عدول از اسپن طراحی، پیشنهاد می‌شود که حتی‌الامکان موارد زیر رعایت شود [۱۱]:

- کوتاهترین اسپن از ۰/۴ برابر اسپن طراحی کمتر نباشد.
- بلندترین اسپن از ۱/۵ برابر اسپن طراحی بیشتر نباشد.
- نسبت دو اسپن مجاور از عدد ۲/۵ بزرگتر نباشد.

به علاوه، برای جلوگیری از اتصال کوتاه فازها به هنگام وقوع نوسانات گالوپینگ باید رابطه (۲-۳۱) بین حداقل فاصله فازها PC (متر) در وسط اسپن، فلش هادی f_m (متر) در حداکثر دما، طول زنجیره مقرر L_1 (متر) و ولتاژ خط V_L (کیلوولت) برقرار باشد [۲]:

$$PC = K_e \sqrt{f_m + L_1} + \frac{V_L}{150} \quad (۲-۳۱)$$

K_e باتوجه به نوع سیم و موقعیت فازها تعیین می‌شود. از جدول (۲-۶) می‌توان ضریب K_e برای هادی‌های ACSR استاندارد ملی را به دست آورد.

جدول ۲-۶: ضریب K_e برای هادی‌های ACSR جهت تعیین حداکثر اسپن الکتریکی

آرایش هادی	هادی‌های عمودی	هادی‌های مثلثی با دو سیم در یک سطح	هادی‌های افقی
Lynx	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶۲
Hawk	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶۲
Squab	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶۲
Starling	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶۲
Canary	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶۲
Curlew	۰/۷	۰/۶۲	۰/۶
Grackle	۰/۷	۰/۶۲	۰/۶

در صورتی که برج (و در نتیجه PC) مشخص باشد می‌توان از رابطه (۲-۳۱) حداکثر فلش مجاز از نظر الکتریکی را به دست آورد و سپس حداکثر اسپن الکتریکی را از رابطه (۲-۳۲) تعیین نمود.

$$S = 2a_b \operatorname{Cosh}^{-1} \left(\frac{f_m}{a_b} + 1 \right) \quad (۲-۳۲)$$

a_b پارامتر منحنی سیم و برابر نسبت کشش سیم به وزن واحد طول آن است. در هنگام برج‌گذاری باید از اسپن‌های بزرگتر از مقدار فوق اجتناب نمود. پس از تهیه جدول کشش-فلش، اسپن‌هایی که در آنها فلش از مقدار مجاز بیشتر می‌شود مشخص خواهد شد.

۲-۶-۴-۳- معادله تغییر وضعیت [۶]

معادله تغییر وضعیت در حقیقت تنظیم کشش و فلش در شرایط آب و هوایی زمان سیم‌کشی است. به عبارت دیگر باید مشخص شود که در هنگام نصب هادی‌های خط در روزهای مختلف سال، کشش و فلش هادی‌ها روی چه مقداری تنظیم شوند تا در بدترین شرایط محیطی (برحسب مورد زمستان یا توفان) کشش هادی‌ها از حد مجاز تجاوز ننماید. با معلوم‌بودن کشش هادی تحت یک شرایط محیطی معین (H_1) می‌توان با استفاده از معادله (۲-۳۳) که به معادله تغییر وضعیت موسوم است کشش هادی در شرایط محیطی متفاوت (H_2) را به دست آورد:

$$H_2^3 + \left[\frac{A.E.S^2.W_1^2}{24H_1^2} + A.E.\alpha.(T_2 - T_1) - H_1 \right] H_2^2 - \frac{A.E.S^2.W_2^2}{24} = 0 \quad (۲-۳۳)$$

در معادله فوق اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر شرایط محیطی اولیه و ثانویه هستند. T دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)، S اسپن تحت بررسی (متر)، A سطح مقطع هادی (میلی‌مترمربع)، W وزن واحد طول هادی با احتساب اثر یخ و باد (در صورت وجود یخ و باد) (کیلوگرم بر متر)، α ضریب انبساط طولی (بر درجه سانتی‌گراد) و E مدول الاستیسیته (کیلوگرم بر میلی‌مترمربع) می‌باشد. در محاسبه وزن واحد طول سیم، وزن واحد طول یخ W_i مستقیماً به وزن واحد طول هادی W_C اضافه و عدد حاصل به صورت برداری با نیروی ناشی از باد بر واحد طول سیم W_w جمع می‌شود. وزن واحد طول یخی با چگالی ρ_i (کیلوگرم بر مترمکعب) و ضخامت t (میلی‌متر) روی سیمی به قطر d (میلی‌متر) برابر است با:

$$W_i = \frac{\pi}{4} [(d+2t)^2 - d^2] \times \rho_i \times 10^{-6} = \pi t(t+d) \times \rho_i \times 10^{-6} \quad (۳۴-۲)$$

چگالی یخ آبدار ۹۱۳ و چگالی یخ خشک ۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود.

اگر فشار باد W_{wn} (کیلوگرم بر مترمربع) فرض شود نیروی وارد از آن بر یک متر از هادی به قطر d و ضخامت یخ t برابر است با:

$$W_w = W_{wn} \times (d+2t) \times 10^{-3} \quad (۳۵-۲)$$

در روابط فوق W_w ، W_C ، W_i بر حسب کیلوگرم بر متر می‌باشند. در نهایت وزن واحد طول هادی با احتساب نیروی باد و وزن

یخ از رابطه (۳۶-۲) به دست می‌آید:

$$W = \sqrt{(W_C + W_i)^2 + W_w^2} \quad (۳۶-۲)$$

۲-۶-۴-۴- تهیه جدول کشش - فلش هادی

محاسبات کشش و فلش جهت تعیین حداقل و حداکثر مقدار کشش و فلش سیم در اسپن‌های مختلف، مقادیر کشش سیم در حالات مختلف بارگذاری و تعیین پارامتر منحنی گرم و سرد هادی انجام می‌گیرد. در هر یک از حالات بارگذاری باید حداقلی از ضریب اطمینان درمورد کشش سیم رعایت شود. حالت‌های مختلف بارگذاری و ضریب اطمینان لازم برای هر حالت در جدول (۲-۷) آمده است.

جدول ۲-۷: حالات بارگذاری برای تهیه جدول کشش - فلش و ضرایب اطمینان مربوطه

حالت بارگذاری	ضریب اطمینان
استاندارد	۲/۵
حدی	۲
E.D.S	۵
حداقل دما	۴

به علاوه باید کشش و فلش هادی در شرایط حداکثر دما (با لحاظ کردن اثر پیری سیم) و ۳۰ درصد باد شدید نیز مورد محاسبه قرار گیرد.

برای تهیه جدول کشش - فلش گستره وسیعی از اسپن‌ها در نظر گرفته می‌شود تا همه اسپن‌های ممکن در زمان سیم‌کشی پوشش داده شود. برای کوچکترین اسپن حالت حداقل دما به عنوان حالت مبنا (شرایط اولیه برای معادله تغییر وضعیت) در نظر گرفته شده و باتوجه به حد نهایی کشش هادی و ضریب اطمینان متناظر با حالت حداقل دما (۴)، کشش هادی محاسبه می‌شود. سپس با

استفاده از معادله تغییر وضعیت کشش هادی در سایر حالات بارگذاری به دست می‌آید. اگر ضریب اطمینان رعایت شده در یکی از حالات بارگذاری از مقدار مجاز کمتر باشد آن حالت به عنوان حالت مبنا در نظر گرفته شده و محاسبات تکرار می‌گردد. روال مذکور باید برای همه اسپن‌ها اجرا شود.

۷-۲- محاسبات عایقی

به طور کلی محاسبات عایقی شامل انتخاب مقره (به لحاظ الکتریکی)، بررسی کارایی سیستم حفاظت از صاعقه (با معلوم بودن برج و در نتیجه تعداد سیم‌های گارد و محل آنها روی برج) و طراحی سیستم زمین خط می‌باشد. در این بخش ابتدا نحوه محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج از دیدگاه‌های صاعقه، کلیدزنی و فرکانس قدرت ارائه می‌شود. با معلوم شدن فواصل فوق و نیز تعیین حداقل فاصله خزشی لازم برای مقره (باتوجه به میزان آلودگی محیط) می‌توان مقره را (بدون لحاظ عوامل مکانیکی) انتخاب و با بررسی میزان انحراف آن تحت درصدهای مختلفی از حداکثر شدت باد منطقه عبور خط، نسبت به تأمین فواصل عایقی لازم و مناسب بودن ابعاد برج انتخابی (از نظر عایقی) اطمینان حاصل نمود. در ادامه، معیارهای انتخاب جنس و سطح مقطع سیم محافظ و مقاومت زمین پایه برج مطرح گردیده و نحوه محاسبه میزان کارایی سیستم حفاظت از صاعقه برج مورد بررسی قرار می‌گیرد. چگونگی طراحی سیستم زمین برج از دیگر مباحث مطرح شده در این بخش خواهد بود.

۷-۲-۱- محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه

برای محاسبه فاصله عایقی هادی تا برج از دیدگاه صاعقه روال زیر اجرا می‌شود [۱۲].
الف) در محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه باید از نرخ وقوع ناشی از صاعقه (LSFOR) استفاده نمود. اما به دلیل کوچک بودن مقدار نرخ وقوع قوس ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR) در مقابل نرخ قوس برگشتی (BFR) می‌توان به جای LSFOR از BFR در محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه استفاده نمود. نرخ قوس برگشتی BFR (تعداد قطعی‌های ناشی از قوس برگشتی در هر ۱۰۰ کیلومتر از خط در سال) برای خط مورد نظر انتخاب می‌گردد. هیچ توافق مهندسی روی مقدار پیشنهادی برای BFR وجود ندارد. کمیت مذکور نوعاً در گستره ۰/۱ تا ۵ انتخاب شده و مقدار آن می‌تواند مسائل فنی و اقتصادی خط را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. طراح باید با توجه به اهمیت خط و سطح کرونیک مسیر آن، مقدار مناسبی را انتخاب نماید.
ب) با استفاده از رابطه (۲-۳۷) تعداد متوسط صاعقه‌های برخوردی به هر ۱۰۰ کیلومتر از خط در طی یک سال N_L محاسبه می‌شود.

$$N_L = 0.1N_g (28\bar{h}^{-0.6} + S_g) \quad (۲-۳۷)$$

S_g : فاصله بین دو سیم گارد در محل برج (متر) است. در صورتی که برج یک سیم محافظ داشته باشد $S_g=0$ خواهد بود.

\bar{h} : ارتفاع متوسط سیم محافظ تا زمین در محل برج (متر) است و از رابطه (۲-۳۸) به دست می‌آید:

$$\bar{h} = h_g - \frac{2}{3}f_g \quad (۲-۳۸)$$

h_g : ارتفاع سیم گارد (متر) و f_g فلش سیم گارد در شرایط E.D.S است. در این مرحله از طراحی که هنوز جدول کشش - فلش سیم گارد در دست نیست می توان از h_g به جای \bar{h} استفاده کرد. در این صورت نتایج اندکی محافظه کارانه تر خواهد بود.

N_g : چگالی صاعقه های برخورد کننده به سطح زمین بر حسب تعداد ضربات برخورد کننده به هر کیلومتر مربع از سطح زمین در یک سال است و با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (39-2)$$

T_d سطح کرونیك سالانه در مسیر خط نیرو (تعداد روزهای رعد و برقی در سال) می باشد.

I_C (کیلوآمپر) به دست می آید. بدین منظور ابتدا احتمال اینکه دامنه جریان صاعقه برابر یا بزرگتر از I_C باشد $P(I_C)$ محاسبه می گردد.

$$P(I_C) = \frac{BFR}{0.6N_L} \quad (40-2)$$

سپس I_C از رابطه (۴۱-۲) حاصل می شود.

$$I_C = 31 \left(\frac{1 - P(I_C)}{P(I_C)} \right)^{2.6} \quad (41-2)$$

(ت) ولتاژ جرعه بحرانی اضافه ولتاژ صاعقه یعنی CFO_L برای امواج ضربه $50/12$ میکروثانیه که متناظر با I_C (کیلوآمپر) است از رابطه (۴۲-۲) به دست می آید.

$$CFO_L = \frac{1}{K_{wf}} \left[(1-C)R_e I_C + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} K_{PF} U_m \right] \quad (42-2)$$

در رابطه فوق:

U_m : حداکثر ولتاژ فاز - فاز سیستم (کیلوولت) است که مقدار آن برای سطوح ولتاژی ۶۳ (۶۶)، ۱۳۲، ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت به ترتیب برابر با $5/72$ ، ۱۴۵، ۲۴۵ و ۴۲۰ کیلوولت در نظر گرفته می شود.

C : ضریب کوپلینگ بین سیم های گارد و هادی های فاز است که مقدار پیشنهادی برای آن $0/3$ است.

K_{wf} : ضریب تصحیح شکل موج از $50/12$ به 50 μs است که مقدار $1/31$ برای آن پیشنهاد می شود.

R_e : امپدانس موجی معادل برج (اهم) است که مقدار آن نوعاً در گستره ۱۰ تا ۳۰ اهم انتخاب می شود. در بخش ۲-۷-۹ در مورد این پارامتر توضیح بیشتری داده خواهد شد.

K_{PF} : ضریب اصلاح ولتاژ فرکانس قدرت خط است که به آرایش هادی های فاز و نسبت ولتاژ نامی خط به CFO آن بستگی دارد، که مقدار آن برای مقاصد عملی $0/83$ پیشنهاد می شود.

(ث) حداقل فاصله هوایی مجاز جهت حصول به BFR مطلوب، S_L (متر) از رابطه (۴۳-۲) به دست می آید.

$$S_L = \frac{CFO_L}{605\delta_h} \quad , \quad \delta_h = e^{-\frac{H_L}{8150}} \quad (43-2)$$

که استقامت عایقی فواصل هوایی برج های خط نیرو در برابر امواج ضربه صاعقه با پلاریته منفی برابر 605 کیلوولت بر متر فرض شده است. δ_h ضریب تصحیح ارتفاع و H_L ارتفاع محل نصب خط از سطح دریا (متر) است.

۲-۷-۲- محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای کلیدزنی

برخلاف اضافه ولتاژهای صاعقه که عملاً ارتباط مستقیمی با سطح ولتاژ شبکه ندارند، اضافه ولتاژهای کلیدزنی مستقیماً به ولتاژ شبکه مربوط بوده و با افزایش سطح ولتاژ، نقش این قبیل اضافه ولتاژها در تعیین سطوح عایقی خطوط بیشتر مطرح می‌شود. برای محاسبه فاصله عایقی هادی تا برج براساس اضافه ولتاژهای کلیدزنی می‌بایستی مطابق روال زیر عمل شود [۱۲]:

الف) تعداد قطعی‌های مطلوب خط به ازای دفعات کلیدزنی مشخص (SSFOR) برای خط مورد نظر انتخاب می‌گردد. مقدار معمول ۱ تا ۲ قطعی در هر ۱۰۰ بار کلیدزنی است.

ب) در صورت امکان، با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه توزیع آماری اضافه ولتاژهای کلیدزنی اعمال شده به عایق خط به صورت یک توزیع نرمال با میانگین μ_0 و انحراف معیار σ_0 به دست می‌آید. سپس E_2 از رابطه (۴۴-۲) محاسبه می‌شود.

$$E_2 = \mu_0 + 2.054 \sigma_0 \quad (44-2)$$

E_2 مقدار اضافه ولتاژ کلیدزنی است که احتمال وقوع اضافه ولتاژهای بزرگتر از آن همواره کوچکتر از ۲ درصد است. در صورت عدم دسترسی به اطلاعات آماری اضافه ولتاژهای کلیدزنی می‌توان از مقادیر نمونه استفاده کرد. در حالت کلی برای خطوط انتقالی که کلیدهای قدرت آنها فاقد مقاومت وصل بوده و قادر هستند با سرعت بالا عمل وصل مجدد را انجام دهند مقدار E_2 در حدود ۲/۸ پریونیت است. در صورت مجهزبودن کلیدها به مقاومت وصل مقدار E_2 به حدود ۱/۸ پریونیت کاهش می‌یابد (هر پریونیت معادل $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_m$ است که U_m حداکثر ولتاژ کاری خط می‌باشد). در صورت استفاده از مقادیر نمونه فوق می‌توان σ_0 را از رابطه (۴۵-۲) به دست آورد.

$$\sigma_0 = 0.17(E_2 - 1) \quad (45-2)$$

پ) معیار هماهنگی عایقی $\frac{V_3}{E_2}$ تعیین می‌شود. V_3 ولتاژ استقامت آماری عایقی خط بوده و به اندازه ۳ برابر انحراف معیار استاندارد از CFO ایزولاسیون خط کوچکتر است.

$$V_3 = CFO - 3\sigma_f = CFO \left(1 - \frac{3\sigma_f}{CFO}\right) \quad (46-2)$$

نسبت $\frac{V_3}{E_2}$ از رابطه (۴۷-۲) به دست می‌آید:

$$\frac{V_3}{E_2} = K_f K_G \quad (47-2)$$

K_f و K_G از جدول‌های (۸-۲) و (۹-۲) به دست می‌آید. مقدار $\frac{\sigma_f}{CFO}$ برای عایق خط نوعاً برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود. با این حال مقادیر دیگری نیز برای آن پیشنهاد شده است. n_e تعداد برج‌های معادل خط با لحاظ کردن اثر پروفیل ولتاژ و تعداد برج است که مطابق روابط (۴۸-۲) به دست می‌آید:

$$\begin{cases} n_e = \frac{K_n}{1-\gamma} \cdot \frac{\sigma_f}{CFO} \cdot n_T & \text{if } \gamma < 1 - 0.4 \frac{\sigma_f}{CFO} \\ n_e = n_T & \text{if } \gamma \geq 1 - 0.4 \frac{\sigma_f}{CFO} \end{cases} \quad (48-2)$$

$$\gamma = \frac{E_s}{E_R} = 1 - 0.15(E_2 - 1)$$

K_n تابعی از n_e می‌باشد که به صورت تئوری از روش‌های تکرار به دست می‌آید. با این وجود برای مقاصد عملی و تعداد برج‌های معادل بین ۳۰ تا ۵۰۰ مقدار متوسط K_n برابر ۰/۴ و برای تعداد برج‌های معادل کوچکتر از ۳۰ مقدار متوسط ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود.

n_T تعداد متوسط برج‌های خط و γ نشان‌دهنده نحوه توزیع پروفیل اضافه ولتاژها در امتداد خط می‌باشد. E_R و E_S به ترتیب بیانگر میزان اضافه ولتاژهایی هستند که در یک زمان به عایق ابتدا و انتهای خط اعمال می‌شوند.

جدول ۲-۸: کمیت K_f برای تعیین معیار هماهنگی عایقی $\frac{V_3}{E_2}$ به ازای ۰/۰۵ $\frac{\sigma}{CFO}$

n_e	۱	۵	۱۰	۲۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰
K_f	۰/۱۸۵۰۰	۰/۹۰۰۰۹	۰/۹۱۸۹	۰/۹۳۵۳	۰/۹۵۵۳	۰/۹۶۹۳	۰/۹۸۲۷	۰/۹۹۹۶	۱/۰۱۱۸	۱/۰۳۳۶

جدول ۲-۹: کمیت K_G برای تعیین معیار هماهنگی عایقی $\frac{V_3}{E_2}$

مقدار کمیت K_G با فرض توزیع نرمال برای اضافه ولتاژها و به ازای $\frac{\sigma_0}{E_2}$ برابر با				میزان SSFOR طراحی برحسب تعداد قطعی در هر ۱۰۰ بار کلیدزنی
۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۵	۱۰
۰/۸۱۸۱	۰/۸۷۸۷	۰/۹۱۵۱	۰/۹۳۹۴	۵
۰/۸۸۴۱	۰/۹۲۲۸	۰/۹۴۵۹	۰/۹۶۱۴	۱
۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۵
۱/۰۴۰۹	۱/۰۲۷۳	۰/۰۱۹۱	۱/۰۱۳۶	۰/۲
۱/۰۸۹۷	۱/۰۵۹۸	۱/۰۴۱۹	۱/۰۲۹۹	۰/۱
۱/۱۲۳۶	۱/۰۸۲۴	۱/۰۵۷۷	۱/۰۴۱۲	

(ت) مقداری از CFO که عایق خط باید تحت شرایط محیطی مسیر عبور دارا باشد (CFO_A) تعیین می‌گردد.

$$CFO_A = \frac{V_3}{1 - \frac{3\sigma_f}{CFO}} \quad (۴۹-۲)$$

(ث) حداقل فاصله هوایی مجاز جهت حصول به SSFOR مطلوب S_S (متر) از رابطه (۵۰-۲) محاسبه می‌شود.

$$S_S = \frac{8}{\frac{0.96 \times 3400 k_g (\delta_h)^m}{CFO_A} - 1} \quad (۵۰-۲)$$

δ_{11} ضریب تصحیح ارتفاع (رابطه ۲-۴۳) بوده و k_g ضریب شکل فاصله هوایی می‌باشد. مقدار این ضریب برای فاز میانی برج ۱/۲۵ و برای فازهای بیرونی ۱/۴۵ پیشنهاد شده است. m مطابق روابط (۲-۵۱) به دست می‌آید.

$$m = 1.25G_0(G_0 - 0.2)$$

$$G_0 = \frac{CFO_s}{500S_s} \quad (2-51)$$

$$CFO_s = 0.96k_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{S_s}}$$

باتوجه به دو رابطه اخیر محاسبه S_s مستلزم انجام عملیات مبتنی بر تکرار است. برای این کار ابتدا مقدار S_s از رابطه (۲-۵۰) با فرض $m = 0.5$ به دست می‌آید. سپس از رابطه (۲-۵۱) مقدار جدیدی برای m پیدا شده و با جاگذاری این مقدار جدید در رابطه (۲-۵۰) مجدداً S_s محاسبه می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا مقدار S_s با خطای کوچکی حاصل شود.

۲-۷-۳- محاسبه فاصله عایقی هادی تا برج بر مبنای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت

میان S_p فاصله هادی تا برج و U_{50} ولتاژ فرکانس قدرتی که به احتمال ۵۰ درصد منجر به بروز قوس در فاصله هوایی می‌شود رابطه (۲-۵۲) در شرایط آب و هوایی استاندارد (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال) برقرار است [۱۳].

$$U_{50} = 750 \times \ln(1 + 0.55S_p^{1.2})(1.35K_m - 0.35K_m^2) \quad (2-52)$$

U_{50} برحسب کیلوولت rms و S_p برحسب متر است. ضریب K_m برای فازی که از پنجره برج می‌گذرد (فاز میانی) بین ۱/۲۲ تا ۱/۳۲ بوده و مقدار پیشنهادی برای آن ۱/۲۵ است. برای فازهای کناری K_m بین ۱/۳۶ تا ۱/۵۸ است و مقدار ۱/۴۵ برای آن پیشنهاد می‌شود.

برای لحاظ کردن اثر ارتفاع، ضریب زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب در U_{50} ضرب می‌شود.

$$K_a = e^{m' \left(\frac{H_L}{8150} \right)} \quad (2-53)$$

H_L ارتفاع محل نصب خط از سطح دریا و m' (متر) ضریبی است که برای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت کوتاه مدت برابر با ۱ فرض می‌شود.

۲-۷-۴- محاسبه فاصله عایقی هادی تا برج بر مبنای آلودگی محیط [۱۲]

خاصیت عایقی مقرها در حضور آلودگی همراه با رطوبت به شدت کاهش می‌یابد که این امر منجر به بروز جرقه بر روی سطح مقره می‌شود. ابتدایی‌ترین راه برای مقابله با پدیده آلودگی، افزایش فاصله خزشی زنجیره مقره است. اما استفاده از این روش در مناطق با آلودگی سنگین ممکن است مشکلاتی را به همراه داشته باشد. به عنوان مثال دست یافتن به فاصله خزشی مورد نیاز ممکن است مستلزم استفاده از زنجیره مقره‌های طولی باشد که فواصل هوایی را افزایش می‌دهند و این امر از لحاظ فنی و اقتصادی قابل قبول نمی‌باشد. لذا برای غلبه بر مشکل آلودگی، طراح باید با توجه به مسائل فنی و اقتصادی راهکارهایی چون افزایش فاصله خزشی زنجیره مقره، استفاده از مقره‌های مخصوص مناطق آلوده، شستشوی دوره‌ای، گریسکاری مقره‌ها، استفاده از مقره‌های با لعاب نیمه‌هادی و استفاده از مقره‌های ترکیبی و یکپارچه را محک زده و روش مناسب را انتخاب نماید.

برای محاسبه فاصله خزشی مورد نیاز ابتدا سطح آلودگی منطقه عبور خط تعیین شده و سپس بر مبنای جدول (۲-۱۱) فاصله خزشی نامی CD_1 (میلی متر بر کیلوولت حداکثر ولتاژ فاز - فاز سیستم) مشخص می‌گردد.

جدول ۲-۱۱: فاصله خزشی نامی باتوجه به سطح آلودگی موردانتظار در مسیر خط

سطح آلودگی	سبک	متوسط	سنگین	خیلی سنگین
CD_1	۱۶	۲۰	۲۵	۳۱

اکنون می‌توان کل فاصله خزشی مورد نیاز در زنجیره مقره L_e (میلی متر) را به دست آورد.

$$L_e = U_m \cdot CD_1 \quad (2-54)$$

که U_m حداکثر مقدار مؤثر ولتاژ فاز - فاز فرکانس قدرت سیستم (کیلوولت) است.

۲-۷-۵- انتخاب مقره از نظر الکتریکی

پس از مشخص شدن S_L ، S_S ، S_P و L_e می‌توان مقره را به لحاظ الکتریکی انتخاب نمود. بدین منظور باید توجه داشت که:

- طول زنجیره مقره برای فاز میانی برج باید حداقل ۵ درصد بزرگتر از S_L باشد در حالی که برای فازهای بیرونی باید حداقل برابر با S_L باشد.
- طول زنجیره مقره باید $1/0.5$ تا $1/1$ برابر حداقل فاصله هوایی مجاز S_S باشد [۱۲].

در کشور ما اگرچه از مقره‌های یکپارچه هم استفاده شده و در سال‌های اخیر مقره‌های ترکیبی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند اما مقره‌های بشقابی (عمدتاً پورسلینی و کمتر شیشه‌ای) همچنان مورد استفاده وسیع هستند. برای انتخاب مقره به هنگام استفاده از نوع بشقابی باید ابتدا تعداد بشقاب لازم برای تأمین S_L ، S_S و L_e (باتوجه به دو نکته مندرج در ابتدای این زیربخش) در صورت بکارگیری هر یک از انواع استاندارد بشقاب به دست آید. به این ترتیب طول زنجیره مشخص می‌شود. گزینش نهایی به بعد از انجام محاسبات مکانیکی موکول می‌گردد.

۲-۷-۶- بررسی ارتفاع استاندارد برج

حداقل فاصله مجاز سیم از زمین جهت رعایت ایمنی در پیوست (۲-۲) آمده است. در برج‌های آویزی ارتفاع استاندارد برج انتخابی نباید از مجموع طول مقره آویزی، حداکثر فلش سیم در اسپن طراحی و حداقل فاصله مجاز هادی از زمین کمتر شود. درمورد برج‌های کششی طول زنجیره مقره از مجموع فوق حذف می‌شود.

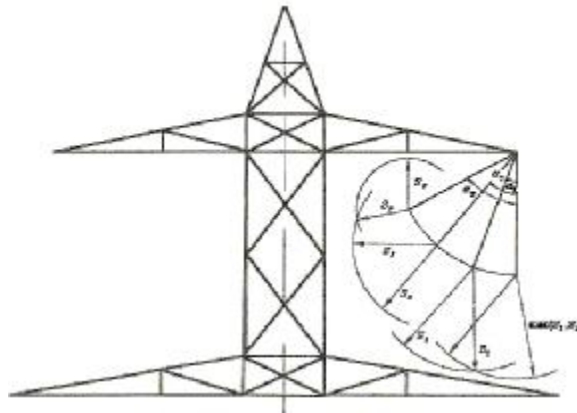
۲-۷-۷- بررسی زوایای انحراف زنجیره مقره

باد و توفان یکی از عوامل موثر بر کاهش فاصله بین فازها یا فاصله فازها با بدنه برج است. با این حال تأثیر باد بر انحراف زنجیره تنها باید در مقره‌های آویزی مورد توجه قرار گیرد. بدین منظور باید ابتدا میزان انحراف زنجیره در اثر وزش باد به دست آمده و سپس تأمین فواصل عایقی تحت انحراف مذکور تحقیق شود. باتوجه به اینکه مثلاً احتمال وقوع صاعقه در حین وزش شدیدترین

باد ناچیز است، جدول (۲-۱۲) برای انتخاب شدت باد و نوع فاصله عایقی که باید تحت باد مذکور رعایت شود پیشنهاد می‌گردد [۱۰] (به شکل ۲-۲ مراجعه شود).

جدول ۲-۱۲: رابطه سرعت باد و زاویه مجاز انحراف زنجیره مفره

سرعت باد	فاصله هوایی بر مبنای	زاویه انحراف
۳۰ درصد باد شدید	اضافه ولتاژ صاعقه (S_L)	α_L
۵۰ درصد باد شدید	اضافه ولتاژ کلیدزنی (S_S)	α_S
۱۰۰ درصد باد شدید	اضافه ولتاژ فرکانس قدرت (S_P)	α_P



شکل ۲-۲: دیاگرام فواصل هوایی روی برج

در حالت عدم انحراف، فاصله عایقی میان هادی و برج باید برابر $\max(S_L, S_S)$ باشد. زاویه انحراف α_d تحت فشار باد W_{wn} (کیلوگرم بر مترمربع) از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\tan \alpha_d = \frac{d \times 10^{-3} \times W_{wn} \times S_{wn} + 2 \times H \times \sin \frac{\alpha}{2}}{W_C \times S_{we} + 0.5 W_{ins}} \quad (۲-۵۵)$$

در این رابطه d قطر هادی (میلی‌متر)، S_{wn} اسپن باد (متر)، H کشش هادی در شرایط مربوطه، W_{wn} فشار باد (کیلوگرم بر مترمربع) α زاویه برج آویزی (درجه)، W_C وزن واحد طول هادی (کیلوگرم بر متر)، S_{we} اسپن وزن (متر) و W_{ins} وزن زنجیره مفره است. در رابطه فوق از نیروی وارد بر سطح زنجیره بر اثر باد چشم‌پوشی شده است. مقدار کشش هادی در شرایط باد شدید و ۳۰ درصد آن در جدول کشش - فلش هادی موجود است. کشش در حالت ۵۰ درصد باد شدید بدون یخ را نیز می‌توان برای اسپن طراحی از معادله تغییر وضعیت به دست آورد.

پس از محاسبه زوایای انحراف در بادهای مختلف با در دست داشتن ابعاد برج می توان فواصل عایقی را بازبینی نمود. با توجه به اینکه در این مرحله هنوز بپراق آلات خط انتخاب نشده اند می توان برای رسم دیاگرام، ۲۰ درصد به طول به دست آمده از بخش ۲-۷-۵ اضافه کرد تا مقدار تقریبی طول بخش معلق زنجیره مقرر و متعلقات آن حاصل شود. در صورتی که ابعاد برج برای رعایت فواصل عایقی مناسب نباشد باید میان دو گزینه تصمیم گیری اقتصادی نمود. امکان اول تغییر برج و استفاده از برج با ابعاد بزرگتر است و امکان دوم استفاده از زنجیره V شکل به جای زنجیره آویزی است که هر دو مورد هزینه های خط را افزایش می دهند اما قاعدتاً گزینه دوم اقتصادی تر خواهد بود.

تعیین رابطه اسپن های باد و وزن برای رعایت فواصل عایقی در بخش محاسبات مکانیکی برج مطرح خواهد شد.

۲-۷-۸- انتخاب سیم محافظ [۱۴]

اگرچه در طراحی و انتخاب سیم محافظ مقاومت الکتریکی کم مطلوب است اما با توجه به اینکه افزایش قطر هادی مزبور سبب گرانی آن می گردد، معمولاً کاهش مقاومت پایه برج و استفاده از سیم محافظ با قطر کمتر ترجیح داده می شود. از طرفی تشکیل برف و یخ روی سیم محافظ سریعتر از هادی خط است زیرا در حالت عادی جریانی از آن نمی گذرد. بنابراین سیم حفاظت از صاعقه باید در مقایسه با دیگر هادی های خط دارای مقاومت مکانیکی بیشتری باشد. بدین منظور از هادی های فولادی با استقامت مکانیکی بالا (HS)، هادی های فولادی با استقامت مکانیکی بسیار بالا (EHS)، هادی های فولادی روکش شده با آلومینیم (ACS) و هادی های آلومینیم فولاد (ACSR) با استقامت مکانیکی بالا استفاده می شود. در مناطق آلوده (طبیعی یا صنعتی) عمدتاً فولاد گالوانیزه (GS) یا هادی های ACS که در مقابل خوردگی مقاوم هستند به کار می رود. در نزدیکی نیروگاه ها و پست های فشارقوی جهت دست یافتن به مقاومت الکتریکی کم می توان از هادی های ACSR با استقامت زیاد استفاده کرد.

۲-۷-۸-۱- ظرفیت جریانی سیم محافظ

سیم محافظ باید بتواند جریانهای ناشی از برخورد صاعقه را تحمل نماید. به علاوه در هنگام بروز اتصال کوتاه های نامتقارن، جریانهای خطا در سیم محافظ نیز برقرار می گردند.

حداقل مقطع لازم برای انواع سیم محافظ جهت تحمل جریانهای ناشی از برخورد صاعقه به صورت زیر پیشنهاد می شود:

- برای سیم های حفاظتی از نوع ACS: $A_L > 17\text{mm}^2$
- برای سیم های حفاظتی از نوع EHS: $A_L > 21\text{mm}^2$
- برای سیم های حفاظتی از نوع ACSR: $A_L > 16\text{mm}^2$

حداقل مقطع لازم جهت تحمل جریان های ناشی از بروز اتصال کوتاه نامتقارن به زمین از رابطه (۲-۵۶) به دست می آید:

$$A_{sc} = \frac{I\sqrt{t_c}}{K_s} \quad (۲-۵۶)$$

در رابطه فوق I مقدار موثر جریان فرکانس قدرت عبوری از سیم محافظ (آمپر) و t_c حداکثر زمان رفع خطا (ثانیه) می باشد. K_s ضریبی است که با فرض حداکثر دمای محیطی ۴۰ درجه سانتی گراد برای انواع سیم های محافظ به صورت زیر پیشنهاد می شود:

- برای سیم های حفاظتی از نوع ACS: $K_s = 94$

- برای سیم‌های حفاظتی از نوع EHS: $K_s = 56$
 - برای سیم‌های حفاظتی از نوع ACSR: $K_s = 96$
- نحوه محاسبه جریان اتصال کوتاه قابل تحمل سیم‌های محافظ و تعیین ضریب K_s در پیوست (۲-۳) آمده است.

۲-۷-۸-۲- میزان جریان خطای عبوری از سیم محافظ

جهت تعیین جریان عبوری از سیم محافظ در حین بروز خطای تک فاز به زمین موارد زیر به عنوان اصول کلی پیشنهاد می‌گردد. لازم به ذکر است که اعداد بر مبنای استفاده از یک سیم محافظ ارائه شده‌اند.

• خطاهای مجاور پست

- اگر مقاومت پایه برج کم (در حدود ۵ اهم) باشد از سیم محافظ ۶۰ تا ۸۰ درصد جریان خطا عبور می‌کند.
- اگر مقاومت پایه برج زیاد (۲۰ تا ۳۰ اهم) باشد از سیم محافظ ۹۰ تا ۹۶ درصد جریان خطا عبور می‌کند.

• خطاهای دور از پست

- صرف نظر از مقاومت پایه برج می‌توان فرض کرد که حداکثر ۸۰ درصد جریان خطا از سیم محافظ عبور می‌کند. علاوه بر موارد فوق توجه به نکات زیر نیز می‌تواند مفید واقع گردد:
- در صورت استفاده از دو سیم محافظ برای خط، درصدهای مذکور برای هر سیم نصف می‌شود.
- میزان جریان اتصال کوتاه تک فاز به زمین ۸۰ درصد سطح اتصال کوتاه سیستم فرض می‌شود.
- از آنجایی که جریان عبوری از سیم‌های حفاظت از صاعقه در نزدیکی پست با مقدار آن در فواصل دورتر متفاوت می‌باشد 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. امکان دیگر استفاده از سیم محافظ با مقطع یکسان در کل طول خط و در عوض کاهش مقاومت پایه برج‌ها در نزدیکی پست است.

۲-۷-۹- تعیین مقاومت پایه برج

مقدار مقاومت پایه برج بر عملکرد عایقی خط (از نظر اضافه ولتاژهای صاعقه) تأثیر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. به علاوه (همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد) بر سطح مقطع سیم محافظ انتخابی نیز تا حدودی موثر است. در این بخش روشی جهت انتخاب مقداری بهینه برای مقاومت پایه برج ارائه می‌شود.

برای R_e در معادله (۲-۴۲) مقدار ۱۰ تا ۳۰ اهم پیشنهاد شد. R_e امپدانس معادل مسیر عبور جریان صاعقه از سر برج تا زمین (زمین بی‌نهایت) است که از رابطه (۲-۵۷) به دست می‌آید [۱۵]:

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i} \quad (2-57)$$

Z_g مقاومت موجی سیم گارد (با مقدار نوعی ۴۰۰ اهم) و R_i مقاومت موجی پایه برج است. R_e مستقیماً در معادله (۲-۴۳) وارد شده و مقدار آن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار CFO_L دارد. برای تعیین مقداری مناسب برای مقاومت پایه برج دو حالت را در نظر می‌گیریم.

• **حالتی که اضافه ولتاژ صاعقه تعیین‌کننده طول مقره است.**

در این حالت باید میان کاهش مقاومت پایه برج و افزایش طول مقره مصالحه‌ای اقتصادی صورت گیرد. به این ترتیب که براساس انتخاب اولیه R_e (در محاسبات بخش ۲-۷-۱) با توجه به قیمت‌های روز، هزینه تأمین تجهیزات و نصب سیستم زمین برج‌ها برای دستیابی به مقاومت معادل R_e برآورد و با هزینه مقره و سیم محافظ نظیر آن جمع شود. سپس با تکرار محاسبات به ازای R_e های مختلف مقدار بهینه آن حاصل گردد. به عنوان یک راهنمای کلی و تقریبی می‌توان گفت که کاهش مقاومت پایه برج تا حدود ۱۰ اهم احتمالاً اقتصادی‌تر از افزایش طول مقره خواهد بود. ابتدا مقدار مقاومت موجی پایه برج یعنی R_i از رابطه (۲-۵۸) به دست می‌آید:

$$R_i = \frac{R_e Z_g}{Z_g - 2R_e} \quad (2-58)$$

در صورت استفاده از کانترپویز برای طراحی سیستم زمین می‌توان R_i را مساوی با مقاومت نشتی کانترپویز فرض و طول لازم برای کانترپویز را محاسبه نمود. سپس با در نظر گرفتن هزینه تهیه و نصب هر متر کانترپویز محاسبات اقتصادی انجام می‌شود. اما در صورتی که جریان عبوری از پایه برج بتواند خاک را یونیزه کند مقاومت موجی میله‌های زمین (R_i) از مقاومت عادی (اندازه‌گیری شده در جریانهای کوچک فرکانس پایین) آنها (R_0) کوچکتر خواهد بود. لذا برای تعیین مقدار R_0 لازم روال زیر انجام می‌شود. الف) پس از محاسبه R_i مقدار I_R از رابطه (۲-۵۹) به دست می‌آید. I_R بخشی از جریان صاعقه است که در پایه برج ضربه دیده جاری می‌شود.

$$I_R = \frac{R_e}{R_i} I_C \quad (2-59)$$

ب) I_g برحسب R_0 به دست می‌آید. I_g جریانی است که به ازای مقادیر بیش از آن خاک اطراف میله یونیزه می‌شود.

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho E_0}{R_0^2} \quad (2-60)$$

در این رابطه E_0 گرادیان ولتاژ بحرانی شکست خاک (نوعاً ۴۰۰ kV/m) و ρ مقاومت مخصوص خاک (اهم‌متر) است.

پ) با جاگذاری I_g از بند "ب" در رابطه (۲-۶۱) و معلوم‌بودن R_i مقدار R_0 حاصل می‌شود.

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (I_R / I_g)}} \quad \text{if} \quad I_R > I_g \quad (2-61)$$

پس از به دست آوردن R_0 باید I_g را نیز محاسبه و بررسی کرد که آیا رابطه $I_R > I_g$ برقرار است یا نه. در صورتی که سهم پایه برج از جریان صاعقه برای یونیزه کردن خاک اطراف میله کافی باشد ($I_R > I_g$) می توان طراحی و محاسبه هزینه سیستم زمین را بر مبنای دست یابی به مقاومت $R_0 > R_i$ انجام داد. در غیر این صورت طراحی و محاسبه هزینه براساس $R_0 = R_i$ انجام می گیرد.

• حالتی که اضافه ولتاژ صاعقه تعیین کننده طول مقره نمی باشد.

در این حالت پس از محاسبه طول مقره می توان مقدار فاصله عایقی به دست آمده میان هادی تا برج را برابر S_L قرار داده و R_e نظیر آن را محاسبه نمود. در نتیجه این کار از کاهش بی مورد مقاومت پایه برجها (افزایش هزینه مربوط) جلوگیری می شود. اما در افزایش R_e باید افزایش احتمالی هزینه سیم محافظ (به میزان تقریبی ۲۰ درصد) در مجاورت پست را نیز مدنظر قرار داد. به علاوه این احتمال وجود دارد که با افزایش S_L فاصله عایقی لازم بین هادی و برج در حالت انحراف زنجیره مقره (تحت ۳۰ درصد باد شدید) تأمین نشود. لذا این مسأله نیز باید مورد بررسی قرار گیرد.

۷-۱۰- بررسی کارایی سیستم حفاظت از صاعقه [۱۴]

اصولاً سیستم حفاظت از صاعقه جهت جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه به هادی های فاز خطوط نیرو ایجاد می گردد. چنانچه دامنه جریان صاعقه برخورد کننده به هادی های فاز کمتر از مقدار مشخصی (جریان بحرانی) باشد صاعقه مذکور برای عایق خط مشکلی ایجاد نمی کند. لذا هادی های فاز را باید تنها در مقابل صاعقه هایی با جریان بیش از مقدار بحرانی حفاظت نمود. طراحی سیستم حفاظت از صاعقه ای که بتواند از برخورد تمامی صاعقه های مذکور به هادی ها جلوگیری کند در عمل غیراقتصادی است. لذا مقدار مطلوب نرخ جرقه ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه (SFFOR) عددی غیر صفر انتخاب می شود. مقدار انتخابی تابعی از اهمیت خط بوده و معمولاً برای خطوط مهم ۰/۰۵ پیشنهاد می شود. در حالی که براساس SFFOR برابر ۲ نیز طراحی هایی انجام گرفته است [۱۵].

طراحی سیستم حفاظت از صاعقه در اصل شامل تعیین تعداد و محل سیم های محافظ است. اما هنگامی که برج انتخاب شده باشد عملاً دو پارامتر فوق معلوم اند. لذا در این مرحله از طراحی، SFFOR خط محاسبه و با مقدار مطلوب مقایسه می شود. در صورتی که برج مذکور نتواند حفاظت مورد نظر را تأمین نماید ابتدا امکان افزایش ارتفاع محل سیم محافظ بر روی برج را بررسی نمود. در صورتی که این امر امکان پذیر و یا مضمثمر نباشد باید در انتخاب برج تجدیدنظر شده و مراحل طراحی تکرار گردد. در ادامه روالی برای محاسبه SFFOR خط پیشنهاد می گردد. بدین منظور ابتدا نمادهای مورد استفاده معرفی می شوند.

- y_t : ارتفاع هادی تا زمین در محل برج (متر)

- \bar{y} : ارتفاع متوسط هادی تا زمین در طول خط (متر)

- h_g : ارتفاع سیم محافظ تا زمین در محل برج (متر)

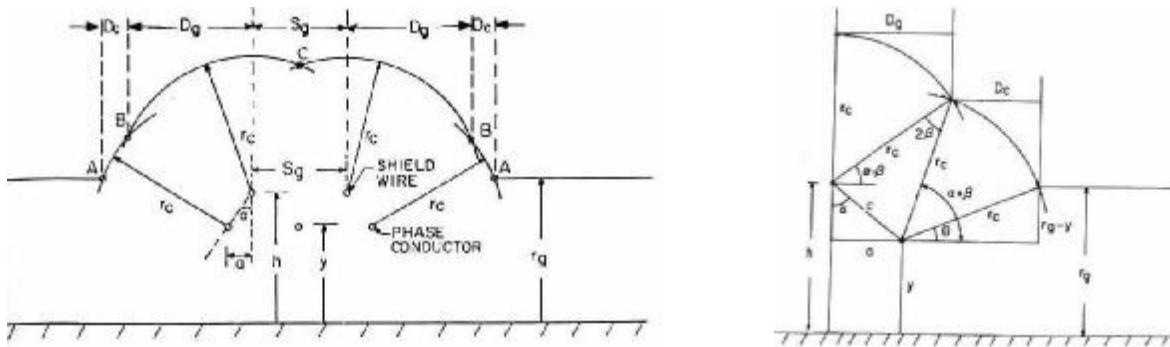
- \bar{h} : ارتفاع متوسط سیم محافظ تا زمین در طول خط (متر)

- S_g : فاصله بین دو سیم گارد روی برج (متر)

- f_c : فلش هادی در شرایط EDS

- f_g : فلش سیم محافظ در شرایط EDS

- a: فاصله افقی سیم محافظ تا هادی کناری خط (متر)
 - r_g : فاصله برخورد صاعقه به زمین (متر)
 - r_c : فاصله برخورد صاعقه به هادی فاز و سیم‌های محافظ (متر)
 - I: جریان ضربه بازگشتی صاعقه (کیلوآمپر)
 - D_c : فاصله رؤیت صاعقه برای هادی فاز (متر)
 - D_g : فاصله رؤیت صاعقه برای سیم‌های محافظ (متر)
 - C: فاصله هادی فاز بیرونی تا نزدیکترین سیم حفاظتی مجاور آن (متر)
 - I_m : حداکثر جریان خطای سیستم حفاظت از صاعقه که به هادی فاز برخورد نخواهد کرد (کیلوآمپر)
 - D_{cc} : فاصله D_c به ازای جریان I_m (متر)
 - r_{gm} : فاصله r_g به ازای جریان I_m (متر)
 - r_{cm} : فاصله r_c به ازای جریان I_m (متر)
 - γ : نسبت $\frac{r_{cm}}{r_{gm}}$
 - I_c : جریان بحرانی که در آن و بالاتر از آن جرعه به وقوع می‌پیوندد (کیلوآمپر)
 - GFD: چگالی صاعقه‌های برخوردی به زمین که با N_g نیز نمایش داده می‌شود. (صاعقه / کیلومتر مربع / سال)
 - Q(I): احتمال اینکه حداکثر دامنه جریان صاعقه در هر بار برخورد برابر یا بزرگتر از I باشد.
 - L: طول خط انتقال (کیلومتر)
 - S_1 : فاصله هوایی هادی از برج که در بخش‌های قبلی به دست آمده است (متر) $S_1 = \max(S_L, S_S)$
- شکل زیر برخی از موارد فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: دیاگرام سیستم حفاظت از صاعقه خطوط هوایی انتقال نیرو

روال محاسبه SFFOR:

الف) محاسبه N_g : N_g مطابق با رابطه (۳۹-۲) محاسبه می‌شود.ب) محاسبه I_c :

$$\bar{y} = y_t - \frac{2}{3} f_c \quad (۶۲-۲)$$

$$\bar{h} = h_g - \frac{2}{3} f_g \quad (۶۳-۲)$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (۶۴-۲)$$

$$CFO = 605 \times S_1 \quad (۶۵-۲)$$

$$I_c = \frac{2(CFO)}{Z_1} \quad (۶۶-۲)$$

پ) محاسبه D_{cc} :

$$r_c = 7.1 I_c^{0.75} \quad (۶۷-۲)$$

$$r_g = 6.4 I_c^{0.75} \quad (۶۸-۲)$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{r_g - \bar{y}}{r_c} \quad (۶۹-۲)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h - y} \quad (۷۰-۲)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{(\bar{h} - \bar{y}) \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}{2r_c} \quad (۷۱-۲)$$

$$D_{cc} = r_c [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)] \quad (۷۲-۲)$$

ت) محاسبه I_m :

$$r_{gm} = 6.4 (I_m)^{0.75}, \quad r_{cm} = 7.1 (I_m)^{0.75} \Rightarrow \gamma = \frac{r_{cm}}{r_{gm}} = \frac{7.1}{6.4} = 1.1094 \quad (۷۳-۲)$$

$$r_{gm} = \frac{(\bar{h} + \bar{y}) / 2}{1 - \gamma \sin \alpha} \quad (۷۴-۲)$$

$$I_m = \left(\frac{\Gamma_{gm}}{6.4}\right)^{\frac{1}{0.75}} \quad (75-2)$$

ث) محاسبه SFFOR: ابتدا در رابطه (۷۶-۲) با جاگذاری I_c و I_m در I به ترتیب Z_c و Z_m به دست می‌آیند.

$$\begin{cases} Z = \frac{\ln\left(\frac{I}{m}\right)}{\beta} \\ m = 64.1, \quad \beta = 1.33 & I \leq 20 \text{ kA} \\ m = 33.1, \quad \beta = 0.605 & I > 20 \text{ kA} \end{cases} \quad (76-2)$$

سپس در رابطه (۷۷-۲)، I_c و I_m در I و Z_c و Z_m در Z جایگذاری می‌شوند تا $Q(I_c)$ و $Q(I_m)$ به دست آیند.

$$\begin{cases} Q(I) = 1 - 0.31e^{-\frac{Z^2}{1.6}} & 3 \leq I < 20 \text{ kA} \\ Q(I) = 0.5 - 0.35Z & 20 \leq I < 60 \text{ kA} \\ Q(I) = 0.278e^{-\frac{Z^2}{1.7}} & 60 \leq I < 200 \text{ kA} \end{cases} \quad (77-2)$$

در نهایت SFFOR از رابطه (۷۸-۲) به دست می‌آید:

$$SFFOR = N_g LD_{cc} [Q(I_c) - Q(I_m)] \quad (78-2)$$

۲-۷-۱۱- تهیه جدول کشش - فلش سیم محافظ

در این مرحله جدول کشش _ فلش سیم محافظ مشابه با جدول نظیر برای هادی تهیه می‌گردد با این تفاوت که می‌توان ضریب اطمینان لازم برای سیم محافظ در شرایط بارگذاری حدی را $1/6$ در نظر گرفت.

به علاوه کنترل فاصله هوایی بین هادی و سیم محافظ در شرایط مختلف بارگذاری الزامی است. به عبارت دیگر فاصله بین سیم محافظ و هادی روی برج‌ها باید طوری انتخاب شود که فاصله آن دو در وسط اسپن با توجه به متفاوت بودن فلش این دو سیم در حالات مختلف بارگذاری از بیشترین مقدار فاصله عایق لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه (S_L)، اضافه ولتاژهای کلیدزنی (S_S) و اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت (S_P) کمتر نگردد [۱۶]. از آنجا که سیم محافظ به برج (زمین) متصل است فاصله مجاز بین هادی و آن مطابق با بخش ۲-۷-۳ تعیین می‌شود. برای کنترل رعایت فاصله لازم باید رابطه (۷۹-۲) برقرار باشد:

$$f_c + a - f_g = C \geq \text{Max}(S_L, S_P, S_S) \quad (79-2)$$

f_c و f_g به ترتیب فلش هادی و فلش سیم محافظ در شرایط بارگذاری مورد بررسی و a فاصله هادی و سیم محافظ در محل برج می‌باشد. رابطه اخیر فرض می‌کند هادی زیر سیم گارد قرار گرفته و فاصله افقی آنها صفر باشد. جهت سادگی و جامع بودن

بررسی کافی است کنترل فاصله بین هادی و سیم محافظ به ازای اسپین حداقل، طراحی و حداکثر انتخاب شده برای برج آویزی خط و در شرایط بارگذاری روزانه (EDS)، ۳۰ درصد باد شدید (رعدوبرق) و بارگذاری یخ و باد (سیم محافظ در بارگذاری یخ و باد و سیم هادی در حالت باد بدون یخ) انجام گیرد.

- شرایط EDS

در این حالت حداقل فاصله هوایی مورد نیاز در وسط اسپین بین سیم هادی و محافظ برای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که بعضی از طراحان صرفاً رعایت ۸۰ درصد فلش هادی برای سیم محافظ در شرایط EDS را برای کنترل فاصله هوایی در وسط اسپین کافی می‌دانند.

- حالت یخ و باد نامتعادل

در این حالت فرض می‌شود که یخ نشسته روی هادی به دلیل عبور جریان و گرم شدن آن زودتر از سیم محافظ بيفتد و در نتیجه فاصله هوایی موجود بین هادی و سیم محافظ در وسط اسپین کاهش یابد. برای بررسی این وضعیت، فلش هادی در حالت بدون یخ و فلش سیم محافظ در حالت یخ و باد و به ازای مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر اسپین خط برای محاسبه فاصله دو سیم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۷-۱۲- طراحی سیستم زمین

پس از مشخص شدن مقدار لازم برای مقاومت پایه برج (در فرکانس قدرت) می‌توان طراحی سیستم زمین را بر مبنای استفاده از میله‌های زمین و یا کانتربویز انجام داد [۱۷].

۲-۷-۱۲-۱- طراحی سیستم زمین با استفاده از میله‌های زمین

میله‌های زمین عمدتاً از جنس فولاد پوشیده با مس و بعضاً از جنس فولاد گالوانیزه با قطرهای ۱۶، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر و طول‌های ۱/۵، ۲ و ۳ متر ساخته می‌شوند. مقاومت زمین یک میله زمین برابر است با:

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi L_R} \left(\ln \frac{4L_R}{a_R} - 1 \right) \quad L_R \gg a_R \quad (۸۰-۲)$$

در این رابطه ρ مقاومت مخصوص خاک (اهم‌متر)، L_R طول میله (متر) و a_R شعاع میله (متر) است. مقاومت زمین را می‌توان با اتصال موازی میله‌های زمین کاهش داد. اگر فاصله بین میله‌ها در مقایسه با طول آنها بزرگ باشد مقاومت معادل متناسب با تعداد میله‌ها کاهش می‌یابد. اما اگر میله‌ها به یکدیگر نزدیک باشند مقاومت معادل متناسب با تعداد آنها کم نمی‌شود. در حالت کلی می‌توان مقاومت معادل n میله زمین مشابه و موازی را از رابطه (۸۱-۲) به دست آورد:

$$R_n = \frac{1}{n} R_0 + \frac{2}{n^2} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n R_{ij} \quad (۸۱-۲)$$

R_0 مقاومت یک میله زمین منفرد و R_{ij} مقاومت متقابل میله‌های i ام و j ام بوده و از رابطه (۸۲-۲) به دست می‌آید:

$$R_{ij} = \frac{\rho}{2\pi L_R} f(S_{ij}) \quad (۸۲-۲)$$

که در آن S_{ij} فاصله افقی میله i ام و j ام می‌باشد. در حالتی که میله‌ها روی محیط دایره‌ای به قطر D قرار گرفته باشند. فاصله دو میله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{ij} = D \sin \left[(j-i) \frac{\pi}{n} \right] \quad (83-2)$$

تابع f نیز به صورت رابطه (84-2) بیان می‌گردد:

$$f(x) = \ln \frac{2L_R (\sqrt{x^2 + (2L_R)^2} + x - \sqrt{x^2 + (2L_R)^2})}{x} + \frac{x - \sqrt{x^2 + (2L_R)^2}}{2L_R} \quad (84-2)$$

برای پرهیز از پیچیدگی و به دست آوردن دیدی کلی در آغاز محاسبه، یک قاعده مفید این است که اگر تعداد ۲ تا ۲۴ الکتروود را با فاصله طول یک الکتروود از یکدیگر قرار دهیم به گونه‌ای که اشکالی نظیر مثلث، دایره یا مربع‌های توخالی تشکیل دهند مقاومت مجموعه، $\frac{1}{n}$ مقاومت یک الکتروود ضربدر ضریب F_b است که از جدول (۱۳-۲) به دست می‌آید.

جدول ۱۳-۲: ضرایب محاسبه مقاومت معادل الکتروودهای موازی

F_b	تعداد میله‌ها
۱/۱۶	۲
۱/۲۹	۳
۱/۳۶	۴
۱/۶۸	۸
۱/۸۰	۱۲
۱/۹۲	۱۶
۲/۰۰	۲۰
۲/۱۶	۲۴

۷-۱۲-۲- طراحی سیستم زمین با استفاده از کانترپویز

مقاومت زمین یک سیم افقی به طول L_c و شعاع a_c که در عمق d از سطح زمین و موازی با خط انتقال قرار می‌گیرد برابر است با:

$$R_0 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left(\ln \frac{2L_c}{\sqrt{2a_c d}} - 1 \right) \quad (85-2)$$

در رابطه اخیر ابعاد برحسب متر و ρ برحسب اهم‌متر می‌باشد. ملاحظه می‌شود که قطر کانترپویز و عمق دفن تأثیر چندانی بر مقاومت کانترپویز ندارند ولی تغییر طول سیم مقاومت آن را به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد.

هر کانترپویز دارای یک امپدانس موجی اولیه است. اگر کانترپویزهای بلند یا پیوسته به کار روند مقاومت موجی اولیه معمولاً از مقاومت نشستی بزرگتر است. مقدار امپدانس موجی اولیه تا حدودی به شرایط خاک بستگی دارد اما اغلب در گستره ۱۵۰ تا ۲۰۰ اهم قرار می‌گیرد. وقتی موج در طول کانترپویز حرکت می‌کند مقاومت موجی اولیه به تدریج کاهش می‌یابد تا مقاومت سیم به مقدار نشستی آن برسد. مطلوب این است که امپدانس موجی اولیه حتی‌الامکان کوچک شود و زمان کاهش آن تا مقدار مقاومت نشستی کانترپویز نیز کاهش یابد. بدین منظور پیشنهاد می‌شود به جای یک کانترپویز بلند چند کانترپویز کوتاه مورد استفاده قرار گیرد.

شایان ذکر است که مقاومت نشستی کانتریپوز حتماً باید از امیدانس موجی اولیه آن کوچکتر باشد. در غیراین صورت موج سیار در پای برج بزرگتر می‌شود.

برای محاسبه مقاومت معادل n سیم که طول و شعاع هر یک به ترتیب L و a (متر) بوده و به طور شعاعی و متقارن در عمق d (متر) آرایش یافته‌اند (یعنی زاویه بین همه زوج سیم‌های مجاور یکسان است) می‌توان از رابطه (۸۶-۲) استفاده نمود:

$$R_n = \frac{\rho}{n\pi L_c} \left[\text{Ln} \frac{2L_c}{\sqrt{2a_c d}} + 1 + \sum_{i=1}^{n-1} \text{Ln} \frac{1 + \text{Sin}(i\pi/n)}{\text{Sin}(i\pi/n)} \right] \quad (۸۶-۲)$$

۸-۲-۱- بررسی عملکرد مکانیکی خط

اجزاء مختلف یک خط نیرو در معرض نیروهای گوناگونی می‌باشند و برای طراحی یک خط آشنایی با انواع این نیروها و نحوه محاسبه آنها الزامی است. این بخش کلیاتی را در مورد بارگذاری برج‌ها، منحنی‌های کاربردی و انتخاب مقرها و یراق‌آلات از دیدگاه مکانیکی دربر می‌گیرد. به علاوه نوسانات هادی‌های خطوط و روش کاهش آثار مخرب آنها مورد اشاره اجمالی قرار می‌گیرد.

۸-۲-۱-۱- بارگذاری برج

محاسبات بارگذاری برج‌ها براساس شرایط آب و هوایی منطقه صورت می‌گیرد. در جدول (۱۴-۲) حالاتی که باید در هر یک از انواع شرایط آب و هوایی مورد توجه قرار گیرد آمده است [۱۸].
نیروهای وارد بر برج عبارتند از: نیروهای قائم F_v ، عرضی (افقی) F_t و طولی F_L که در زیر نحوه محاسبه این نیروها در دو حالت بارگذاری متعادل و نامتعادل ارائه می‌شود.

۸-۲-۱-۱-۱- محاسبه نیروها در حالت بارگذاری متعادل [۱۸]

الف) نیروی قائم: نیروهای قائم وارد بر برج ناشی از هر فاز عبارتند از:

- وزن هادی: این نیرو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_c = W_c \times S_{we} \times n_b \quad (۸۷-۲)$$

W_c وزن واحد طول هادی (کیلوگرم بر متر)، S_{we} اسپن وزن (متر) و n_b تعداد باندل است.

- وزن یخ روی هادی: این نیرو از رابطه (۸۸-۲) به دست می‌آید:

$$V_i = W_i \times S_{we} \times n_b \quad (۸۸-۲)$$

W_i وزن واحد طول یخ (کیلوگرم بر متر) است که از رابطه (۳۴-۲) به دست می‌آید.

- وزن مقره و یراق‌آلات متصل به آن که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{fi} = (V_{ins} \times n_i + V_f) \times i \quad (۸۹-۲)$$

در این رابطه V_{fi} وزن زنجیره مقره و یراق‌آلات متصل به آن (کیلوگرم)، V_{ins} وزن یک بشقاب مقره (کیلوگرم)، n_i تعداد بشقاب در زنجیره، V_f وزن یراق‌آلات (کیلوگرم) و i تعداد ست زنجیره در محل اتصال یک فاز به برج است. ضریب i در برج‌های آویزی ۱ و در برج‌های کششی برابر ۲ می‌باشد. در رابطه فوق از وزن یخ روی زنجیره مقره چشم‌پوشی شده است.

باتوجه به روابط (۸۷-۲) تا (۸۹-۲) نیروی قائم وارد بر برج از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_v = (V_c + V_i + V_{\bar{h}}) \times S.F_v \quad (۹۰-۲)$$

F_v کل نیروی قائم وارد بر برج (کیلوگرم) و $S.F_v$ ضریب اضافه بار نیروهای قائم است. ضرایب اضافه بار در جدول (۱۵-۲) داده شده‌اند.

جدول ۲-۱۴: شرایط بارگذاری برای مناطق چهارگانه آب و هوایی کشور

نوع منطقه	نوع بارگذاری	ضخامت یخ (mm)	باد $m/s(kg/m^2)$	
سبک	بارگذاری متعادل	استاندارد	۲۸ (۵۰)	
		حدی	۴۵ (۱۲۶)	
	بارگذاری غیرمتعادل	بار طولی نامتعادل: پارگی سیم در باد شدید	۶	۲۲ (۳۰)
		بار طولی متعادل: - یخ و باد در یک طرف اسپن - باد بدون یخ در طرف دیگر	۶	۲۲ (۳۰)
متوسط	بارگذاری متعادل	استاندارد	۲۵ (۴۰)	
		حدی	۴۰ (۱۰۰)	
	بارگذاری غیرمتعادل	بار طولی نامتعادل: پارگی سیم در یخ سنگین	۱۵	۰
		بار طولی متعادل: - یخ و باد در یک طرف اسپن - باد بدون یخ در طرف دیگر	۷	۲۵ (۴۰)
سنگین	بارگذاری متعادل	استاندارد	۲۰ (۲۵)	
		حدی	۴۰ (۱۰۰)	
	بارگذاری غیرمتعادل	بار طولی نامتعادل: پارگی سیم در یخ سنگین	۲۰ - ۲۵ *	۰
		بار طولی متعادل: - یخ و باد در یک طرف اسپن - باد بدون یخ در طرف دیگر	۱۵	۲۵
فوق سنگین	بارگذاری متعادل	استاندارد	۲۰ (۲۵)	
		حدی	۴۰ (۱۰۰)	
	بارگذاری غیرمتعادل	بار طولی نامتعادل: پارگی سیم در یخ سنگین	۳۰ - ۵۰ **	۰
		بار طولی متعادل: - یخ و باد در یک طرف اسپن - باد بدون یخ در طرف دیگر	۲۰	۲۰ (۲۵)

* برای ارتفاع ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از سطح دریا ضخامت یخ ۲۰ میلی‌متر و برای ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر ضخامت یخ ۲۵ میلی‌متر است.

** ارتفاع از سطح دریا ۳۰۰۰ - ۲۵۰۰ متر: ضخامت یخ ۳۰ mm

۳۵۰۰ - ۳۰۰۰ متر: ضخامت یخ ۳۵mm

۴۰۰۰ - ۳۵۰۰ متر: ضخامت یخ ۴۰ mm

۴۵۰۰ - ۴۰۰۰ متر: ضخامت یخ ۵۰ mm

جدول ۲-۱۵: ضرایب اضافه بار برای محاسبات بارگذاری برج

ضرایب اضافه بارهای وارد بر برج			نوع بارگذاری		
S.F _w	S.F _t	S.F _v			
۲/۵	۱/۶۵	۱/۵	باد و یخ و باد متوسط	بارگذاری استاندارد	بارگذاری متعادل
۱/۱	۱/۱	۱/۱	باد شدید	بارگذاری حدی	
۱/۱	۱/۱	۱/۱	یخ سنگین		
۱/۱	۱/۱	۱/۱	پارگی سیم		بارگذاری غیرمتعادل
۱/۱	۱/۱	۱/۱	یخ و باد در یک طرف اسپن و باد بدون یخ در طرف دیگر		

(ب) نیروی افقی: نیروهای افقی وارد بر برج ناشی از هر فاز عبارتند از:

- نیروی افقی حاصل از فشار باد بر سطح هادی که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_w = W_{wn} \times (d + 2t) \times S_{wn} \times n_b \times 10^{-3} \quad (91-2)$$

T_w نیروی افقی وارد از باد بر سیم، W_{wn} فشار باد در منطقه مورد بررسی (کیلوگرم بر مترمربع)، S_{wn} اسپن باد (متر) و n_b تعداد

باندل می‌باشد.

- نیروی افقی حاصل از فشار باد بر سطح زنجیره مقره که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$T_{if} = W_{wn} \times S_{if} \times i \quad (92-2)$$

T_{if} نیروی افقی وارد از باد بر سطح زنجیره مقره و پراق‌آلات (کیلوگرم)، S_{if} سطح بادخور مجموعه مذکور که ترجیحاً باید از

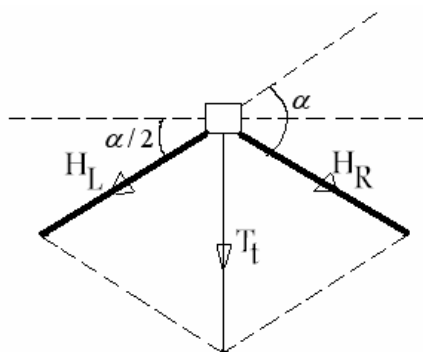
اطلاعات سازنده به دست آید و i تعداد مجموعه زنجیره در محل اتصال یک فاز به برج است که i در برج‌های آویزی برابر ۱ و در برج‌های کششی برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود.

- نیروی افقی حاصل از کشش سیم: در برج‌های زاویه کلاً و در برج‌های آویزی وقتی که برج با زاویه نسبت به امتداد خط طراحی می‌گردد مولفه عرضی نیروی کشش سیم به صورت نیروی افقی ظاهر می‌شود. مقدار این نیرو را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$T_t = (H_L + H_R) \times \sin \frac{\alpha}{2} \times n_b \quad (93-2)$$

T_t نیروی افقی ناشی از زاویه‌داربودن خط (کیلوگرم)، H_L و H_R کشش سیم در اسپن‌های سمت چپ و راست برج (کیلوگرم) و

α زاویه خط است. شکل (۴-۲) نحوه ایجاد T_t را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: نیروی عرضی ناشی از زاویه خط

با فرض تساوی اسپن‌های دو طرف برج تحت بررسی رابطه (۲-۹۳) به صورت زیر درمی‌آید:

$$T_t = 2H \sin \frac{\alpha}{2} \times n_b \quad (۲-۹۴)$$

کل نیروی عرضی وارد بر برج را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$F_t = (T_w + T_{if}) \times S.F_w + T_t \times S.F_t \quad (۲-۹۵)$$

F_t کل نیروی عرضی وارد بر برج (کیلوگرم)، $S.F_w$ ضریب اضافه بار برای نیروهای ناشی از باد و $S.F_t$ ضریب اضافه بار برای نیروی عرضی ناشی از زاویه خط است. لازم به ذکر است که در رابطه فوق نیروی باد وارد بر بدنه برج لحاظ نشده است. این نیرو را می‌توان از روابط موجود در پیوست [۲-۶] محاسبه کرد و در صورت کمبود اطلاعات، باید از اطلاعات سازندگان استفاده نمود.

پ) نیروی طولی

در حالت بارگذاری متعادل، نیروی طولی وارد بر برج L_t از اختلاف کشش سیم‌های دو اسپن مجاور ناشی می‌شود. این نیرو را می‌توان بر حسب کیلوگرم از رابطه زیر به دست آورد:

$$L_t = (H_L - H_R) \times \cos \frac{\alpha}{2} \times n_b \quad (۲-۹۶)$$

جهت اطمینان بیشتر، در صورت آویزی بودن برج از اثر زاویه مسیر خط صرف‌نظر شده و برای برج‌های کششی مقدار α برابر حد پایین زاویه برج انتخاب می‌شود. در محاسبه نیروی طولی از اثر باد با زاویه ۴۵ درجه نیز با توجه به کوچکی آن چشم پوشی می‌شود. کل نیروی طولی وارد بر برج F_L از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_L = L_t \times S.F_L \times B \quad (۲-۹۷)$$

$S.F_L$ ضریب اضافه بار نیروهای طولی و B ضریب کاهش ناشی از انحراف زنجیره مقرر می‌باشد. مقدار B برای برج‌های کششی برابر ۱ و برای برج‌های آویزی برابر ۰/۳۵ می‌باشد. در محاسبات مربوط به سیم محافظ B برای انواع برج‌ها برابر ۱ خواهد بود. $S.F_L$ نیز برابر با ۱ فرض می‌شود.

۲-۸-۱-۲- محاسبه نیروها در حالت بارگذاری غیرمتعادل [۱۸]

در بارگذاری نامتعادل حالات زیر در نظر گرفته می‌شود.

الف) پارگی سیم: در این حالت فرض بر این است که یک یا چند سیم در یک طرف برج پاره شود. در این صورت کشش اسپن مجاور به صورت طولی به برج اعمال خواهد شد. به همین دلیل روابط (۲-۸۷)، (۲-۸۸)، (۲-۹۱)، (۲-۹۳) و (۲-۹۶) به ترتیب به صورت روابط زیر اصلاح می‌شوند.

$$V_c = W_c \times S_{we} \times (n_b - k_x \times n_d) \quad (۲-۹۸)$$

$$V_i = W_i \times S_{we} \times (n_b - k_x \times n_d) \quad (۲-۹۹)$$

n_d تعداد سیم پاره شده در اسپن یک طرف از برج و k_x ضریب اصلاح وزن سیم پاره شده می‌باشد. در خطوط باندل پارگی تنها یک سیم از باندل در نظر گرفته می‌شود. ضریب k_x نیز بسته به نظر طراح بین ۰/۳ تا ۰/۵ انتخاب می‌گردد.

$$T_w = W_{wn} \times (d + 2t) \times S_{wn} \times (n_b - 0.5n_d) \times 10^{-3} \quad (۲-۱۰۰)$$

$$T_t = 2H \sin \frac{\alpha}{2} \times (n_b - 0.5n_d) \quad (۲-۱۰۱)$$

$$L_t = H \times n_d \times k_b \quad (۲-۱۰۲)$$

ضریب k_b برای برج‌های زاویه برابر با ۱ و برای برج‌های آویزی برابر با ۰/۶ است. در واقع ضریب k_b بیانگر تعدیل نیروی طولی بر اثر انحراف زنجیره مقرر در برج‌های آویزی است. در این حالت ضریب B در معادله (۲-۹۷) اعمال نمی‌شود.

ب) اختلاف بار یخ: در برخی مواقع یخ تشکیل شده در اسپن یک طرف برج به دلایلی (همچون واقع شدن در معرض تابش مستقیم خورشید) از سیم جدا می‌شود در حالی که هنوز اسپن طرف دیگر زیر بار یخ است. به علاوه ممکن است قطر یخ تشکیل شده روی سیم‌های دو اسپن مجاور متفاوت باشد. این حالات منجر به اختلاف کشش دو اسپن می‌گردد. با اصلاح روابط (۲-۸۸)، (۲-۸۹)، (۲-۹۱) و (۲-۹۶) به ترتیب زیر می‌توان وضعیت فوق را در محاسبات لحاظ نمود.

$$V_i = W_i \times S_{we} \times n_b \quad (۲-۱۰۳)$$

$$W_i = 0.5\pi\rho_i [t_L^2 + t_R^2 + d \times (t_L + t_R)] \times 10^{-6} \quad (۲-۱۰۴)$$

t_R و t_L به ترتیب ضخامت یخ (میلی‌متر) در اسپن‌های طرف چپ و راست برج است.

$$T_w = W_{wn} \times (d + t_R + t_L) \times S_{wn} \times n_b \times 10^{-3} \quad (۲-۱۰۵)$$

$$L_t = (H_R + H_L) \times n_b \times B \quad (۲-۱۰۶)$$

نیروی کششی H در حالت بار غیرمتعادل در برج‌های آویزی به علت انحراف زنجیره تعدیل می‌گردد که مقدار آن توسط ضریب B اصلاح می‌گردد که B برای برج زاویه‌ای ۱ و برای برج آویزی ۰/۳۵ می‌باشد.

پ) برج‌های انتهایی

برای برج‌های انتهایی رابطه نیروی طولی به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$L_t = H \cos \frac{\beta}{2} \times n_b \quad (۲-۱۰۷)$$

β زاویه ورود خط به پست است.

۲-۸-۱-۳- بار ناشی از سیم‌کشی و تعمیرات خط [۱۸]

الف) بار قائم برج آویزی: در موقع سیم‌کشی و تعمیرات بعد از حادثه ممکن است بار قائم بزرگی بر برج آویزی وارد شود. این بار از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$V_m = W_c \times S_{we} \times n_b \times S.F \quad (108-2)$$

V_m اضافه بار قائم (کیلوگرم) بوده و $S.F$ ضریب ایمنی برابر ۲ فرض می‌شود. بار قائم در برج تک مداره برای یکی از فازها و در برج دومداره برای دو فاز در نظر گرفته خواهد شد.

ب) بار طولی برج کششی: هنگام احداث خط بعد از اتمام عملیات سیم‌کشی هر سکشن، برج کششی انتهایی سکشن مذکور

تحت تاثیر نیروی طولی ناشی از کشش سیم در یک طرف قرار می‌گیرد. این نیرو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_m = H \times n_b \times S.F \quad (109-2)$$

L_m اضافه بار طولی (کیلوگرم) بوده و ضریب ایمنی $S.F = 2$ فرض می‌شود. H کشش سیم در زمان اجرای عملیات سیم‌کشی است.

۲-۸-۱-۴- ضرایب اضافه بار

ضرایب اضافه بار مورد استفاده در زیربخش‌های قبل در جدول (۲-۱۵) آمده است.

۲-۸-۱-۵- منحنی‌های کاربردی

منحنی‌های کاربردی در اصل باید قابلیت برج را از نظر حداقل و حداکثر اسپن وزن و اسپن باد به ازای زوایای مختلف مسیر خط، حداقل و حداکثر تک اسپن، نسبت دو اسپن مجاور و نیز حداقل اسپن وزن به ازای مقادیر اسپن باد از جهت رعایت حد مجاز انحراف زنجیره مقرر (مورد آخر تنها در برج‌های آویزی) نشان دهند. این منحنی‌ها در هنگام برج‌گذاری روی پروفیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سازندگان برج با آگاهی از شرایط آب و هوایی مسیر عبور خط و نوع هادی و سیم محافظ به کار رفته در پروژه، منحنی‌های کاربردی تیپ برج مورد انتخاب طراح خط را ارائه می‌کنند. با این حال پس از انتخاب تیپ حد مجاز نیروهای وارد بر برج نیز مشخص است و لذا طراح خود می‌تواند محدودیت‌های برج‌گذاری از لحاظ حداکثر اسپن‌های باد و وزن، نسبت اسپن‌های مجاور و نیز کمترین مقدار مجاز اسپن وزن به ازای هر مقدار اسپن باد را برای رعایت حد مجاز انحراف زنجیره (از دیدگاه‌های صاعقه، کلیدزنی و فرکانس قدرت) به دست آورد. در پیوست (۲-۴) توضیحاتی در این مورد ارائه شده است.

۲-۸-۲- انتخاب زنجیره مقره و یراق آلات از دیدگاه مکانیکی

۲-۸-۲-۱- انتخاب زنجیره مقره از دیدگاه مکانیکی [۱۲]

مقره‌های خط انتقال باید بتوانند نیروهای وارد بر زنجیره مقره را در شرایط طبیعی (وزن هادی و یخ و برف، نیروی ناشی از باد و زاویه‌داربودن خط) و غیرطبیعی (تخلیه ناگهانی برف و یخ از روی هادی، پارگی سیم، شکستن یک زنجیره مقره و غیره) به راحتی تحمل کرده و قابلیت اطمینان طولانی مدت داشته باشند. برای مقره‌های آویزی که می‌توانند در امتداد مسیر خط حرکت آزادانه داشته باشند نیروی افقی در جهت خط در نظر گرفته نمی‌شود.

در ادامه چگونگی انتخاب مقره‌های آویزی، V شکل و کششی از دیدگاه استقامت مکانیکی بیان می‌شود.

۲-۸-۲-۱-۱- انتخاب مقره در زنجیره‌های آویزی

نیروی قائم وارد بر زنجیره آویزی متصل به یک هادی را می‌توان با توجه به روابط بند "الف" از بخش ۲-۸-۱-۱ از رابطه زیر به دست آورد:

$$F_V = (W_c + W_i) \times S_{we} + (V_{ins} \times n_i) \quad (110-2)$$

کل نیروی افقی وارد بر زنجیره مقره نیز با توجه به روابط بند "ب" از بخش ۲-۸-۱-۱ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_t = W_{wn} \times (d + 2t) \times S_{wn} \times 10^{-3} + W_{wn} \times S_{if} \times i + 2H \sin \frac{\alpha}{2} \quad (111-2)$$

برآیند نیروهای وارد بر زنجیره مقره (کیلوگرم) به ازای یک هادی برابر است با:

$$R = \sqrt{F_V^2 + F_t^2} \quad (112-2)$$

اگر n_b تعداد هادی در فاز، S.F ضریب اطمینان در نظر گرفته شده برای کشش باشد، استقامت مکانیکی مقره P_I (کیلوگرم) باید در رابطه (۱۱۳-۲) صدق کند:

$$P_I \geq R \times n_b \times S.F \quad (113-2)$$

حداقل مقدار پیشنهادی برای ضریب اطمینان مکانیکی مقره ۲/۵ است.

۲-۸-۲-۱-۲- انتخاب مقره در زنجیره‌های V شکل

انحراف زنجیره‌های V شکل در اثر باد ناچیز است. لذا به منظور کاهش حریم لازم برای خط و فاصله بین فازها باید استفاده از آنها را مدنظر قرارداد. انتخاب مکانیکی زنجیره‌های V شکل مبتنی بر اصول زیر است:

- برای اینکه بازوهای زنجیره از حالت خمیده خارج شده و به صورت مستقیم قرار گیرند باید حداقل ۵۰۰ کیلوگرم نیروی قائم بر مقره‌ها وارد شود. بدین منظور باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$W_c \times S_{we} \times n_b \geq 500 \text{ kg} \quad (114-2)$$

- برقراری رابطه زیر تا حد زیادی منجر به عدم جابجایی عرضی نقطه آویز هادی در بادهای متوسط می‌شود:

$$\frac{W_{wn} \times S_{wn} + 2H \sin \frac{\alpha}{2}}{W_c \times S_{we}} \leq \frac{1}{2} \quad (115-2)$$

در رابطه فوق W_{wn} نیروی ناشی از باد با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه است.

- برای بادهای با سرعت بیشتر بازویی که در سمت وزش باد قرار دارد باید به تنهایی تحمل کشش موجود را داشته باشد. در این حالت اگر سرعت باد برابر با V متر بر ثانیه در نظر گرفته شده باشد، نیروی کششی وارد بر بازوی مربوطه یعنی R' به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$F'_V = (W_c + W_i) \times S_{we} + V'_{ins} \quad (۱۱۶-۲)$$

$$F'_t = W_{wn} \times (d + 2t) \times S_{wn} \times 10^{-3} + W_{wn} \times S'_{if} \times i + 2H \sin \frac{\alpha}{2} \quad (۱۱۷-۲)$$

$$R' = \sqrt{F'_V{}^2 + F'_t{}^2} \quad (۱۱۸-۲)$$

V'_{ins} وزن یک بازوی زنجیره V شکل، S'_{if} سطح بادخور بازوی مذکور و W_{wn} فشار باد با سرعت V متر بر ثانیه است.

V باتوجه به شرایط محیطی چهارگانه محاسبه می‌شود. در نهایت استقامت مکانیکی مقره P_1 باید در رابطه زیر صدق نماید:

$$P_1 \geq R' \times n_b \times S.F \quad (۱۱۹-۲)$$

۲-۸-۱-۳- انتخاب مقره در زنجیره‌های کششی

زنجیره‌های کششی مستقیماً تحت نیروی کشش هادی قرار دارند و بنابراین انتخاب مقره برای مجموعه‌هایی که فقط شامل یک

زنجیره مقره هستند باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که استقامت مکانیکی آن (P_1) در رابطه زیر صدق نماید:

$$P_1 \geq H_m \times n_b \times S.F \quad (۱۲۰-۲)$$

در این رابطه H_m حداکثر کشش کاری هادی (کیلوگرم) است که در صورت رعایت ضرایب جدول (۲-۷) برابر با نصف حداکثر مقاومت کششی هادی خواهد بود. در مواردی که مجموعه شامل دو یا تعداد بیشتری رشته مقره موازی است باید اولاً نیروی وارد بر کل مجموعه به نسبت مساوی بین رشته‌ها تقسیم شود که این مسأله به دقت نصب و ترکیب صحیح یراق‌آلات استفاده شده در زنجیره مقره بستگی دارد و ثانیاً هر یک از رشته‌ها باید بتوانند بارهای اضافی‌ای که بر اثر گسیختن یک رشته از مجموعه به آنها اعمال می‌گردد را تحمل نمایند. بدین منظور باید حداقل استقامت مکانیکی مقره‌ها چنان باشد که بار اعمال شده بر رشته‌های سالم در هنگام گسیختن یک رشته، از بار نقطه تسلیم مواد تشکیل‌دهنده مقره‌ها کمتر باشد (بار نقطه تسلیم برای زنجیره مقره برابر ۶۰ درصد استقامت شکست آن و برای یراق‌آلات برابر ۵۵ درصد استقامت شکست آنها در نظر گرفته می‌شود). اگر کشش اعمال شده بر رشته‌های سالم، بعد از گسیختن یک رشته برابر H_B و بار نقطه تسلیم رشته‌های سالم برابر H_0 باشد رابطه (۲-۱۲۱) باید برقرار گردد:

$$H_0 \geq H_B = \alpha_s H_A \quad (۱۲۱-۲)$$

H_A میزان کشش هر رشته قبل از پاره‌شدن یکی از رشته‌ها بوده و α_s نسبت ضربه است که به آرایش زنجیره بستگی دارد.

مقدار مناسب برای α_s در هنگام طراحی زنجیره مقره‌های کششی دو رشته‌ای تحت بدترین شرایط برابر ۳ و برای زنجیره مقره‌های کششی رشته‌ای مجهز به یوغ‌های متعادل‌کننده برابر ۲ می‌باشد.

۲-۸-۲- انتخاب یراق آلات

در خطوط هوایی انتقال نیرو، اغلب یراق آلات رابط بین هادی‌های فاز یا سیم محافظ هوایی خط با برج بوده که در مورد هادی‌های فاز این ارتباط از طریق مقره‌ها صورت می‌گیرد. علاوه بر این برخی از یراق آلات وظایف دیگری همچون میرا نمودن نوسانات مکانیکی به وجود آمده در هادی‌های فاز و سیم محافظ هوایی، نگهداری هادی‌های باندل در فواصل معینی از یکدیگر، توزیع میدان الکتریکی در طول زنجیره مقره و ... را برعهده دارند. این یراق آلات باید از چنان مقاومت مکانیکی برخوردار باشند که تحت کلیه شرایط جوی و بارهای مختلفی که به آنها وارد می‌شود تحمل مناسبی داشته باشند و در اثر تغییر درجه حرارت و شرایط محیطی از مقاومت مکانیکی آنها کاسته نشود. علاوه بر مقاومت مکانیکی مناسب، این قطعات می‌بایستی از خواص دیگری همچون مشخصات الکتریکی مناسب، سهولت تولید و نصب و قیمت مناسب نیز برخوردار باشند.

از نقطه نظر رفتار مکانیکی یراق آلات خطوط هوایی انتقال نیرو را می‌توان به دو گروه عمده یراق آلات آماده نصب و یراق آلات نیمه آماده تقسیم نمود. قطعات گروه اول پس از ساخت در کارخانه در محل مصرف قابل استفاده می‌باشند در حالی که بخشی از فرآیند ساخت یراق آلات نیمه آماده در محل مصرف انجام می‌شود و لذا رفتار مکانیکی قطعه در اثر عملیات اجرایی انجام گرفته بر آن دستخوش تغییر می‌شود. اغلب یراق آلات زنجیره مقره جزء یراق آلات آماده نصب محسوب می‌شوند و یراق آلاتی همچون غلاف تعمیراتی هادی یا کلمپ انتهایی در گروه یراق آلات نیمه آماده قرار می‌گیرند. برای آگاهی از انواع یراق آلات خط و نحوه انتخاب آنها می‌توان از مرجع [۱۹] استفاده کرد.

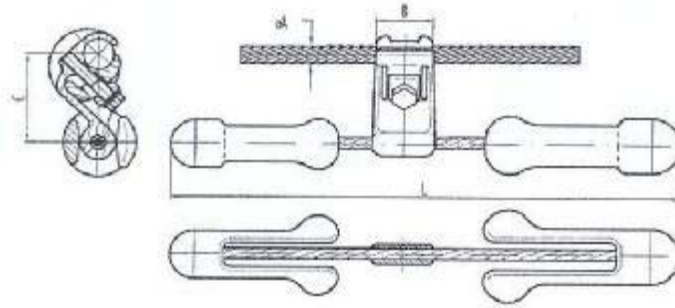
۲-۸-۳- نوسانات خط و انتخاب دمپرها

نوسانات هادی‌ها و سیم‌های محافظ یکی از عواملی است که موجب کاهش فاصله بین آنها شده و می‌تواند منجر به بروز قوس و قطع خط شود. این نوسانات همچنین بر روی اتصالات و هادی‌های خط اثر نامطلوب داشته و منجر به فرسودگی زودرس، کاهش عمر مفید و نهایتاً پارگی آنها نیز می‌گردد. در زیر مهمترین این نوسانات به اختصار مورد بررسی قرار گرفته و روش‌های رایج مقابله با آنها ارائه می‌شود.

۲-۸-۳-۱- نوسانات آئولین^۱

جریان هوا در بالا و پایین سیم تولید فشار نامتعادل کرده و باعث حرکت سیم در جهت بالا و پایین عمود بر جهت جریان هوا می‌شود. فرکانس زیاد (۵ تا ۳۰ هرتز) و دامنه کم (۱ تا ۲ برابر قطر هادی) مشخصه این نوع نوسان است. سرعت باد لازم برای تولید این نوسان ۰/۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه است [۲۰]. در این حالت نوسانات یکنواخت و پایدار در تمام طول یک اسپن ایجاد می‌شود. از آثار آن می‌توان به فرسودگی هادی‌ها در محل کلمپ‌ها و شل شدن پیچ‌های نگهدارنده بازوهای برج اشاره کرد.

نوسانات آتولین معمولاً با نصب دمپر در انتهای اسپن‌ها کنترل می‌شوند. این دمپرها انواع مختلفی دارند اما رایج‌ترین آنها دمپر استوک بریج^۱ است که از دو وزنه هم محور نصب شده بر روی یک سیم فولادی چندرشته‌ای تشکیل یافته و به وسیله یک کلمپ به هادی خط اتصال می‌یابد. شکل (۵-۲) یک نمونه دمپر استوک بریج را نشان می‌دهد.



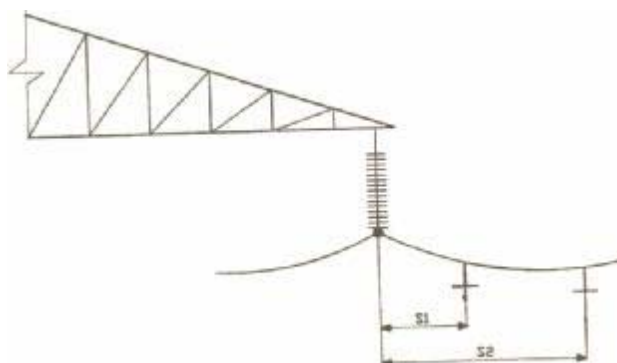
شکل ۲-۵: دمپر استوک بریج

برای تعیین محل نصب دمپرها در صورتی که اطلاعات سازنده تعیین‌کننده همه جزئیات لازم نباشد می‌توان از جدول پیشنهادی (۲-۱۶) استفاده نمود [۶].

جدول ۲-۱۶: محل نصب دمپر استوک بریج روی اسپن

S_2 (متر)	S_1 (متر)	نوع هادی	
۱/۸۹	۱/۱۲	Lynx	ACSR
۲/۰۴	۱/۲۱	Hawk	
۲/۶۲	۱/۵۵	Canary	
۲/۸۵	۱/۶۸	Curlew	
۱/۲۳	۰/۷۲	GST(7*3.05)	S.W
۱/۳۸	۰/۸۱	GST(7*3.68)	
۱/۵۷	۰/۹۳	AW 7#6	
۱/۳۱	۰/۷۷	AW 7#8	

شکل (۲-۶) فواصل S_1 و S_2 را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶: نصب دمپر در انتهای اسپین

برای محاسبه محل نصب دمپر می‌توان روابط زیر را نیز به کار گرفت:

$$S_1 = 0.000415 d \sqrt{H/W} \quad (۱۲۲-۲)$$

$$S_2 = 0.000703 d \sqrt{H/W} \quad (۱۲۳-۲)$$

d قطر سیم (میلی‌متر)، H کشش هادی (نیوتن)، W وزن واحد طول سیم (کیلوگرم بر متر)، S_1 و S_2 به ترتیب محل نصب وزنه‌های اول و دوم از کلمپ (زنجره مقره) به متر است. H به کار رفته در روابط اخیر باید در شرایط آب و هوایی مناسب برای ایجاد نوسانات آتولین محاسبه شود.

جدول (۱۷-۲) تعداد دمپر لازم در هر اسپین را پیشنهاد می‌کند.

جدول ۱۷-۲: مقادیر پیشنهادی برای تعداد دمپر در هر اسپین

سیم محافظ AW و GST			هادی‌های AAC و AAAC		هادی‌های ACSR			طول اسپین
کشش سیم در شرایط EDS بر حسب %UTS			کشش سیم در شرایط EDS بر حسب %UTS		کشش سیم در شرایط EDS بر حسب %UTS			
بالای ۲۰٪	۱۵-۲۰٪	زیر ۱۵٪	بالای ۱۸٪	کمتر از ۱۸٪	بالای ۲۰٪	۱۵-۲۰٪	زیر ۱۵٪	
۲	۱	۰	۲	۱	۲	۱	۰	کمتر از ۳۰۰ متر
۴	۲	۱	۴	۲	۴	۲	۱	از ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر

برای انتخاب و استفاده مناسب از انواع میراکننده‌ها باید مشخصات و شرایط استفاده از آنها توسط سازنده ارائه گردد. در حالت کلی این مشخصات عبارتند از:

- منحنی انرژی جذب شده توسط دمپر به ازای دامنه نوسانات و فرکانس‌های مختلف
- منحنی‌های مربوط به انرژی وارد از سوی باد، انرژی جذب شده و حداکثر دامنه قابل پیش‌بینی (باتوجه به شرایط منطقه)
- فاصله و تعداد دمپرهای لازم برای اسپین‌های مختلف

۲-۸-۳-۲- نوسانات هادی‌های فرعی

این نوع نوسانات صرفاً در هادی‌های باندل رخ می‌دهد. زمانی که یک جفت هادی در یک صفحه افقی واقع شوند یکی از آنها در معرض وزش باد قرار می‌گیرد در حالی که دیگری از باد محفوظ است. این امر در سرعت معینی از باد (معمولاً ۵ تا ۱۵ متر بر ثانیه) ایجاد نوسان می‌کند. فرکانس نوسانات هادی‌های فرعی ۰/۵ تا ۳ هرتز و دامنه آنها تا حدود نصف فاصله بین هادی‌های فرعی می‌باشد [۲۰]. برای کنترل این نوسانات در خطوط باندل از فاصله نگهدارهای ارتعاش‌گیر^۱ استفاده می‌شود. تعداد و فواصل نصب این تجهیز با توجه به طول اسپن و جداول و دستورالعمل‌های نصب ارائه شده از طرف سازندگان تعیین می‌گردد.

۲-۸-۳-۳- نوسانات گالوپینگ

گالوپینگ نوسانات ناگهانی با فرکانس کم (۰/۱ تا ۱ هرتز) و دامنه زیاد (از ۰/۱ تا یک برابر فلش هادی‌ها) بوده که در صفحه قائم رخ داده و در اثر وزش باد و یا خالی شدن بار یخ غیریکنواخت از روی سیم و بعضاً در اثر اتصال کوتاه‌های قوی حادث می‌شود. این نوسانات عمدتاً در فصل زمستان اتفاق می‌افتند ولی به علت دامنه بزرگ نوسان و خطرانی که می‌تواند در پی داشته باشد همواره مورد توجه خاص بوده است. بر اثر وقوع گالوپینگ مشکلاتی در بهره‌برداری از خط به وجود می‌آید که بخشی از آنها عبارتند از [۶]:

- کاهش فاصله عایقی بین هادی‌ها، بین هادی و زمین، بروز قوس الکتریکی و پیامد آن باز و بسته شدن کلیدهای قدرت
- اثرات تخریبی در پیچ‌های برج
- اثرات مخرب بر یراق‌آلات و اتصالات برج
- خوردگی هادی‌ها، دمپر، جامپر و اسپیسر دمپر
- برش پین مقره‌ها در زنجیره مقره‌های کششی
- تخریب هادی‌های فرعی در خطوط باندل
- زیان‌های اقتصادی ناشی از قطع برق در صورتی که وقوع گالوپینگ منجر به قطع طولانی‌مدت برق گردد.

برای کنترل پدیده گالوپینگ می‌توان یکی از روش‌های زیر را به کار گرفت:

- جلوگیری از ایجاد یخ روی سیم به وسیله ذوب کردن آن که امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- افزایش طول بازوی وسط (بین ۰/۴۵ تا ۱ متر) در برج‌هایی که فازها به صورت عمودی و زیر یکدیگر قرار گرفته‌اند.
- افزایش فاصله بین هادی‌ها
- استفاده از اسپیسر بین فازها
- استفاده از دمپرها
- استفاده از تجهیزات کنترل‌کننده حرکت چرخشی
- انتخاب مسیر مناسب برای خط و عدم عبور از مناطق مستعد وقوع این پدیده در صورت امکان

1. Spacer damper

صورتی است که طول خطوط قائم بین منحنی فوق و منحنی گرم مساوی و به اندازه طول پایه استاندارد است. محل تلاقی این منحنی با زمین پروفیل محل پایه استاندارد را مشخص می‌کند. در روش‌های کامپیوتری می‌توان منحنی‌های مورد نظر را بین هر دو برج دلخواه به سادگی رسم نمود.

۲-۹-۲- برج‌گذاری روی پروفیل

با در دست داشتن اطلاعات زیر می‌توان کار برج‌گذاری خط را آغاز نمود:

- پلان و پروفیل مسیر خط (شامل کنترهای جانبی و کلیه اطلاعات مربوط به عوارض موجود در محدوده حریم خط)
 - جدول حریم‌های موانع و تأسیسات (این جدول در پیوست ۲-۵ آمده است)
 - مشخصات برج‌های مورد استفاده در پروژه شامل ابعاد برج، ارتفاع بدنه اصلی، بدنه و پایه الحاقی و منحنی‌های کاربردی
 - جدول کشش - فلش هادی که در آن پارامترهای گرم و سرد هادی در اسپن‌های مختلف درج شده است.
- کیفیت کار برج‌گذاری تا حد زیادی به تجربه و مهارت طراح وابسته است. از آنجا که قبلاً نقاط زاویه روی مسیر مشخص شده‌اند در مورد برج‌های زاویه تنها باید ارتفاع برج مشخص شود. اما هم ارتفاع و هم محل نصب برج‌های آویزی در طی مرحله برج‌گذاری تعیین می‌گردد.

برای شروع برج‌گذاری اولین پایه بعد از پست را برج انتهایی در نظر می‌گیرند تا نوسانات خط به گنتری پست منتقل نشود. به علاوه ممکن است خط در محل ورود به پست زاویه داشته باشد. ارتفاع برج انتهایی باتوجه به فاصله آن از گنتری پست، مقدار نیروی مجاز وارد بر گنتری و محدودیت‌های ناشی از خود برج انتهایی تعیین می‌شود. باتوجه به قیمت بالای برج‌های مذکور سعی بر انتخاب کوتاهترین برج ممکن است. باتوجه به ضعیف بودن گنتری، کشش سیم بین گنتری پست و پایه انتهایی را کمتر از کشش سیم در طرف دیگر برج انتهایی در نظر می‌گیرند.

برای تعیین محل برج بعدی به اندازه اسپن طراحی از روی پروفیل جدا می‌شود. هنگام برج‌گذاری باید حتی‌الامکان از اسپن معادل طراحی و برج با ارتفاع استاندارد استفاده شود. در صورتی که مسیر خط مسطح و بدون مانع باشد رعایت این موارد به سادگی امکان‌پذیر است. اما در صورت وجود موانع باید آنها را از بین برد یا محل و ارتفاع پایه را تغییر داد. اصولاً تغییر محل پایه اقتصادی‌تر از افزایش ارتفاع آن است. محل قرارگیری برج نباید شیب زیادی داشته باشد. به علاوه برج نباید در مرداب، رودخانه، جاده یا حریم آنها از جمله مراکز مخابراتی، فرودگاهها، لوله‌های گاز، نفت و آب، بناهای تاریخی و مناطق حفاظت‌شده سازمان میراث فرهنگی قرار گیرد.

در روش سنتی برج‌گذاری بعد از تعیین محل پایه، خط قائمی در آن نقطه رسم شده و ارتفاع‌های مختلف نقاط نگه‌دارنده سیم برای پایین‌ترین فاز روی آن علامت‌گذاری می‌شود. سپس تمپلت روی پروفیل به صورتی قرار می‌گیرد که خطوط متعامد آن با خطوط متعامد پروفیل موازی باشند. با تغییر مکان افقی و عمودی تمپلت منحنی سیم بین دو پایه به نحوی رسم می‌شود که از نقطه نگه‌دارنده سیم در برج قبلی و یکی از نقاط مجاز برج فعلی بگذرد و منحنی فاصله مجاز سیم تا زمین تمپلت با خط زمین پروفیل مماس یا کمی بالاتر از آن باشد. در روش کامپیوتری می‌توان پس از قراردادن برج با ارتفاع استاندارد در محل موردنظر، منحنی فاصله مجاز سیم تا زمین بین این برج و برج قبلی را رسم نموده و نسبت به تثبیت یا تغییر محل و ارتفاع برج تصمیم‌گیری نمود.

بعد از رسم منحنی سیم فاصله آن با خطوط مخابراتی و نیرو کنترل می‌گردد. همچنین باید احتمال اعمال نیروی بالابرنده به برج‌ها با استفاده از منحنی سرد مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور منحنی سرد بین دو برج پیش و پس از برج مورد نظر رسم می‌شود. در صورتی که این منحنی بالاتر از برج مذکور قرار گیرد به معنای اعمال نیروی بالابرنده بر این برج است. از آنجا که اعمال نیروی بالابرنده بر برج‌های آویزی غیرمجاز است باید نسبت به افزایش ارتفاع یا تغییر محل برج یا افزودن وزنه جهت از بین بردن نیروی مذکور اقدام کرد. در غیر این صورت باید یک برج کششی را جایگزین برج آویزی نمود.

در هنگام برج‌گذاری باید اسپن‌های وزن و باد را نیز کنترل نمود تا در محدوده تعیین شده توسط منحنی‌های کاربردی قرار گیرند. با رعایت نکات فوق برج‌گذاری در یک سکشن ادامه می‌یابد تا به نقطه زاویه (محل پایه کششی) می‌رسیم. چنانچه اسپن به وجود آمده در آنجا مناسب باشد مشکلی وجود نخواهد داشت اما اگر اسپن حاصل خیلی کوتاه یا خیلی بلند باشد باید مطابق زیر عمل شود:

- در صورت بلندبودن اسپن، مقدار اضافی بین اسپن‌های قابل افزایش آن سکشن تقسیم گردد یا از هر یک از اسپن‌های بزرگ اندکی کم شود تا یک اسپن جدید و مناسب شکل گیرد.
 - در صورت کوتاه‌بودن اسپن با کاستن از اسپن‌های بلند، اسپن‌های مناسب تشکیل شود.
 - از برج کششی در جهت معکوس برج‌گذاری مجدد انجام شده و محل مناسب برای برج‌ها به دست آید.
- هنگام برج‌گذاری روی پروفیل باید حتی در صورت عدم وجود زاویه، بعد از هر چند پایه آویزی یک پایه کششی به عنوان ستون خط نصب شود تا علاوه بر افزایش استحکام خط، در هنگام پاره‌شدن سیم یا افتادن یک برج تمام خط آسیب نبیند و تعمیر قسمت آسیب‌دیده بین دو پایه کششی آسان‌تر انجام گیرد.
- بعد از تعیین ارتفاع و محل برج‌ها در هر سکشن، اسپن معادل طراحی در آن سکشن به کمک رابطه (۲-۱۲۶) به دست می‌آید که در آن n_s تعداد برج‌ها در سکشن تحت بررسی است:

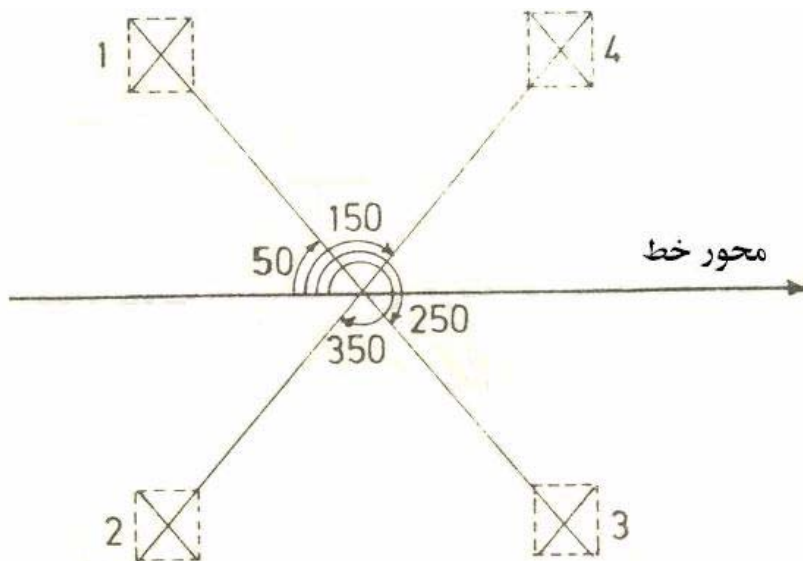
$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} S_i^3}{\sum_{i=1}^{n_s} S_i}} \quad (2-126)$$

سپس براساس پارامتر گرم متناظر با اسپن فوق مجدداً ارتفاع برج‌ها کنترل و تصحیح می‌شود. باید نقاطی به عنوان محل نصب پایه‌ها انتخاب گردد که هم باعث کاهش ارتفاع برج شود (معمولاً نقاط مرتفع‌تر) و هم از نظر اختلاف لگ و شیب زمین در محدوده مجاز قرار داشته باشد. جهت بهبود شرایط نصب می‌توان تسطیح محل نصب را نیز به عنوان یک گزینه مدنظر قرار داد. در مواقعی که خط در حال احداث با خطوط با ولتاژ کمتر (و در نتیجه ارتفاع برج کمتر) تقاطع دارد ممکن است تغییر محل خطوط قدیمی از افزایش ارتفاع برج‌های خط در دست ساخت اقتصادی‌تر باشد.

۲-۹-۳- پروفیل قطری

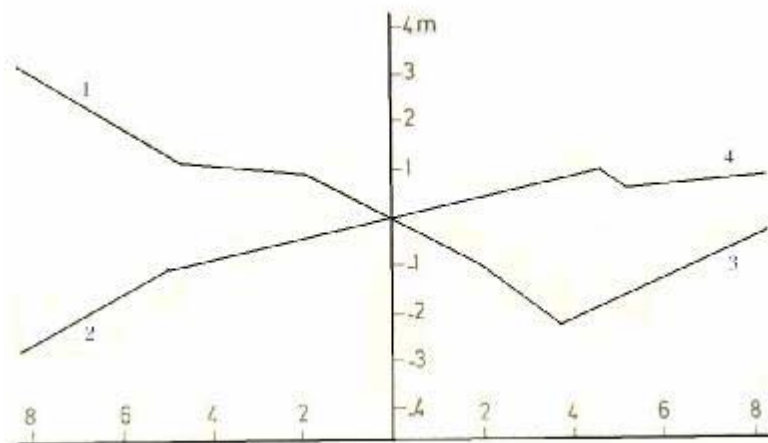
هر بر مشبک خود ایستا دارای چهار ستون است. جهت تعیین میزان اختلاف ستونها و طول پایه الحاقی و محل دقیق چاله‌ها و ابعاد آنها باید اطلاعات دقیقی از محل نصب پایه‌ها در اختیار باشد. بدین منظور پس از اتمام برج‌گذاری روی پروفیل از محل برج‌ها پروفیل قطری تهیه می‌شود.

از آنجا که ستونهای برج روی دو قطر یک مربع واقع شده‌اند بهترین روش برای برداشت مقطع محل ستونها، برداشت پروفیل طولی اقطار این مربع است. طول قطرهای مربع به نوع و ارتفاع برج و شیب زمین در محل نصب بستگی دارد. امتدادهایی که برداشت می‌شوند متقاطعند. لذا مقاطع را پروفیل ضربدری می‌نامند. شکل (۲-۷) نشان‌دهنده محور خط، موقعیت چاله‌ها و زوایای مربوطه برای یک پایه غیرکششی است.



شکل ۲-۷: محور خط، موقعیت چاله‌ها و زوایای مربوطه برای یک پایه غیرکششی

پروفیل قطری با مقیاس ۱:۱۰۰ رسم می‌شود. با استفاده از پروفیل قطری، شابلون قطری برج و باتوجه به ابعاد برج، ارتفاع پایه‌های مختلف برج‌ها و ریویل و برش زمین هر برج مشخص می‌گردد. در این مرحله نیز ممکن است به خاطر عوارض زمین، جابجایی محل برج (باتوجه به محدودیت‌های مسیر و برج) اجباری باشد. شابلون قطری برج شابلونی است که با مقیاسی برابر با مقیاس پروفیل قطری یعنی ۱:۱۰۰ براساس نوع برج استفاده‌شده، ترسیم می‌شود. باتوجه به این که سازندگان برج پایه‌های برج را در طول‌های ثابتی می‌سازند، شابلون قطری را روی پروفیل قطری، طوری تنظیم می‌کنند که تا حد امکان بتوان از این پایه‌های آماده به بهترین شکل استفاده نمود و از ریویل برای جبران مابقی کمبود طول پایه‌ها، برای نصب صحیح برج استفاده نمود. شکل (۲-۸) یک نمونه پروفیل قطری را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸: یک نمونه پروفیل قطری

۲-۹-۴- کنتر و فاصله مجاز جانبی

در مسیر خطوط نیرو، گاهی به دلیل وجود موانع مرتفع یا شیب کوه‌ها ممکن است سیم بیش از حد مجاز به این عوارض نزدیک شود. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی، در صورتی که در قسمتی از مسیر خط کوه‌های دارای شیب عرضی وجود داشته باشند با استفاده از روش مطرح شده در مرجع [۲] نسبت به حفظ فاصله لازم تا عارضه اطمینان حاصل می‌گردد.

پیوست (۲-۱): تقسیم‌بندی بارگذاری شرایط آب و هوایی

• منطقه سبک

باد (m/s)/(kg/m ²)	ضخامت یخ (mm)	دما (C)	نوع بارگذاری		
۲۸/۵۰	۰	۱۵	باد متوسط	استاندارد	بارگذاری متعادل
۲۶/۵/۴۴	۰	۰	باد شدید	حدی	
۲۲/۳۰	۶	-۵	یخ و باد		
۰	۰	۲۵	شرایط EDS		
۰	۰	-۵	حداقل دما		
۰	۰	۵۰	حداکثر دما		

• منطقه متوسط

باد (m/s)/(kg/m ²)	ضخامت یخ (mm)	دما (C)	نوع بارگذاری		
۲۵/۴۰	۷	-۱۰	یخ و باد متوسط	استاندارد	بارگذاری متعادل
۴۰/۱۰۰	۰	۱۵	باد شدید	حدی	
۰	۱۵	-۵	یخ سنگین		
۰	۰	۲۰	شرایط EDS		
۰	۰	-۲۰	حداقل دما		
۰	۰	۴۵	حداکثر دما		

• منطقه سنگین

باد (m/s) / (kg/m ²)	ضخامت یخ (mm)	دما (C)	نوع بارگذاری		
۲۰/۲۵	۱۵	-۲۰	یخ و باد متوسط	استاندارد	بارگذاری متعادل
۴۰/۱۰۰	۰	۱۵	باد شدید	حدی	
۰	۲۰ - ۲۵*	-۵	یخ سنگین		
۰	۰	۱۸	شرایط EDS		
۰	۰	-۲۵	حداقل دما		
۰	۰	۴۰	حداکثر دما		

* برای ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر، ضخامت یخ ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

• منطقه فوق سنگین

باد (m/s)/ (kg/m ²)	ضخامت یخ (mm)	دما (C)	نوع بارگذاری		
			استاندارد	حدی	بارگذاری متعادل
۲۰/ ۲۵	۲۰	-۲۰	یخ و باد متوسط		
۴۰/ ۱۰۰	۰	۱۵	باد شدید		
۰	۳۰ - ۵۰*	-۵	یخ سنگین		
۰	۰	۱۵	شرایط EDS		
۰	۰	-۳۰	حداقل دما		
۰	۰	۳۰	حداکثر دما		
<p>* برای ارتفاع از سطح دریا ۳۰۰۰m - ۲۵۰۰m : ضخامت یخ ۳۰mm</p> <p>۳۵۰۰m - ۳۰۰۰m : ضخامت یخ ۳۵mm</p> <p>۴۰۰۰m - ۳۵۰۰m : ضخامت یخ ۴۰mm</p> <p>۴۵۰۰m - ۴۰۰۰m : ضخامت یخ ۵۰mm</p>					

پیوست (۲-۲): فاصله مجاز سیم از زمین

در جدول (۲-۱۸) حداقل فاصله مجاز سیم از انواع زمین مطابق با استاندارد VDE آمده است. در این مورد استاندارد NESG نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مراجع ۶ و ۲۳ مراجعه نمود.

جدول ۲-۱۸: حداقل فاصله مجاز سیم از مناطق مختلف (متر)

ولتاژ (کیلوولت)				محل و نوع عبور سیم
۴۰۰	۲۳۰	۱۳۲	۶۳	
۷/۹۴	۶/۸	۶/۱۵	۶	سطح زمین
۴/۹۴	۳/۸	۳/۱۵	۳	مناطق شیب‌دار با دسترسی مشکل
۴/۴۴	۳/۳	۲/۶۵	۲/۵	درختان زیر خط
۴/۴۴	۳/۳	۲/۶۵	۲/۵	درختان کنار خط که امکان صعود جهت انجام کار وجود دارد.
۲/۶۷	۱/۵۴	۰/۸۸	۰/۴۲	۱- در حالت بدون انحراف سیم
۲/۶۷	۱/۵۴	۰/۸۸	۰/۴۲	۲- در حالت انحراف سیم
۲/۶۷	۱/۵۴	۰/۸۸	۰/۴۲	درختان کنار خط که امکان صعود جهت انجام کار وجود ندارد
۴/۹۴	۳/۸	۳/۱۵	۳	ساختمانها با سقف:
۱۳/۹۴	۱۲/۸	۱۲/۱۵	۱۲	۱- عایق
۳/۴۴	۲/۳	۱/۶۵	۱/۵	۲- هادی
۸/۹۴	۷/۸	۷/۱۵	۷	آنتن ساختمانها
۸/۹۴	۷/۸	۷/۱۵	۷	عبور تقاطعی از راهها
۴/۴۴	۳/۳	۲/۶۵	۲/۵	عبور تقاطعی از روی جاده‌های شهری
۴/۴۴	۳/۳	۲/۶۵	۲/۵	عبور تقاطعی از روی راهپای آبی
۱۳/۹۴	۱۲/۸	۱۲/۱۵	۱۲	عبور تقاطعی از روی زمینهای ورزشی
۸/۹۴	۷/۸	۷/۱۵	۷	عبور تقاطعی از کنار زمینهای ورزشی

جدول ۲-۱۹: حداقل فاصله مجاز سیم و برج از بخش‌های مختلف (متر)

ولتاژ (کیلوولت)				محل و نوع عبور سیم
۴۰۰	۲۳۰	۱۳۲	۶۳	
<p><u>عبور ترن غیربرقی از مناطق عمومی و شلوغ</u></p> <p>۱- در حالت تقاطعی</p> <p>حداقل فاصله عمودی سیم از بالاترین قسمت ریل</p> <p>حداقل فاصله افقی پایه خط هوایی از وسط ریل</p> <p>۲- در حالت موازی</p> <p>حداقل فاصله افقی پایه‌ها از وسط ریل</p>				
۸/۹۴	۷/۸	۷/۱۵	۷	
۵	۵	۵	۵	
۶/۹۴	۵/۸	۵/۱۵	۵	
<p><u>عبور ترن برقی از مناطق عمومی و شلوغ</u></p> <p>حداقل فاصله سیم هوایی برق از قسمتهای ساختمانی و تأسیساتی ترن برقی:</p> <p>۱- در حالت تقاطعی</p> <p>فاصله عمودی</p> <p>فاصله افقی</p> <p>۲- در حالت موازی</p> <p>فاصله عمودی سیم منحرف‌شده</p>				
۴/۹۴	۳/۸	۳/۱۵	۳	
۳/۴۴	۲/۳	۱/۶۵	۱/۵	
۳/۴۴	۲/۳	۱/۶۵	۱/۵	
<p><u>خط آهن کارخانه‌ها و صنایع با واگن غیربرقی</u></p> <p>۱- در حالت تقاطعی</p> <p>حداقل فاصله عمودی از بالاترین قسمت ریل</p> <p>حداقل فاصله افقی پایه‌های خط هوایی از وسط ریل</p> <p>۲- در حالت موازی</p> <p>حداقل فاصله عمودی سیم منحرف‌شده از راه‌آهن</p>				
۸/۹۴	۷/۸	۷/۱۵	۷	
۳	۳	۳	۳	
۳/۴۴	۲/۳	۱/۶۵	۱/۵	
<p><u>تراموا و اتوبوس برقی</u></p> <p>حداقل فاصله سیم خط هوایی برق از قسمتهای ساختمانی و تأسیساتی تراموای و اتوبوس برقی</p> <p>۱- حالت تقاطعی</p> <p>فاصله عمودی</p> <p>فاصله افقی</p> <p>۲- حالت موازی</p> <p>فاصله عمودی سیم منحرف شده</p>				
۴/۹۴	۳/۸	۳/۱۵	۳	
۳/۴۴	۲/۳	۱/۶۵	۱/۵	
۳/۴۴	۲/۳	۱/۶۵	۱/۵	

پیوست (۲-۳): تعیین ضریب K_s برای انواع سیم‌های محافظ

حداقل سطح مقطع لازم A برای یک سیم محافظ جهت عبور جریان فرکانس قدرت I در مدت t از رابطه (۲-۱۲۷) به دست می‌آید [۱۴]:

$$A = 100I \sqrt{\frac{\rho_s \times t}{JDS_H \ln(1 + \alpha_s(\varphi - \varphi_0))}} = \frac{I\sqrt{t}}{K_s} \quad (2-127)$$

در این رابطه:

I : مقدار مؤثر جریان سیم محافظ (آمپر)

ρ_s : مقاومت مخصوص سیم محافظ (اهم _ سانتی‌متر)

J : مقداری ثابت برابر با $4/185$ (ژول بر کالری)

A : سطح مقطع سیم محافظ (میلی‌مترمربع)

S_H : گرمای ویژه (کالری بر گرم بر درجه سانتی‌گراد)

D : چگالی سیم محافظ (گرم بر سانتی‌مترمکعب)

α_s : ضریب حرارتی سیم محافظ (بر درجه سانتی‌گراد)

t : مدت زمان اتصال کوتاه (ثانیه)

φ_0 : درجه حرارت اولیه سیم محافظ (درجه سانتی‌گراد)

φ : درجه حرارت نهایی سیم محافظ (درجه سانتی‌گراد)

در جدول (۲-۲۰) پارامترهای سیم‌های محافظ از نوع ACS، EHS و ACSR داده شده است.

جدول ۲-۲۰: پارامترهای سیم‌های محافظ

نوع سیم محافظ			واحد	پارامتر
ACSR	EHS	ACS		
$2/87 \times 10^{-6}$	$15/9 \times 10^{-6}$	$8/53 \times 10^{-6}$	$\Omega \cdot \text{Cm}$	ρ_s
۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۶	$1/^\circ\text{C}$	α_s
۱۸۰	۴۰۰	۴۰۰	$^\circ\text{C}$	φ
۴۰	۴۰	۴۰	$^\circ\text{C}$	φ_0
۲/۷۰	۷/۸۶	۶/۶۶	gr/cm^3	D
۰/۲۱۰	۰/۱۱۸	۰/۱۱۸	$\text{cal}/\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}$	S_H

باتوجه به اینکه در حالت عادی جریانی از سیم محافظ نمی‌گذرد دمای اولیه برای انواع سیم محافظ برابر با ۴۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب می‌شود. اکنون با استفاده از مقادیر جدول فوق می‌توان ضریب K_s را برای انواع سیم محافظ محاسبه نمود. K_s برابر است با:

$$K_s = 0.01 \sqrt{\frac{JDS_H \text{ Ln}(1 + \alpha(\varphi - \varphi_0))}{\rho_s \alpha_s}} \quad (۱۲۸-۲)$$

- سیم محافظ ACS:

$$K_s = 0.01 \sqrt{\frac{4.185 \times 6.66 \times 0.118 \text{ Ln}(1 + 0.0036(400 - 40))}{8.53 \times 10^{-6} \times 0.0036}} = 94$$

- سیم محافظ EHS:

$$K_s = 0.01 \sqrt{\frac{4.185 \times 7.86 \times 0.118 \text{ Ln}(1 + 0.0035(400 - 40))}{15.9 \times 10^{-6} \times 0.0035}} = 75$$

- سیم محافظ ACSR:

$$K_s = 0.01 \sqrt{\frac{4.185 \times 2.70 \times 0.210 \text{ Ln}(1 + 0.0040(180 - 40))}{2.87 \times 10^{-6} \times 0.0040}} = 96$$

در صورتی که از هادی دیگری به عنوان سیم محافظ استفاده شود، می‌توان با استفاده از رابطه (۱۲۸-۲) ضرایب مربوط به آن سیم را به دست آورد.

پیوست (۲-۴): منحنی‌های کاربردی

در هنگام برج‌گذاری روی پروفیل باید محدوده‌های کار کاملاً مشخص باشد. لذا مقادیر حداکثر و حداقل اسپین وزنی و اسپین بادگیر و همچنین انحراف زنجیره مقرر را به صورت نمودارهایی تهیه می‌کنند که این نمودارها به منحنی‌های کاربردی موسوم‌اند. در ادامه نحوه به دست آوردن این منحنی‌ها برای برج‌های آویزی و کششی به طور مختصر بیان می‌شود. برای اطلاع بیشتر در این مورد می‌توان به مرجع [۲۲] مراجعه نمود.

• تهیه منحنی‌های کاربردی برای برج‌های آویزی

یافتن منحنی‌های کاربردی برای برج‌های آویزی مبتنی بر اصول زیر است:

الف) با معلوم‌بودن حداکثر نیروی قائم قابل تحمل برج ($F_{v,max}$)، حداکثر اسپین وزن مجاز ($S_{we,max}$) به دست می‌آید.

$$S_{we,max} = \frac{F_{v,max} - W_{ins}}{(W_C + W_i) \times S.F_v} \quad (129-2)$$

W_i حداکثر وزن یخ روی واحد طول هادی در شرایط آب و هوایی منطقه، W_C وزن واحد طول هادی، W_{ins} وزن زنجیره مقرر و $S.F_v$ ضریب اطمینان لحاظ شده برای نیروهای قائم می‌باشد.

ب) با معلوم‌بودن حداکثر نیروی افقی قابل تحمل برج ($F_{t,max}$)، حداکثر مقدار مجاز اسپین باد ($S_{wn,max}$) به دست می‌آید.

$$S_{wn,max} = \frac{F_{t,max} - 2H \sin \frac{\alpha}{2}}{W_{wn} \times S.F_w} \quad (130-2)$$

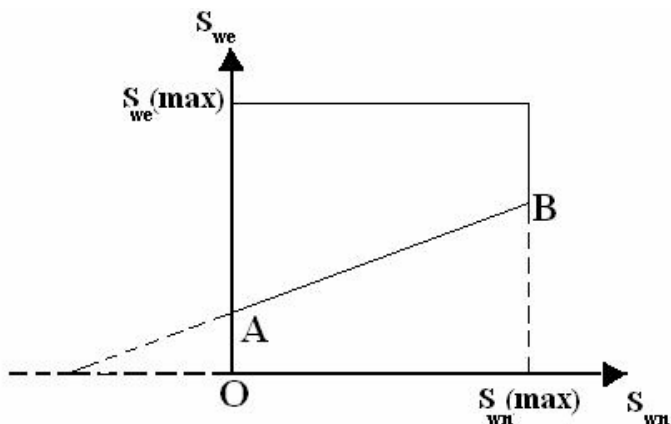
W_{wn} حداکثر فشار باد در منطقه احداث خط، H کشش هادی در شرایط حداکثر باد، α زاویه انحراف برج و $S.F_w$ ضریب اطمینان لحاظ شده برای نیروی باد می‌باشد.

پ) با معلوم‌بودن حداکثر مقدار مجاز انحراف زنجیره مقرر یعنی α_1 ، حداقل مقدار مجاز اسپین وزن به ازای مقادیر اسپین باد به دست می‌آید.

$$\tan \alpha_1 = \frac{d \times 10^{-3} \times W_{wn} \times S_{wn} + 2H \sin \frac{\alpha}{2}}{W_C \times S_{we} + 0.5W_{ins}} \Rightarrow \quad (131-2)$$

$$S_{we} = \left(\frac{d \times 10^{-3} \times W_{mn}}{W_C \tan \alpha_1} \right) S_{wn} + \frac{2H \sin \frac{\alpha}{2}}{W_C \tan \alpha_1} - 0.5 \frac{W_{ins}}{W_C}$$

لذا منحنی کاربردی یک برج آویزی را می‌توان به صورت زیر نمایش داد.



شکل ۲-۹: نمونه‌ای از منحنی کاربردی یک برج آویزی

در پایه‌گذاری روی پروفیل باید به ازاء یک اسپن باد، همواره اسپن وزن روی خط AB یا بالای آن قرار داشته باشد تا زاویه انحراف زنجیره از مقدار مجاز فراتر نرود.

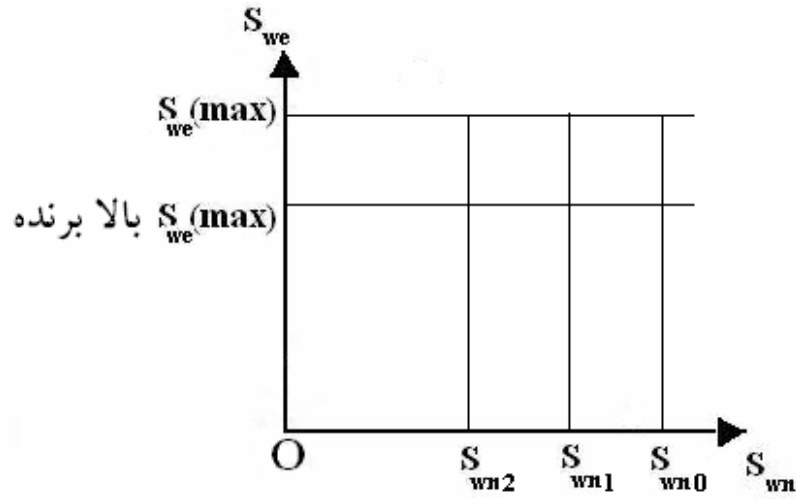
اما به نظر می‌رسد که انتخاب تنها یک مقدار α به عنوان حداکثر مقدار مجاز انحراف زنجیره مقرر چندان منطقی نباشد. زیرا حداکثر انحراف مجاز باید براساس رعایت حداقل فاصله عایقی مجاز بین هادی و برج تعیین شود. در حالی که سه نوع فاصله عایقی (بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه، کلیدزنی و فرکانس قدرت) برای خط محاسبه می‌شود. تعیین حداکثر مقدار مجاز انحراف زنجیره براساس بزرگترین فاصله عایقی لازم (از میان S_p ، S_s ، S_L) و شدیدترین باد منطقه کاملاً محافظه‌کارانه بوده و منجر به افزایش بی‌مورد طول بازوی برج و لذا هزینه خط می‌شود. از این رو همان‌گونه که در بخش ۲-۷ گفته شد، وقوع هر یک اضافه ولتاژهای مذکور تنها در درصدی از شدیدترین باد منطقه در نظر گرفته می‌شود و رعایت فواصل S_p ، S_s ، S_L به ترتیب در ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد فشار شدیدترین باد منطقه ضروری است. به این ترتیب می‌توان برای هر برج باتوجه به هندسه و ابعاد آن سه زاویه انحراف α_p ، α_s ، α_L (نظیر S_p و S_s ، S_L) معرفی نمود. با جاگذاری مقادیر مذکور در رابطه (۲-۱۳۱) سه رابطه بین اسپن‌های باد و وزن به دست می‌آید (باید توجه داشت که به ازای هر α_1 نیروی باد نیز در رابطه (۲-۱۳۱) عوض می‌شود). به این ترتیب در شکل (۲-۹) پاره خط AB به چند پاره خط تبدیل خواهد شد. در واقع ممکن است در هر محدوده از اسپن باد یکی از سه زاویه انحراف مجاز غالب بوده و تعیین‌کننده حداقل اسپن وزن لازم برای جلوگیری از انحراف بیش از حد زنجیره مقرر باشد.

• تهیه منحنی‌های کاربردی برای برج‌های کششی

- درمورد برج‌های کششی که زنجیره مقرر در امتداد هادی قرار گرفته است منحنی‌های کاربردی طبق اصول زیر به دست می‌آیند:
 - مشابه با برج‌های آویزی، حداکثر نیروی قائم قابل تحمل برج تعیین‌کننده حداکثر اسپن وزن خواهد بود.
 - حداکثر نیروی بالابرنده قابل تحمل برج، حداکثر اسپن وزن منفی را تعیین می‌کند.

- باتوجه به حداکثر نیروی افقی قابل تحمل برج می توان حداکثر اسپن باد را در زوایای مختلف قابل تحمل برج به دست آورد.

بدین ترتیب منحنی کاربردی یک برج کششی را می توان به صورت زیر نمایش داد.



شکل ۲-۱۰: نمونه‌ای از منحنی کاربردی یک برج کششی

پیوست (۲-۵): حریم‌های موانع و تأسیسات

حریم خطوط نیرو عبارت است از [۲]:

الف) حریم درجه یک: دو نوار موازی خط انتقال در طرفین آن و متصل به تصویر فاز کناری روی زمین است که عرض هر یک از این دو نوار در سطح افقی در جدول (۲-۲۱) آمده است.

ب) حریم درجه دو: دو نوار موازی در طرفین حریم درجه یک و متصل به آن است. فواصل افقی حد خارجی حریم درجه دو از محور خط (محور خط، خط واصل بین مراکز دو برج مجاور است) در هر طرف در جدول (۲-۲۱) آمده است.

در زیر خط و حریم درجه یک اقدام به هرگونه عملیات ساختمانی و ایجاد تأسیسات مسکونی یا دامداری، باغ و درختکاری و انبارداری تا هر ارتفاع ممنوع است و فقط ایجاد زراعت فصلی و سطحی و حفر چاه و قنات و راه‌سازی و شبکه آبیاری با رعایت اصول حفاظتی مشروط براینکه سبب ایجاد خسارت برای تأسیسات خطوط انتقال نگردد مجاز است. البته برای حفر چاه و قنات و راه‌سازی اجازه وزارت نیرو لازم می‌باشد. در حریم درجه دو، فقط ایجاد تأسیسات ساختمانی (اعم از مسکونی و صنعتی) و مخازن سوخت تا هر ارتفاع ممنوع می‌باشد. برای اطلاع بیشتر می‌توان به مرجع [۲۳] مراجعه نمود.

جدول ۲-۲۱: حریم خطوط نیرو

درجه دو (متر)	درجه یک (متر)	حریم ولتاژ (کیلوولت)
۵	۳	۲۰
۱۵	۵	۳۳
۲۰	۱۳	۶۳
۳۰	۱۵	۱۳۲
۴۰	۱۷	۲۳۰
۵۰	۲۰	۴۰۰

به منظور هماهنگی و عملکرد یکسان درخصوص نحوه محاسبه میزان حریم درجه یک خطوط انتقال نیروی برق در داخل محدوده شهری و تسری آن به مناطق واجد شرایط در خارج از محدوده شهرها، باتوجه به بخشنامه شماره ۷۴۶۶۵/۳۰/۱۰۰، نحوه محاسبه تخفیف حریم درجه یک خطوط انتقال و توزیع نیروی برق در جدول (۲-۲۲) آمده است.

جدول ۲-۲۲: میزان حریم درجه یک خطوط انتقال و توزیع نیروی برق (برحسب متر) پس از اعمال تخفیف

فاصله دوپایه متوالی خطوط هوایی نیروی برق					ردیف ولتاژ (کیلوولت)
از ۳۰۰ متر به بالا	از ۲۵۰ تا ۳۰۰ متر	از ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر	از ۱۲۰ تا ۲۰۰ متر	تا ۱۲۰ متر	
(بدون تخفیف) ۵	(بدون تخفیف) ۵	(بدون تخفیف) ۵	(بدون تخفیف) ۵	۳/۵	۳۳
(بدون تخفیف) ۱۳	۱۲	۱۰	۹	۹	۶۳
(بدون تخفیف) ۱۵	۱۳/۵	۱۱/۵	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۳۲
(بدون تخفیف) ۱۷	۱۴/۵	۱۳	۱۲	۱۲	۲۳۰
(بدون تخفیف) ۲۰	۱۷/۵	۱۶	۱۴	۱۴	۴۰۰

اعمال تخفیف در حریم درجه یک ولتاژ ۲۰ کیلوولت مستلزم انجام مطالعات مستقل در هر مورد و ارائه آن به وزارت نیرو جهت

کسب مجوز می باشد.

پیوست (۲-۶): نیروی باد روی برج [۶]

نیروی باد بر روی برج بستگی به شکل برج در قسمت‌های مختلف آن داشته و برای این کار از ضریب شکل استفاده می‌شود. به منظور محاسبه نیروی باد، برج را به قطعات مختلف تقسیم‌بندی نموده و ضریب شکل هر تکه به طور مجزا و با توجه به تجارب به دست آمده محاسبه می‌گردد.

برای برج‌های مشبک (Lattice) ساخته شده از نبشی‌های فولادی این ضریب برای قسمت‌های پایین کمر برج، با توجه به اینکه در قسمت پایین برج سطوح از یکدیگر فاصله داشته و قطعات با فاصله نسبتاً بیشتری از یکدیگر قرار دارند، ضریب پوشش برای سطح عقبی در نظر گرفته نمی‌شود و با توجه به این که ضریب شکل برای سطح صاف $1/6$ است ضریب شکل برای قسمت پایین برج عبارتست از:

$$F_s = 1.6 \times 2 = 3.2 \quad (132-2)$$

برای قسمت بالای کمر برج که قطعات نسبتاً فشرده‌ترند. اگر A_w سطح جلوی باد و A' سطح عقبی باشد، داریم:

$$F_s = (1.6A_w + \frac{2}{3} \times 1.6A') / A_w \quad (133-2)$$

و اگر $A' = A_w$ باشد (که معمولاً اینطور است) خواهیم داشت:

$$F_s = 2.7 \quad (134-2)$$

برای قسمت کراس‌آرم‌ها که سطح طولی به نسبت سطح عرضی زیاد است، معمولاً یک چهارم نسبت سطح طولی را به سطح عرضی می‌بایستی اضافه نمود:

$$F_s = 2.7 \times \frac{(1 + 0.25A_1)}{A_t} \quad (135-2)$$

که در آن:

A_1 : مساحت طولی برج برحسب (m^2)

A_t : مساحت عرضی برج برحسب (m^2)

در حالتی که جهت وزش باد نسبت به برج دارای زاویه باشد، برای محاسبه فشار باد کافی است فشار محاسباتی را به دو مؤلفه عمود بر وجه‌های مجاور برج قسمت نمود و محاسبات را براساس آن فشار انجام داد. به طور کلی نیروی باد بر روی هر قطعه از برج به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$F = K \cdot W_{wn} \cdot F_s \cdot A_w \quad (136-2)$$

که در آن:

K: ضریب اضافه بار

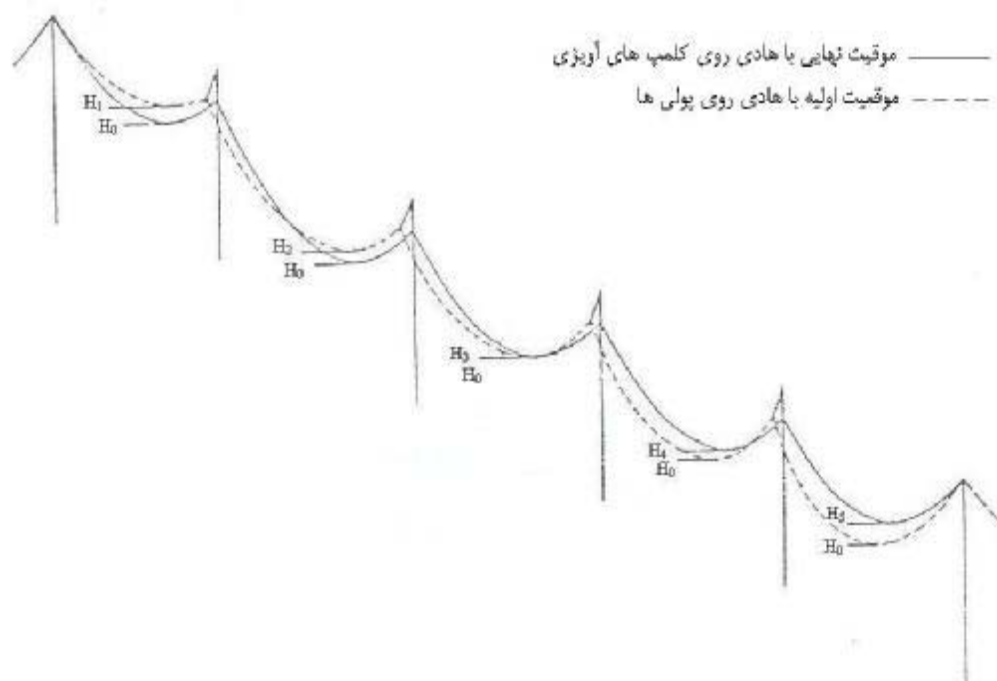
W_{wn} : فشار باد بر هر مترمربع

F_s : ضریب شکل

A_w : سطح قرارگرفته در مقابل باد

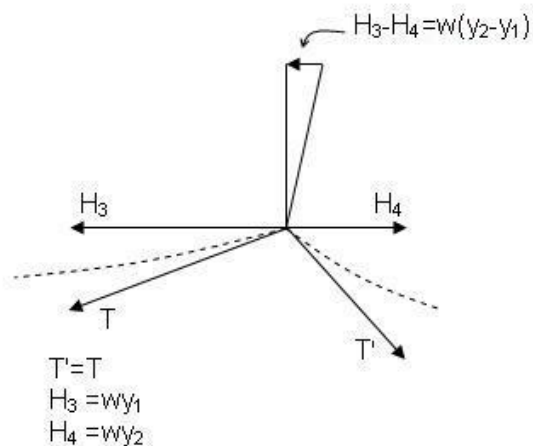
پیوست (۷-۲): جدول آفست [۲۵]

در زمان سیم‌کشی، هادی‌ای که در مسیر شیب‌دار روی پولی‌های بدون اصطکاک قرار می‌گیرد، به سمت پایین کشیده می‌شود. به همین دلیل فلش هادی در اسپن‌های با ارتفاع کمتر، بیشتر از فلش محاسبه شده و فلش هادی در اسپن‌های با ارتفاع بالاتر کمتر از فلش محاسبه شده می‌باشد. پولی سیم‌کشی اغلب به سمت اسپنی با نقطهٔ مینیمم بالاتر از نظر ارتفاع، متمایل می‌شود (نقطهٔ مینیمم سیم در هر اسپن، نقطه‌ای از سیم در طول اسپن است که از نظر ارتفاع در پایین‌ترین سطح قرار دارد). همانطوری که در شکل‌های (۱۱-۲) و (۱۲-۲) مشاهده می‌شود، تفاوت کشش افقی ناشی از دو اسپن مجاور، روی هادی واقع بر پولی سبب انحراف زنجیره مقرر می‌شود.



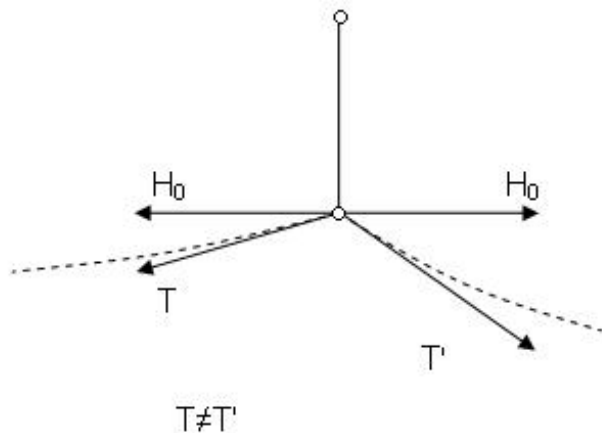
شکل ۲-۱۱: نمایش موقعیت اولیه و نهایی هادی روی پولی و کلمپ

کشش افقی ناشی از اسپنی که نقطه می‌نیم آن پایین‌تر است، کمتر از اسپنی خواهد بود که نقطه می‌نیم آن در ارتفاع بالاتری قرار گرفته است.



شکل ۲-۱۲: نمودار کشش اعمالی به هادی روی پولی

در صورت استفاده از جداول آفست، در زمان اتصال به کلمپ آویزی، تفاوت در کشش افقی (H_0) بین دو اسپن مجاور برابر با صفر خواهد شد. بنابراین زنجیره مقرر به صورت کاملاً عمودی قرار می‌گیرد. این شرایط در شکل (۲-۱۳) آورده شده است.



شکل ۲-۱۳: نمودار کشش اعمال شده به هادی روی کلمپ

نحوه تشکیل جدول آفست:

معادله زیر رابطه‌ای کلیدی در محاسبه جدول آفست است:

$$\text{مجموع اسلک در کلمپ آویزی} = \text{مجموع اسلک در پولی} \quad (۲-۱۳۷)$$

مقدار اسلک از رابطه زیر قابل محاسبه است:

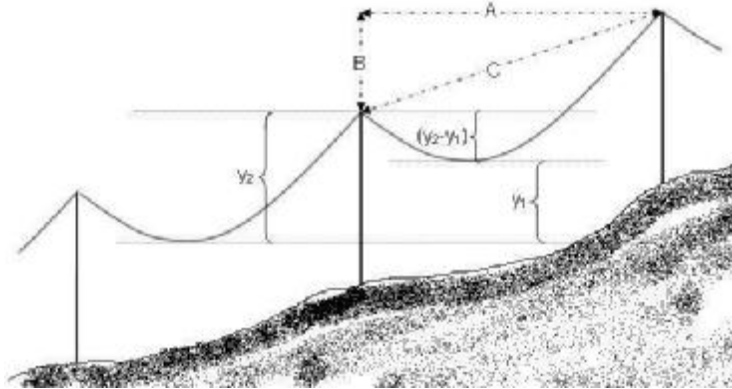
$$S = L - C \quad (۲-۱۳۸)$$

که در آن:

L : طول سیم

C : فاصله نقاط نصب هادی روی کلمپ

با فرض کشش افقی در اولین اسپن که از روی جداول سیم‌کشی بدست می‌آید، می‌توان کشش افقی و اسلک هادی روی پولی را در اسپن‌های بعدی محاسبه نمود. اگر مجموع اسلک‌های هادی روی پولی بزرگتر یا کوچکتر از اسلک‌های هادی در کلمپ‌های آویزی باشد، باید کشش افقی بالاتر یا پایین‌تری برای محاسبه اسلک‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد. باتوجه به نکات زیر و شکل (۲-۱۴) می‌توان جدول افست را به صورت جدول (۲-۲۳) تهیه و تکمیل نمود.



شکل ۲-۱۴: نمونه‌ای از پارامترهای موردنیاز در جدول افست

(الف) ستون ۱ نام برج‌ها می‌باشد.

(ب) ستون ۲ طول اسپن، (A)، می‌باشد.

(پ) ستون ۳ اختلاف ارتفاع دو برج مربوط به هر اسپن، (B)، می‌باشد.

(ت) ستون ۴ باتوجه به رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} \quad \text{می‌نیمم} \quad i=1, \dots, N-1 \quad (۲-۱۳۹)$$

که N تعداد برج‌هاست.

(ث) ستون ۵، مقدار $(y_2 - y_1)$ است که از اختلاف ارتفاع نقاط می‌نیمم در اسپن‌های مجاور در زمان وقوع ماکزیمم پروفیل فلش

بدست می‌آید.

(ج) ستون ۶، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(۶) \text{ ستون} = W_c (y_2 - y_1) \quad (۲-۱۴۰)$$

که در آن W_c وزن واحد طول هادی می‌باشد.

(چ) ستون ۷، همان مقدار کشش افقی فرض شده هادی روی پولی، (H) است که از جدول فلش - پولی بدست می‌آید.

(ح) ستون ۸، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_i = \frac{(A_i)^4}{10^6 \times C_i} \quad (۲-۱۴۱)$$

خ) ستون ۹، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_i = \frac{(H_i)^2}{10^6} \quad (142-2)$$

د) ستون ۱۰، از رابطه (۱۴۳-۲) محاسبه می‌شود.

$$F_i = \frac{A_i^4}{C_i H_i^2} = \frac{D_i}{E_i} \quad (143-2)$$

ذ) ستون ۱۱، مقدار کشش افقی تصحیح شده هادی روی پولی (H') است که آن را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$H'_i = H_i + (H_g - H_e) \quad (144-2)$$

که در آن H_g کشش افقی هادی در کلمپ‌ها بوده و H_e کشش افقی معادل هادی روی پولی است که مقدار آن را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$H_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} D_i}{\sum_{i=1}^{N-1} F_i}} \times 10^3 \quad (145-2)$$

ر) ستون ۱۲، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_i = \frac{W_c^2 \times A_i^4}{2 \times 10^6 \times C_i} = \frac{W_c^2}{2} \times (D_i) \quad (146-2)$$

ز) ستون ۱۳، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_i = \frac{10^6}{(H'_i)^2} \quad (147-2)$$

س) ستون ۱۴، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_i = \frac{10^6}{(H'_i)^2} - \frac{10^6}{(H_g)^2} = K_i - \frac{10^6}{(H_g)^2} \quad (148-2)$$

ش) ستون ۱۵، که آفست نام دارد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(\text{offset})_i = I_i \times L_i \quad (149-2)$$

ص) ستون ۱۶، که تنظیم نهایی می‌باشد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(\text{Final adjustment})_i = - \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (\text{offset})_i}{\sum_{i=1}^{N-1} I_i} \times I_i \quad (150-2)$$

ض) ستون ۱۷، از مجموع آفست و تنظیم نهایی به دست می‌آید و می‌توان نوشت:

$$M_i = (\text{offset})_i + (\text{Final adjustment})_i \quad (151-2)$$

ط) ستون ۱۸، که آفست نهایی می‌باشد و از مجموع مقادیر موجود در ستون ۱۷ (از برج اول تا برج موردنظر) به دست می‌آید. بدیهی است که در برج اول و برج آخر این مقدار برابر صفر خواهد بود.

جدول ۲-۲۳: جدول افست

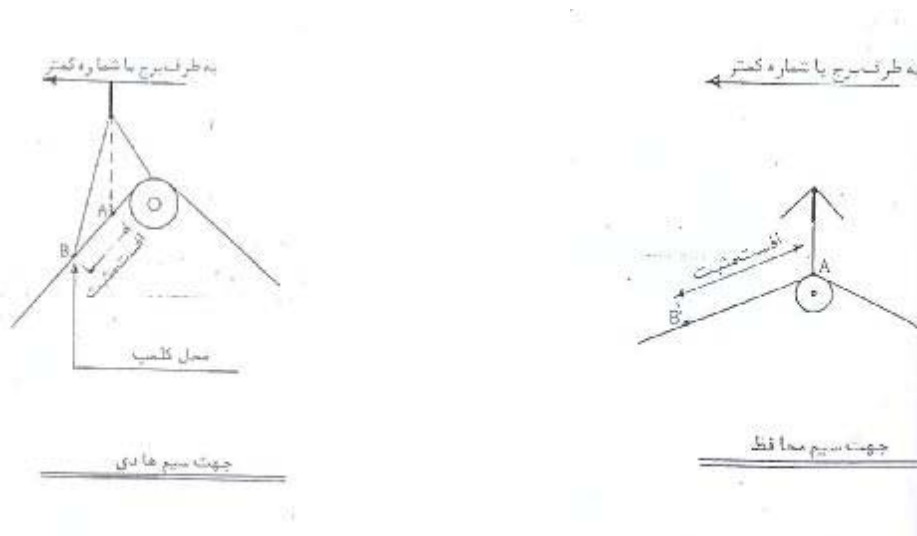
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tower name	(A)	(B)	(C)	$y_2 - y_1$	$W_C(y_2 - y_1)$	H assumed	(D)	(E)	(F)	H'	(I)	(K)	(L)	Offset	Final adjustment	M	Final offset

* مقادیر محاسبه شده در قسمت‌های خاکستری شده جدول جای می‌گیرند.

* منظور از (I) عدد مربوط به ستون A ام از سطر خاکستری شده جدول افست می‌باشد.

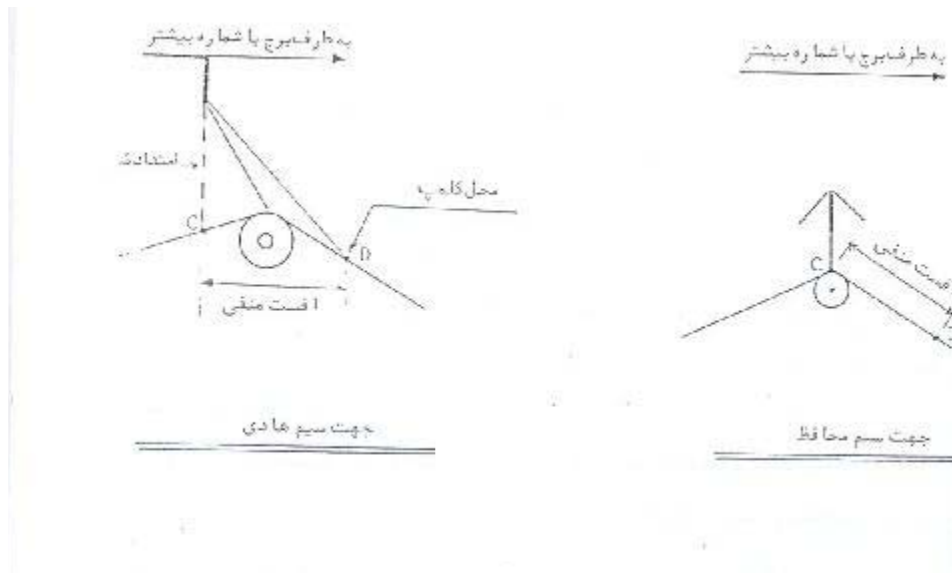
نحوه استفاده از جداول سیم‌کشی و آفست‌گیری

- (۱) پس از اتمام سیم‌کشی زمانی که سیمها روی پولی هستند ابتدا فلش سیم براساس ارقام مندرج در جداول فلش-پولی تنظیم می‌گردد.
 - (۲) حداقل چهار روز پس از تنظیم فلش سیم در حالتی که سیمها روی پولی هستند نسبت به تنظیم فلش سیم جهت کلمپینگ اقدام خواهد شد.
 - (۳) کلیه پولی‌ها بایستی با شرایط مناسب و با طول ثابت در هر سکشن مورد استفاده قرار گرفته، به نحوی که کنترل فلش سیم بطور یکسان انجام گیرد.
 - (۴) قبل از کلمپینگ بایستی نسبت به نصب آرمورهاها اقدام شود. جهت آفست‌گیری سیمهای محافظ و هادی عملیات ذیل لازم‌الاجراست. لازم به ذکر است که ابتدا عمل آفست‌گیری در یک سکشن بطور کامل، انجام و علامت‌گذاری شده و سپس نسبت به نصب کلمپ نهائی در محل علامت اقدام خواهد شد.
- (۴-۱) محل برخورد خط شاقول (که از نقطه مقره به برج آویزان شده است) با سیم را به دست می‌آوریم (نقطه A).
- (الف) اگر طبق جدول، آفست مثبت باشد، ابتدا از نقطه A بر روی سیم بطرف برج با شماره کمتر به اندازه مقدار آفست (که در جدول منعکس می‌باشد) جدا نموده (نقطه B) و علامت می‌زنیم. این نقطه محل اتصال کلمپ به سیم خواهد بود (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵: نحوه آفست‌گیری با مقدار آفست مثبت

ب) اگر طبق جداول، آفست منفی باشد، از نقطه C بر روی سیم به طرف برج با شماره بیشتر به اندازه مقدار آفست (که در جداول منعکس می‌باشد) جدا نموده، نقطه D را علامت می‌زنیم. این نقطه محل اتصال کلمپ به سیم خواهد بود (شکل ۲-۱۶).



شکل ۲-۱۶: نحوه آفست‌گیری با آفست منفی



مقدمه

در این فصل مراحل طراحی یک خط ۶۳ کیلوولت فرضی ارائه می‌گردد.

۱-۳- تعریف مسأله

هدف، طراحی یک خط ۶۳ کیلوولت تک مداره به طول تقریبی ۱۹ کیلومتر است. این خط از یک پست ۶۳ کیلوولت تغذیه شده و وظیفه برق رسانی به یک شهر را برعهده دارد. براساس مطالعات سیستم حداکثر جریان اتصال کوتاه عبوری از خط ۱۵ کیلوآمپر خواهد بود. حداکثر توان انتقالی خط نیز ۲۰ مگاوات پیش‌بینی شده است. بر اثر توسعه شهر، نیاز مصرفی این خط در آینده افزایش خواهد یافت. لذا جهت جلوگیری از لزوم احداث خطوط جدید در آینده، برج‌های از نوع دومداره در طراحی و احداث خط مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳- مسیریابی و زمین‌شناسی

در این مرحله ابتدا چند گزینه برای مسیر خط انتخاب شده و مزایا و معایب هر یک از گزینه‌ها نسبت به یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. به علاوه مشخصات زمین در مناطق عبور خط تعیین شده و مورد توجه قرار می‌گیرد. در صفحه بعد نمونه‌ای از شناسنامه یک سکشن ارائه شده است.

فرم مشخصات مربوط به سکشن

نام پروژه: شماره سکشن:
طول تقریبی سکشن: زاویه با سکشن بعدی:

شرایط مسیر	طول (کیلومتر)	شرایط مسیر	طول (کیلومتر)
کوهستانی		باتلاقی	
تپه ماهور		جنگلی و باغات انبوه	
دشت و بیابان		مزارع	

- تخمین نوع زمین (درصد):

سنگی محض	سنگی ضعیف	خاک خوب	خاک ضعیف	
				خشک
				آبدار

- تلاقی با راهها و جاده‌های موجود:

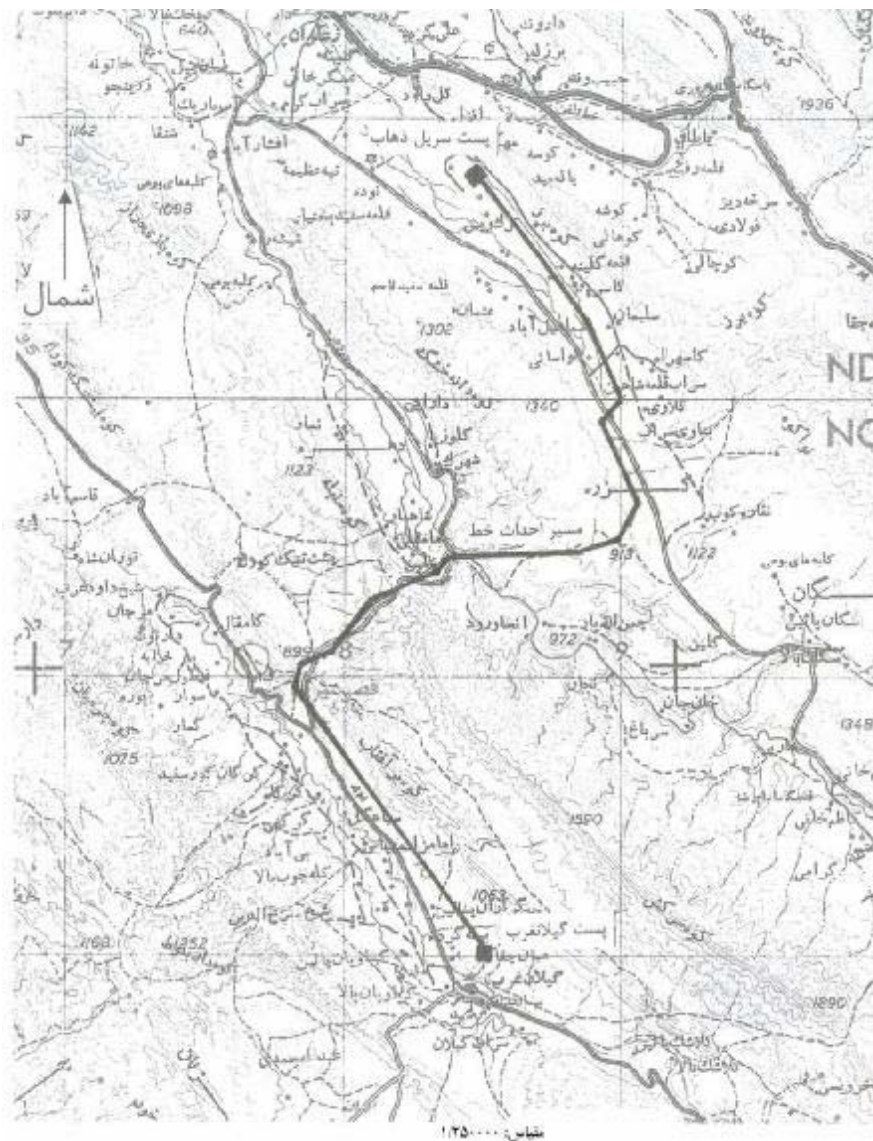
نوع جاده	تعداد تلاقی	نوع جاده	تعداد تلاقی
بزرگراه		جاده درجه دو	
جاده آسفالتی درجه یک		جاده درجه سه	

- تلاقی با خطوط انتقال نیرو:

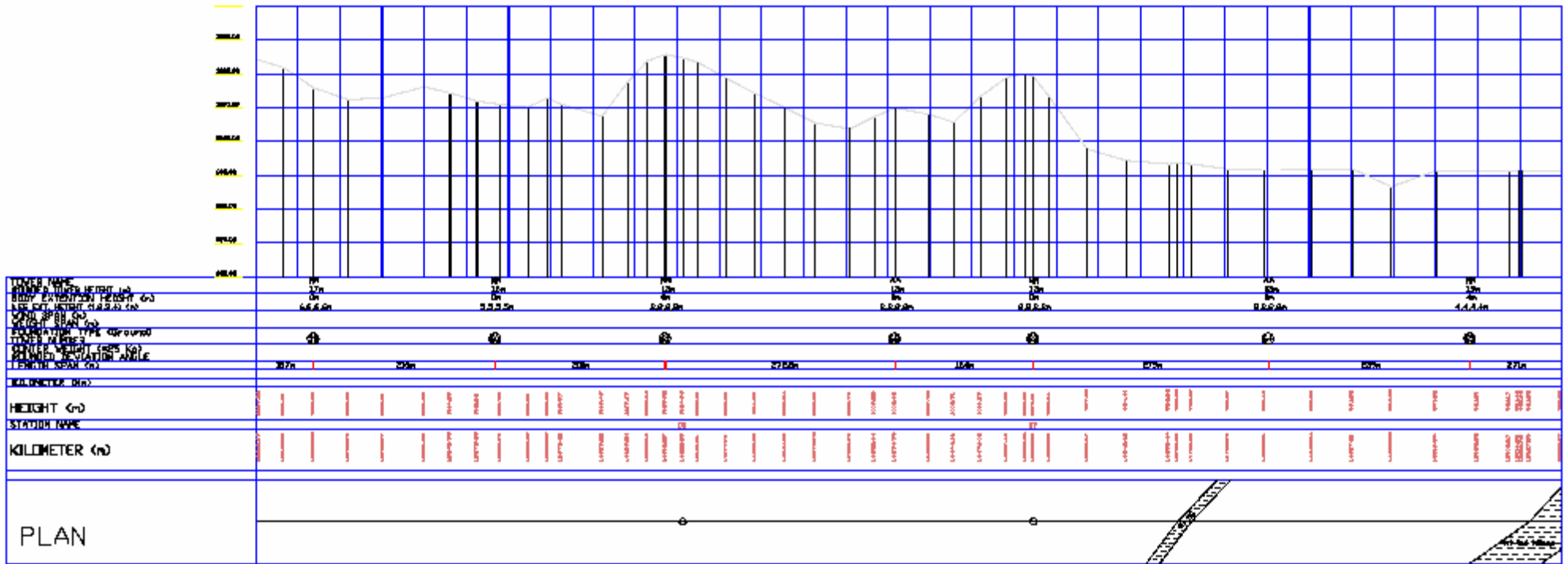
ولتاژ خطوط	تعداد تلاقی
۴۰۰kV	
۲۳۰kV	
۱۳۲kV	
ولتاژهای دیگر	

۳-۳- نقشه‌برداری و تهیه پلان و پروفیل

با انجام عملیات نقشه‌برداری از مسیر خط، محل دقیق نقاط زاویه، طول سکشن‌ها و نقشه‌های پلان و پروفیل مسیر به دست می‌آید. در شکل‌های زیر پلان و پروفیل نوعی بخشی از مسیر عبور یک خط نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: پلان بخشی از مسیر خط



۳-۴- تعیین شرایط آب و هوایی

با بررسی آمار سالیانه ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در مسیر، مشخصات آب و هوایی منطقه به صورت جدول (۳-۱) به دست آمده است.

جدول ۳-۱: آمار هواشناسی منطقه عبور خط

۹۹۰	ارتفاع از سطح دریا (متر)
-۲۵	حداقل دما (درجه سانتیگراد)
۴۰	حداکثر دما (درجه سانتیگراد)
۱۸	دمای متوسط روزانه (درجه سانتیگراد)
۲۰	تعداد روزهای رعد و برق در سال
۴۰	حداکثر سرعت باد (متر بر ثانیه)
۲۲	تعداد روزهای برفی و یخبندان

حداکثر ارتفاع مسیر خط حدود ۱۰۲۰ متر بوده و متوسط ارتفاع خط از سطح دریا جهت محاسبات طراحی ۱۰۰۰ متر فرض می‌شود.

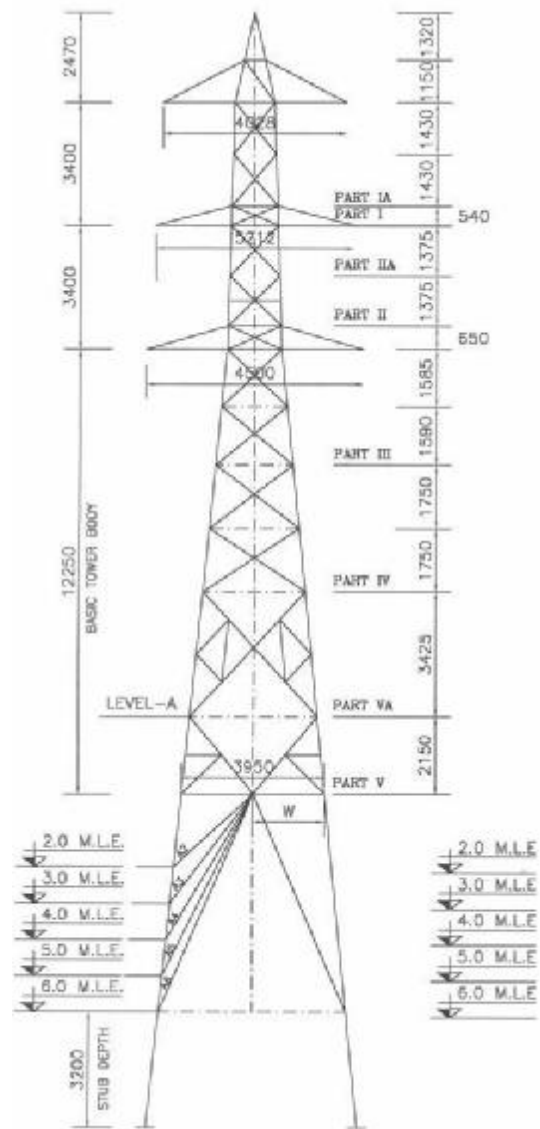
با توجه به جدول (۳-۱) منطقه عبور خط در رده شرایط آب و هوایی سنگین قرار می‌گیرد و لذا ترکیب و شرایط بارگذاری برای خط مطابق با جدول (۳-۲) خواهد بود. از آنجا که ارتفاع منطقه ۱۰۰۰ متر است حداکثر ضخامت یخ ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳-۲: شرایط بارگذاری خط

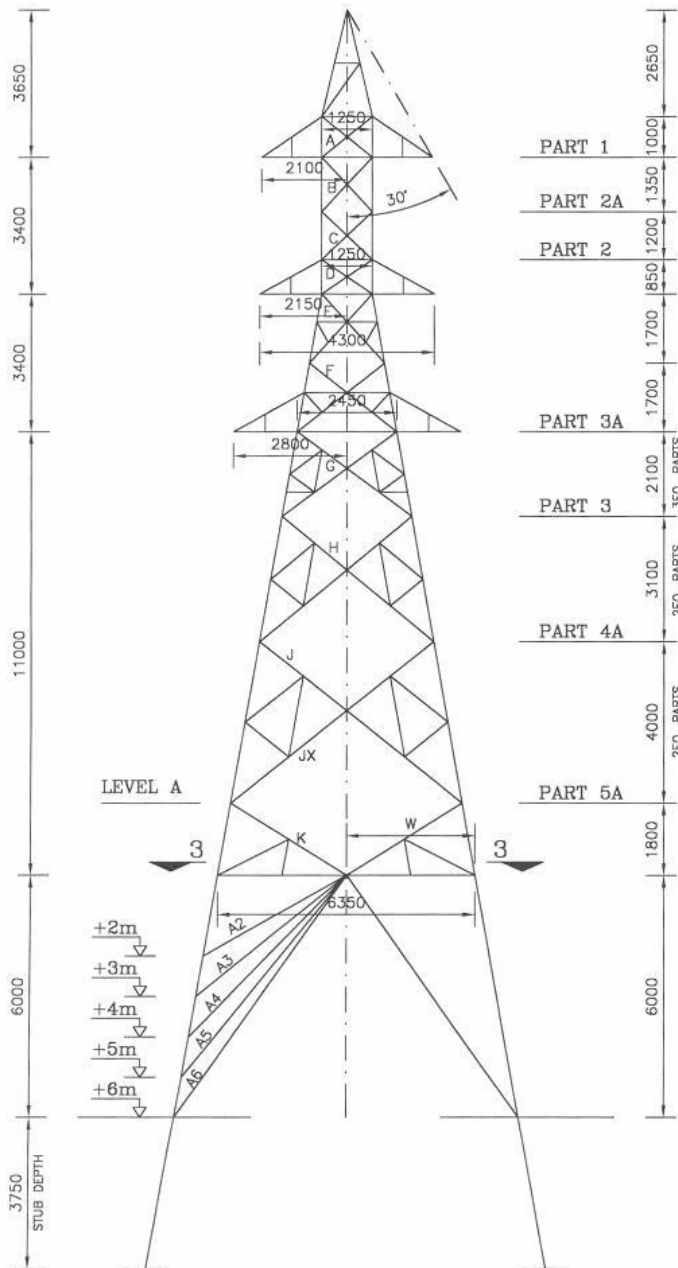
شرح بارگذاری	ضخامت یخ (mm)	سرعت باد (m/s)	دما (°C)
باد شدید	۰	۴۰	۱۵
یخ سنگین	۲۰	۰	-۵
یخ و باد متوسط	۱۵	۲۰	-۲۰
حداقل دما	۰	۰	-۲۵
حداکثر دما	۰	۰	۴۰
رژیم EDS	۰	۰	۱۸

۳-۵- انتخاب اولیه برج

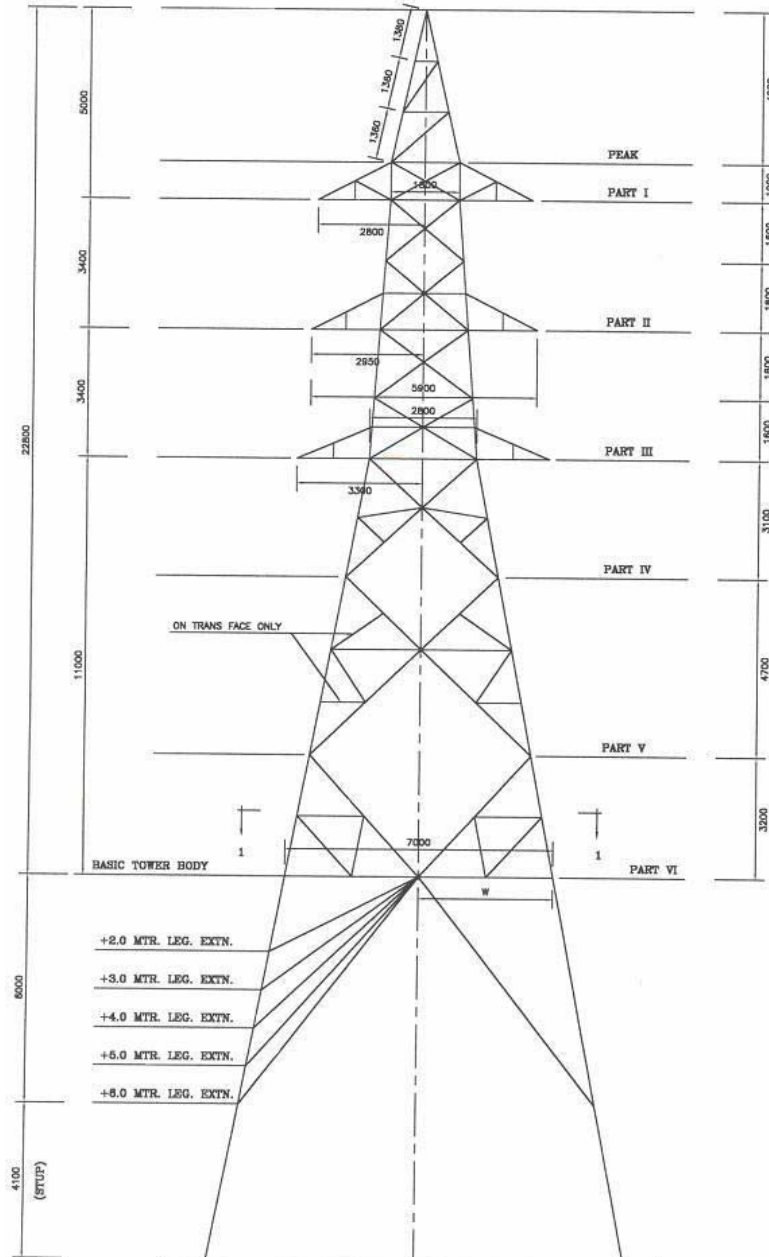
برج‌های فولادی دو مداره مورد استفاده در خطوط ۶۳ کیلوولت عموماً از نوع NN، AA و CC است که امکان ساخت آنها در داخل کشور وجود دارد و برای شرایط آب و هوایی منطقه نیز مناسب می‌باشد. از برج‌های تیپ NN به صورت آویزی، تیپ AA به صورت زاویه سبک و تیپ CC برای زاویه سنگین و ترمینال استفاده خواهد شد. در شکل‌های زیر ابعاد کلی برج‌های مذکور ارائه شده است.



شکل ۳-۳: ابعاد برج NN مورد استفاده در طراحی



شکل ۳-۴: ابعاد برج AA مورد استفاده در طراحی



شکل ۳-۵: ابعاد برج CC مورد استفاده در طراحی

۳-۶- محاسبات هادی

در این بخش ابتدا نوع هادی و تعداد آن در فاز انتخاب شده و سپس با محاسبه حداکثر دما، حداکثر جریان اتصال کوتاه قابل تحمل هادی، تلفات و افت ولتاژ، صحت انتخاب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۶-۱- انتخاب اولیه نوع هادی و تعداد باندل

انتخاب اولیه برای سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت هادی Lynx می‌باشد که مشخصات آن به شرح زیر است:

$$d = 19.53 \text{ mm} \quad \text{قطر خارجی}$$

$$A = 226.2 \text{ mm}^2 \quad \text{سطح مقطع}$$

$$W_C = 0.842 \text{ Kg/m} \quad \text{وزن واحد طول}$$

$$R_{dc,20} = 0.1576 \text{ } \Omega/\text{Km} \quad \text{مقاومت dc در دمای } 20 \text{ درجه}$$

$$U.T.S = 8137 \text{ Kg} \quad \text{حداکثر مقاومت کششی}$$

$$E_{in} = 6320 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{مدول الاستیسیته اولیه}$$

$$E_f = 8155 \text{ kg/mm}^2 \quad \text{مدول الاستیسیته نهایی}$$

$$\alpha = 17.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad \text{ضریب انبساط طولی}$$

$$t_{creep} = 15^\circ\text{C} \quad \text{دمای معادل پیری}$$

برای هر فاز یک هادی انتخاب می‌شود.

۳-۶-۲- بررسی انتخاب اولیه

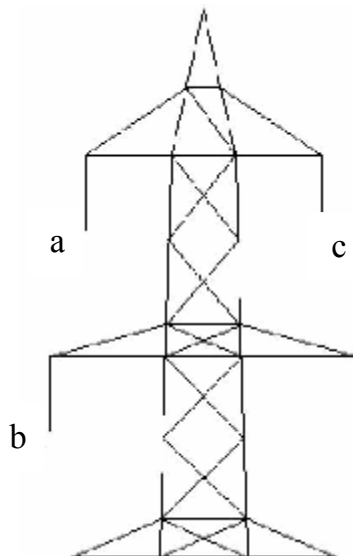
۳-۶-۲-۱- محاسبه پارامترهای الکتریکی خط

الف) راکتانس سلفی

شعاع معادل هادی هر فاز برابر است با:

$$GMR = 0.7788r = 0.7788 \times \frac{19.53}{2} = 7.605 \text{ mm}$$

آرایش هادی‌ها روی برج مطابق شکل (۳-۶) است:



شکل ۳-۶: آرایش هادی‌ها روی برج

باتوجه به ابعاد برج آویزی:

$$D_{ab} = \sqrt{(3.4)^2 + \left(\frac{5.212 - 4.028}{2}\right)^2} = 3.451 \text{ m}$$

$$D_{bc} = \sqrt{(3.4)^2 + \left(\frac{5.212 + 4.028}{2}\right)^2} = 5.736 \text{ m}$$

$$D_{ca} = 4.028 \text{ m}$$

فاصله متوسط هندسی فازها مطابق زیر به دست می‌آید.

$$\text{GMD} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} = \sqrt[3]{3.451 \times 5.736 \times 4.028} = 4.304 \text{ m}$$

راکتانس سلفی هر کیلومتر از هر فاز برابر است با:

$$X_L = 0.1447 \text{Log} \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}} = 0.1447 \text{Log} \frac{4.304}{0.007605} = 0.3983 \text{ } \Omega / \text{km}$$

با توجه به اینکه طول تقریبی خط ۱۹ کیلومتر است راکتانس سلفی خط برابر خواهد بود با:

$$0.3983 \times 19 = 7.5677 \text{ } \Omega$$

(ب) راکتانس خازنی

راکتانس خازنی هر فاز از رابطه (۲-۲) حاصل می‌شود.

$$X_c = 0.1318 \text{Log} \frac{\text{GMD}}{r_e} = 0.3485 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$$

راکتانس خازنی کل خط برابر است با:

$$\frac{0.3485}{19} = 0.0183 \text{ M}\Omega$$

(پ) امپدانس موجی خط:

$$Z_1 \approx \sqrt{\frac{1}{c}} = \sqrt{\frac{X_L}{1}} = \sqrt{X_L \cdot X_C} = \sqrt{0.3983 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 0.3485 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}} = 0.3726 \text{ k}\Omega = 372.6 \Omega$$

۳-۲-۲- محاسبه حداکثر دمای هادی

با فرض ضریب توان ۰/۸۵، حداکثر جریان عبوری از خط برابر است با:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V\cos\theta} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 63 \times 0.85} \approx 216 \text{ A}$$

با توجه به جدول (۱-۲) هادی Lynx می‌تواند در محیطی با حداکثر دمای ۴۰ درجه سانتیگراد جریانی به بزرگی ۴۲۹ آمپر را تحمل کند. بنابراین هادی انتخاب شده برای خط از این نظر کاملاً مناسب است. اما باید حداکثر دمای هادی را نیز محاسبه نمود. بدین منظور اجزاء رابطه تعادل حرارتی (۲-۱۲) را محاسبه و در آن جایگذاری می‌کنیم. سرعت باد در شرایط طبیعی ۰/۶۱ متر بر ثانیه فرض می‌شود.

$$R_{dc,20} = 0.1576 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$R_{ac,20} = R_{dc} + 1.5 \times 10^{-3} (R_{dc}^{0.25} - R_{dc}^{-0.25})^2 = 0.159 \Omega/\text{km} = 0.159 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$$

$$M=230.8$$

$$T_C=T_2 - 273$$

$$\gamma = 0.9$$

$$S_f=1000 \text{ W/m}^2$$

$$S_B = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$K_f=0.9$$

$$T_1=40+273=313^\circ\text{K}$$

$$\lambda = 0.02585 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$\text{Nu} = 0.65\text{Re}^{0.2} + 0.23\text{Re}^{0.61}$$

$$\text{Re}=1.644 \times 10^9 \times 0.61d [0.5(T_1+T_2)]^{-1.78} = 1.644 \times 10^9 \times 0.61 \times 19.53 \times 10^{-3} \times [0.5(T_2+313)]^{-1.78}$$

$$= \frac{67261614}{(T_2 + 313)^{1.78}}$$

پس از جایگذاری و ساده‌سازی، طرف چپ معادله تعادل برابر است با:

$$L.H.S=0.02958T_2+16.33$$

و طرف راست:

$$R.H.S = 3.131 \times 10^{-9} T_2^4 - 30.05 + (0.08121T_2 - 25.418) \times \left[\frac{23.904}{(T_2 + 313)^{0.356}} + \frac{13698.3}{(T_2 + 313)^{1.0858}} \right]$$

با سعی و خطا مقدار T_2 در بازه ۵۶ تا ۵۷ درجه سانتیگراد به دست می‌آید که آن را ۵۷ درجه فرض می‌کنیم. لذا از روابط (۲-۵) و (۲-۱۱) خواهیم داشت:

$$P_j = R_T I^2 = (0.159 \times 10^{-3} \times \frac{230.8+57}{230.8+20}) \times (216)^2 = 0.182 \times 10^{-3} \times (216)^2 = 8.51 \text{ W/m}$$

0.182×10^{-3} مقاومت ac هر متر خط در حداکثر دمای کاری (R_u) است. P_{sol} و P_{rad} از روابط (۲-۶) و (۲-۷) به دست می‌آیند.

$$P_{sol} = \gamma \cdot d \cdot S_i = 0.9 \times 19.53 \times 10^{-3} \times 1000 = 17.58 \text{ W/m}$$

$$P_{rad} = S \pi d K_e (T_2^4 - T_1^4) = 5.67 \times 10^{-8} \pi \times 19.53 \times 10^{-3} \times 0.9 [(57 + 273)^4 - (40 + 273)^4] = 7.08 \text{ W/m}$$

عدد رینولدز برابر است با:

$$R_e = \frac{67261614}{(T_2 + 313)^{1.78}} = \frac{67261614}{(57 + 313)^{1.78}} = 1804.5$$

برای محاسبه P_{conv} از رابطه (۲-۸)، ابتدا باید عدد ناسلت از رابطه (۲-۹) محاسبه شود.

$$Nu = 0.65 Re^{0.2} + 0.23 Re^{0.61} = 0.65(1804.5)^{0.2} + 0.23(1804.5)^{0.61} = 25.20$$

$$P_{conv} = \lambda \cdot Nu \cdot (T_2 - T_1) \pi = 0.02585 \times 25.20 \times (57 - 40) \pi = 34.79 \text{ W/m}$$

۳-۲-۶-۳- جریان اتصال کوتاه

جریان اتصال کوتاه قابل تحمل هادی (با فرض اینکه جریان به مدت ۱ ثانیه از آن عبور کند) طبق رابطه (۲-۱۳) برابر است با:

$$I_{sc} = K_{sc} \frac{A}{\sqrt{t_c}} = 85 \times 226.2 = 19227 \text{ A} = 19.2 \text{ kA}$$

جریان فوق از حداکثر جریان اتصال کوتاه خط بزرگتر است و لذا هادی Lynx از بابت تحمل جریان اتصال کوتاه نیز مناسب می‌باشد.

۳-۲-۶-۴- محاسبه تلفات

۳-۲-۶-۱- تلفات اهمی

مقاومت ac کل موثر هر فاز در حداکثر دمای کاری برابر است با:

$$R_u = 0.182 \times 10^{-3} \times 19000 = 3.458 \Omega$$

با توجه به کوتاه بودن خط می‌توان از جریان شارژ خازنی آن صرف نظر نمود. لذا تلفات اهمی خط از رابطه (۲-۱۸) به دست می‌آید.

تلفات اهمی ۲/۴ درصد توان انتقالی خط است که در محدوده مجاز (کوچکتر از ۵ درصد) قرار دارد.

$$P_L = \frac{R_u P^2}{V_L^2 \cos^2 \theta} = 3R_e I^2 \times 10^{-6} = 3 \times 3.458 \times (216)^2 \times 10^{-6} = 0.484 \text{ MW}$$

۳-۶-۲-۲- تلفات کرونا

طبق رابطه (۲-۱۹) گرادیان ولتاژ در سطح هادی برابر است با:

$$g = \frac{V}{r \ln(\text{GMD}/r)} = \frac{63/\sqrt{3}}{0.9765 \ln(430.4/0.9765)} = 6.12 \text{ kV/cm}$$

در صورتی تلفات کرونا رخ می‌دهد که ولتاژ هادی از ولتاژ شروع کرونا V_0 بیشتر باشد. در دمای محیطی ۴۰ درجه و در سطح دریا (فشار ۷۶ سانتی‌متر جیوه)، برای محاسبه V_0 از رابطه (۲-۲۲)، ابتدا δ_d از رابطه (۲-۲۳) به دست می‌آید.

$$\delta_d = \frac{3.92 \times b}{273 + T_m} = \frac{3.92 \times 76}{273 + 40} = 0.952$$

$$V_0 = 21.1 \times m \times r \times (\delta_d)^{\frac{2}{3}} \times \ln \frac{\text{GMD}}{r} = 21.1 \times 0.83 \times \frac{1.953}{2} \times (0.952)^{\frac{2}{3}} \times \ln \frac{430.4}{0.9765} = 100.8 \text{ kV}$$

اگرچه در ارتفاع ۱۰۰۰ متر V_0 کوچکتر از مقدار فوق است اما به هر حال ولتاژ شروع کرونا بسیار بزرگتر از ولتاژ هادی است و لذا در شرایط E.D.S، خط تلفات کرونای قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت.

۳-۶-۳- انتخاب نهایی

با توجه به اینکه یک هادی Lynx در هر فاز مشخصات مورد نظر را تأمین می‌کند و طبق استاندارد امکان انتخاب هادی با مقطع کمتر وجود ندارد انتخاب اولیه تثبیت می‌شود.

- تلفات انرژی سالیانه

ضریب بار با توجه به جدول (۲-۵) و شهری بودن منطقه‌ای که توسط خط تغذیه می‌شود $LF=0.6$ انتخاب می‌گردد. ضریب تلفات را می‌توان با یکی از مدل‌های (۲-۲۴) یا (۲-۲۵) به دست آورد. برای استفاده از مدل رابطه (۲-۲۴) ضریب a برابر مقدار آن برای متوسط شبکه سراسری یعنی ۰/۹۵ انتخاب می‌شود.

$$LSF = a.LF^2 + (1-a).LF = 0.95 \times 0.6^2 + 0.05 \times 0.6 = 0.372$$

$$LSF = K_L.LF^2 = 1.09 \times 0.6^2 = 0.3924$$

ضریب تلفات را برابر ۰/۳۹ انتخاب می‌کنیم. لذا تلفات انرژی سالیانه خط از رابطه (۲-۲۶) برابر است با:

$$W_y = P_L \times LSF \times C_L \times 8760 = 0.484 \times 0.39 \times 1 \times 8760 = 1653 \text{ MWh}$$

- حداکثر توان انتقالی طبق رابطه (۲-۲۷):

$$P_m = \frac{V_L^2}{X_L} = \frac{63^2}{7.5677} = 524.7 \text{ MW}$$

- توان طبیعی خط طبق رابطه (۲-۲۸):

$$P_0 = \frac{V_L^2}{Z_1} = \frac{63^2}{372.6} = 10.65 \text{ MW}$$

- توان راکتیو شارژ خط در بار کامل طبق روابط (۲-۲۹) و (۲-۳۰):

$$Q = P_0 \sigma \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^2 - 1 \right] = 10.65 \times \frac{2\pi \times 50 \times 19}{300000} \left[\left(\frac{20}{10.65} \right)^2 - 1 \right] = 0.535 \text{ MVA} = 535 \text{ kVA}$$

- توان راکتیو شارژ خط در بی‌باری با جاگذاری $P=0$ در رابطه (۲-۲۹) به دست می‌آید.

$$Q = -P_0 \sigma = -10.65 \times 0.0199 = -0.212 \text{ MVA} = -212 \text{ kVA}$$

۳-۶-۴- عملکرد مکانیکی هادی

۳-۶-۴-۱- تعیین اسپین طراحی و محدوده اسپین‌ها

اسپین طراحی برابر با ۲۵۰ متر انتخاب شده و جدول کشش - فلش برای محدوده ۰/۴×۲۵۰ تا ۱/۵×۲۵۰ متر (۱۰۰ تا ۳۷۵ متر) تهیه می‌گردد (طبق قواعد بخش ۲-۴-۶). با این حال باید حداکثر اسپین الکتریکی نیز مشخص گردد. بدین منظور با توجه به اینکه آرایش هادی‌ها روی برج به صورت مثلثی با دو هادی در یک سطح است ضریب K_e مطابق با جدول (۲-۶) برابر با ۰/۶۵ انتخاب می‌گردد. با استفاده از رابطه (۲-۳۱) حداکثر فلش مجاز برابر است با:

$$f_m = \left(\frac{PC - \frac{V_L}{150}}{K_e} \right)^2 - L_1$$

فاصله عمودی دو فاز در محل برج (PC) با توجه به ابعاد برج آویزی برابر با ۳/۴ متر است. طول مقره را نیز می‌توان در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت در حدود ۱/۲۵ متر فرض کرد. لذا داریم:

$$f_{\max} = \left(\frac{3.4 - \frac{63}{150}}{0.65} \right)^2 - 1.25 \approx 19.8 \text{ m}$$

پس از تهیه جدول کشش - فلش باید کلیه اسپین‌هایی که حداکثر فلش آنها از مقدار فوق تجاوز می‌کند شناسایی و در هنگام برج‌گذاری از آنها اجتناب شود.

۳-۶-۴-۲- تهیه جدول کشش - فلش هادی

تهیه جدول کشش - فلش می‌بایستی با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری صورت گیرد. در ادامه خروجی برنامه مورد استفاده برای هادی Lynx در شرایط آب و هوایی سنگین ارائه شده است. لازم به ذکر است که در تهیه جدول، یک حالت بارگذاری مطابق با استاندارد NESC نیز در نظر گرفته شده است.

SAG-TENSION & BASE DETERMINATION TABLE
INPUT DATA FOR SAG-TENSION

Page:1

CONDUCTOR NAME:		LYNX
INITIAL MODULUS OF ELASTICITY:	(kg/mm2)	6320
FINAL MODULUS OF ELASTICITY:	(kg/mm2)	8157
INITIAL COEFF OF LINEAR EXPANSION:	(1/°C)	0.0000178
FINAL COEFF OF LINEAR EXPANSION:	(1/°C)	0.0000178
CROSS SECTION AREA OF CONDUCTOR:	(mm2)	226.2
BARE CONDUCTOR UNIT WEIGHT:	(kg/m)	0.842
DIAMETER OF CONDUCTOR:	(mm)	19.53
ULTIMATE STRENGTH OF CONDUCTOR:	(kg)	8137
ICE UNIT WEIGHT:	(gr/cm3)	0.913
EQUIVALENT CREEP TEMPERATURE:	(°C)	15

LOADING CASES ZONE : HEAVY

Case	Ice Thickness (mm)	Wind Speed (m/s)	Temp (°C)	Tension Limit %UTS	K	Unit Weight (kg/m)
1) HIGH WIND	0.00	40.00	15.00	50.00	0.00	2.127
2) HEAVY ICE	20.00	0.00	-5.00	50.00	0.00	3.110
3) WIND & ICE	15.00	20.00	-20.00	40.00	0.00	2.636
4) NESC (HEAVY)	12.50	17.80	-20.00	40.00	0.45	2.627
5) MIN TEMP	0.00	0.00	-25.00	25.00	0.00	0.842
6) MAX TEMP	0.00	0.00	60.00	40.00	0.00	0.842
7) EDS FINAL	0.00	0.00	18.00	20.00	0.00	0.842
8) 30% HIGH WIND	0.00	21.90	15.00	40.00	0.00	1.026
9) MAX CREEP	0.00	0.00	75.00	40.00	0.00	0.842

Start Span = 100 End Span = 380 Step = 10 Rulling Span = 250

Span (m)	Governing case	Cold Param (m)	EDS Initial Tension	Max Creep Tension	Hot Param (m)	Sag in Hot Param	Tension Case No. 1	%UTS	Tension Case No. 2	%UTS	Tension Case No. 3	%UTS	Tension Case No. 4	%UTS	Tension Case No. 5	%UTS	Tension Case No. 6	%UTS	Tension Case No. 7	%UTS	Tension Case No. 8	%UTS	Tension Case No. 9	%UTS	Max Sag in Case	No.
100.00	5	2416	1219.5	583.2	693	1.80	1738.9	21	2467.1	30	2556.2	31	2552.6	31	2034.3	25	604.2	7	1017.1	13	1174.7	14	533.5	7	1.97	9
110.00	5	2416	1260.1	630.7	749	2.02	1824.8	22	2574.8	32	2639.1	32	2635.1	32	2034.3	25	649.0	8	1055.1	13	1219.3	15	576.3	7	2.21	9
120.00	5	2416	1298.8	676.5	803	2.24	1907.3	23	2679.2	33	2720.3	33	2716.0	33	2034.3	25	692.0	9	1091.3	13	1262.0	16	617.7	8	2.45	9
130.00	5	2416	1335.6	720.7	856	2.47	1986.8	24	2780.2	34	2799.7	34	2795.1	34	2034.3	25	733.2	9	1126.0	14	1302.9	16	657.6	8	2.70	9
140.00	5	2416	1370.7	763.3	907	2.70	2063.3	25	2878.2	35	2877.2	35	2872.3	35	2034.3	25	772.9	9	1159.1	14	1342.1	16	696.2	9	2.96	9
150.00	5	2416	1404.0	804.5	955	2.94	2137.2	26	2973.2	37	2952.8	36	2947.6	36	2034.3	25	811.0	10	1190.7	15	1379.8	17	733.4	9	3.23	9
160.00	5	2416	1435.6	844.2	1003	3.19	2208.5	27	3065.5	38	3026.5	37	3021.0	37	2034.3	25	847.6	10	1220.9	15	1415.9	17	769.5	9	3.50	9
170.00	5	2416	1465.7	882.6	1048	3.45	2277.4	28	3155.1	39	3098.3	38	3092.6	38	2034.3	25	882.9	11	1249.8	15	1450.5	18	804.3	10	3.78	9
180.00	5	2416	1494.2	919.6	1089	3.72	2344.1	29	3242.1	40	3168.2	39	3162.3	39	2034.3	25	916.8	11	1277.4	16	1483.7	18	838.0	10	4.07	9
190.00	5	2416	1521.4	955.3	1128	4.00	2408.7	30	3326.8	41	3236.4	40	3230.2	40	2034.3	25	949.5	12	1303.9	16	1515.6	19	870.6	11	4.36	9
192.75	3	2416	1528.6	964.9	1138	4.08	2426.1	30	3349.6	41	3254.8	40	3248.5	40	2034.2	25	958.3	12	1310.9	16	1524.2	19	879.3	11	4.45	9
200.00	3	2334	1500.3	971.2	1143	4.37	2434.5	30	3367.2	41	3254.8	40	3248.3	40	1965.5	24	962.6	12	1293.0	16	1508.6	19	887.1	11	4.75	9
210.00	3	2229	1463.8	978.8	1150	4.79	2445.3	30	3390.1	42	3254.8	40	3248.0	40	1876.8	23	968.0	12	1270.7	16	1489.0	18	897.1	11	5.17	9
220.00	3	2133	1430.4	985.5	1155	5.24	2455.4	30	3411.8	42	3254.8	40	3247.7	40	1795.6	22	972.9	12	1251.0	15	1471.4	18	906.1	11	5.62	9
230.00	3	2046	1400.0	991.3	1161	5.70	2464.8	30	3432.2	42	3254.8	40	3247.5	40	1722.4	21	977.3	12	1233.4	15	1455.6	18	914.4	11	6.09	9
240.00	3	1968	1372.4	996.3	1166	6.18	2473.5	30	3451.4	42	3254.8	40	3247.3	40	1656.9	20	981.4	12	1217.9	15	1441.4	18	922.0	11	6.58	9

SAG-TENSION & BASE DETERMINATION TABLE

Page:2

INPUT DATA FOR SAG-TENSION

Span (m)	Governing case	Cold Param (m)	EDS Initial Tension	Max Creep Tension	Hot Param (m)	Sag in Hot Param	Tension Case No. 1	% UTS	Tension Case No. 2	% UTS	Tension Case No. 3	% UTS	Tension Case No. 4	% UTS	Tension Case No. 5	% UTS	Tension Case No. 6	% UTS	Tension Case No. 7	% UTS	Tension Case No. 8	% UTS	Tension Case No. 9	% UTS	Max Sag in Case	No.
250.00	3	1899	1347.3	1000.7	1170	6.68	2481.6	30	3469.4	43	3254.8	40	3247.0	40	1598.8	20	985.1	12	1204.0	15	1428.6	18	929.0	11	7.08	9
260.00	3	1838	1324.7	1004.5	1174	7.20	2489.2	31	3486.5	43	3254.8	40	3246.8	40	1547.5	19	988.4	12	1191.6	15	1417.1	17	935.4	11	7.61	9
270.00	3	1784	1304.2	1007.9	1178	7.74	2496.2	31	3502.5	43	3254.8	40	3246.6	40	1502.3	18	991.5	12	1180.5	15	1406.7	17	941.3	12	8.15	9
280.00	3	1737	1285.7	1010.8	1181	8.30	2502.8	31	3517.6	43	3254.8	40	3246.5	40	1462.4	18	994.4	12	1170.6	14	1397.3	17	946.8	12	8.72	9
290.00	3	1695	1268.9	1013.4	1184	8.88	2508.9	31	3531.9	43	3254.8	40	3246.3	40	1427.2	18	996.9	12	1161.6	14	1388.7	17	951.8	12	9.30	9
300.00	3	1658	1253.7	1015.7	1187	9.48	2514.6	31	3545.3	44	3254.8	40	3246.1	40	1396.0	17	999.3	12	1153.5	14	1381.0	17	956.5	12	9.90	9
310.00	3	1625	1239.9	1017.7	1189	10.10	2520.0	31	3558.0	44	3254.8	40	3246.0	40	1368.4	17	1001.5	12	1146.2	14	1373.9	17	960.8	12	10.53	9
320.00	3	1596	1227.3	1019.5	1192	10.74	2525.0	31	3569.9	44	3254.8	40	3245.9	40	1343.9	17	1003.6	12	1139.5	14	1367.4	17	964.8	12	11.17	9
330.00	3	1570	1215.9	1021.1	1194	11.40	2529.7	31	3581.2	44	3254.8	40	3245.7	40	1322.0	16	1005.4	12	1133.5	14	1361.5	17	968.6	12	11.83	9
340.00	3	1547	1205.4	1022.6	1196	12.08	2534.0	31	3591.9	44	3254.8	40	3245.6	40	1302.4	16	1007.2	12	1127.9	14	1356.1	17	972.0	12	12.52	9
350.00	3	1526	1195.8	1023.9	1198	12.78	2538.2	31	3602.0	44	3254.8	40	3245.5	40	1284.7	16	1008.8	12	1122.9	14	1351.1	17	975.3	12	13.22	9
360.00	3	1507	1187.0	1025.0	1200	13.50	2542.0	31	3611.5	44	3254.8	40	3245.4	40	1268.9	16	1010.3	12	1118.2	14	1346.6	17	978.3	12	13.95	2
370.00	3	1490	1179.0	1026.1	1202	14.24	2545.6	31	3620.5	44	3254.8	40	3245.3	40	1254.5	15	1011.7	12	1114.0	14	1342.3	16	981.1	12	14.70	2
380.00	3	1474	1171.5	1027.0	1203	15.00	2549.0	31	3629.1	45	3254.8	40	3245.2	40	1241.5	15	1013.0	12	1110.0	14	1338.4	16	983.7	12	15.47	2

برای آشنایی با نحوه ساخت جدول و استفاده از معادله تغییر وضعیت نمونه‌ای از محاسبات برای اسپن ۱۰۰ متر ارائه می‌شود. در ابتدا فرض می‌کنیم برای اسپن تحت بررسی حالت ۵ (حداقل دما) بدترین حالت (حداکثر کشش) باشد. مطابق با جدول (۷-۲) حداقل ضریب اطمینان در حالت حداقل دما برابر با ۴ است یعنی کشش سیم در این حالت نباید از $\frac{1}{4}$ حداکثر مقاومت کششی (UTS) آن تجاوز کند. بنابراین شرایط اولیه برای معادله تغییر وضعیت عبارت است از:

$$T_1 = -25^\circ\text{C}$$

$$H_1 = 0.25 \times 8137 = 2034.25 \text{ kg}$$

$$W_1 = W_c = 0.842 \text{ kg/m}$$

اکنون می‌توان کشش سیم در هر یک از حالات دیگر را محاسبه نمود. به عنوان مثال شرایط یخ و باد (حالت شماره ۳) را به عنوان شرایط ثانویه در نظر گرفته و کشش سیم تحت شرایط مذکور را به دست می‌آوریم. در این حالت $T_2 = -20^\circ\text{C}$ است و W_2 باید با لحاظ کردن اثر یخ و باد محاسبه شود. از روابط (۳۴-۲) و (۳۵-۲) داریم:

$$t_2 = 15\text{mm} \Rightarrow W_i = \pi t(t+d) \times \rho_i \times 10^{-6} = \pi \times 15(15+19.53) \times 913 \times 10^{-6} = 1.486 \text{ kg/m}$$

$$W_{wn2} = 25 \text{ kg/m}^2 \Rightarrow W_w = W_{wn2} \times (d+2t) \times 10^{-3} = 25 \times (19.53+2 \times 15) \times 10^{-3} = 1.238 \text{ kg/m}$$

بنابراین وزن واحد طول هادی در شرایط ثانویه از رابطه (۳۶-۲) برابر است با:

$$W_2 = \sqrt{(W_c + W_i)^2 + W_w^2} = \sqrt{(0.842 + 1.486)^2 + 1.238^2} = 2.637 \text{ kg/m}$$

لذا معادله تغییر وضعیت با استفاده از رابطه (۳۳-۲) به صورت زیر خواهد بود:

$$H_2^3 + \left[\frac{226.2 \times 8157 \times 100^2 \times 0.842^2}{24 \times 2034.25^2} + 226.2 \times 8157 \times 17.8 \times 10^{-6} (-20 + 25) - 2034.25 \right] H_2^2 - \frac{226.2 \times 8157 \times 100^2 \times 2.637^2}{24} = 0 \Rightarrow H_2^3 - 1738.3 H_2^2 - 5346038484 = 0 \Rightarrow H_2 \approx 2556.2 \text{ kg}$$

یعنی در شرایط یخ و باد کشش هادی نسبت به حالت حداقل دما افزایش می‌یابد. ضریب اطمینان در حالت اخیر برابر است با:

$$S.F = \frac{U.T.S}{H_2} = \frac{8137}{2556.2} = 3.18$$

طبق جدول (۷-۲) حداقل ضریب ایمنی برای شرایط یخ و باد برابر با ۲/۵ است. محاسبات فوق باید برای سایر شرایط آب و هوایی و به ازای تمام اسپن‌ها صورت گیرد.

۷-۳- محاسبات عایقی

در این بخش ابتدا فاصله عایقی لازم بین هادی و برج از نقطه نظر صاعقه، کلیدزنی و فرکانس قدرت محاسبه شده و فاصله خزشی لازم از دیدگاه آلودگی محیط تعیین می‌شود. بر مبنای فواصل مذکور انتخاب مقدماتی زنجیره مقره انجام می‌گیرد. سپس فاصله هادی از زمین تحت بیشترین فلش و میزان انحراف زنجیره مقره تحت اثر بادهای مختلف محاسبه و با مقادیر مجاز مقایسه می‌شود.

در ادامه، جنس و سطح مقطع سیم محافظ انتخاب شده و در مورد مقدار مناسب مقاومت پایه برج تصمیم‌گیری می‌شود. سپس کارایی سیستم حفاظت از صاعقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. تهیه جدول کشش - فلش محافظ علاوه بر اینکه برای انجام سیم‌کشی آن مورد نیاز است برای کنترل فاصله بین هادی و سیم محافظ در وسط اسپن نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتهای این بخش طراحی سیستم زمین خط انجام خواهد شد.

۷-۳-۱- محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه

برای محاسبه فاصله مذکور، روال مطرح شده در بخش ۷-۲-۱ اجرا می‌شود.

الف) $BFR=10$ انتخاب می‌شود. باید توجه داشت که برای انتخاب مقدار مناسب BFR باید اطلاعات دقیقی درباره میزان زیان‌های ناشی از قطع خط در دست باشد. به هر حال یادآوری این نکته لازم است که انتخاب $BFR=10$ برای خطی به طول تقریبی ۲۰ کیلومتر معادل انتخاب $BFR=1$ برای خطی به طول ۲۰۰ کیلومتر است (از نظر تعداد قطع خط در سال). در عین حال اغلب اهمیت خطوط طویل انتقال بسیار بیشتر از خطوط کوتاه فوق توزیع است و لذا باید BFR کوچکتری برای آنها انتخاب شود. ب) تعداد متوسط صاعقه‌های برخوردی به هر ۱۰۰ کیلومتر خط در یک سال، N_L محاسبه می‌شود. بدین منظور ابتدا چگالی صاعقه‌های برخوردکننده به سطح زمین از رابطه (۲-۳۹) به دست می‌آید.

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} = 0.04 \times 20^{1.25} = 1.6918 \text{ flash / km}^2 - \text{year}$$

حال می‌توان N_L یعنی تعداد متوسط صاعقه‌های برخوردی به هر ۱۰۰ کیلومتر از خط در طی یک سال را از رابطه (۲-۳۷) بدست آورد:

$$N_L = 0.1N_g (28\bar{h}^{0.6} + S_g) \approx 0.1 \times 1.6918 (28 \times 25.75^{0.6} + 0) = 33.26 \text{ flash / 100km} - \text{year}$$

در رابطه فوق، ارتفاع تقریبی سیم گارد از زمین در محل برج با احتساب ۴ متر پایه الحاقی ۲۵/۷۵ متر در نظر گرفته شده است (از فلش سیم گارد صرف‌نظر شده است).

پ) جریان بحرانی خط از روابط (۲-۴۰) و (۲-۴۱) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$P(I_c) = \frac{BFR}{0.6N_L} = \frac{10}{0.6 \times 33.26} = 0.501102$$

$$I_c = 31 \left(\frac{1 - P(I_c)}{P(I_c)} \right)^{1/2.6} = 31 \left(\frac{1 - 0.501102}{0.501102} \right)^{1/2.6} = 30.95 \text{ kA}$$

ت) CFO_L از رابطه (۲-۴۲) به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$CFO_L = \frac{1}{K_{wf}} \left[(1 - C)R_e I_c + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} K_{PF} U_m \right]$$

مقدار R_e فعلاً برابر با ۲۰ اهم انتخاب می‌شود. لذا:

$$CFO_L = \frac{1}{1.31} \left[(1-0.3) \times 20 \times 30.95 + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 0.83 \times 72.5 \right] = 368.3 \text{ kV}$$

(ث) حداقل فاصله هوایی مجاز جهت حصول به BFR مطلوب از رابطه (۲-۴۳) به دست می‌آید.

$$\delta_h = e^{\frac{H_L}{8150}} = e^{\frac{1000}{8150}} = 0.88453$$

$$S_L = \frac{CFO_L}{605\delta_h} = \frac{368.3}{605 \times 0.88453} = 0.688 \text{ m} = 688 \text{ mm}$$

۳-۷-۲- محاسبه فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای کلیدزنی

فاصله مذکور با اجرای روال مطرح شده در بخش ۲-۷-۲ به دست می‌آید. لازم به ذکر است که اگرچه در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت کلیدزنی تأثیری بر طول زنجیره مقرر ندارد اما محاسبه فاصله عایقی لازم بر مبنای اضافه ولتاژهای کلیدزنی برای بررسی زوایای انحراف زنجیره مقرر الزامی است.

(الف) انتخاب SSFOR بر مبنای ملاحظات اقتصادی مستلزم در دست داشتن اطلاعات اقتصادی از زیانهای ناشی از قطع برق است. به هر حال در این مثال تعداد مطلوب قطعی‌های خط در هر ۱۰۰ بار کلیدزنی برابر با ۵ انتخاب می‌شود. (ب) از آنجا که در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت از کلیدهای مجهز به مقاومت وصل استفاده نمی‌شود مقدار E_2 برابر با ۲/۸ پریونیت اختیار می‌گردد. لذا σ_0 از رابطه (۲-۴۵) برابر است با:

$$\sigma_0 = 0.17(E_2 - 1) = 0.17 \times (2.8 - 1) = 0.306$$

(پ) معیار هماهنگی عایقی $\frac{V_3}{E_2}$ به دست می‌آید. بدین منظور ابتدا $\frac{\sigma_f}{CFO} = 0/05$ فرض شده و از معادله (۲-۴۸) تعداد برج‌های معادل خط n_e محاسبه می‌شود.

$$\gamma = \frac{E_s}{E_R} = 1 - 0.15(E_2 - 1) = 1 - 0.15(2.8 - 1) = 0.73$$

$$1 - 0.4 \frac{\sigma_f}{CFO} = 1 - 0.4 \times 0.05 = 0.98$$

از آنجا که $\gamma < 1 - 0.4 \frac{\sigma_f}{CFO}$ لذا:

$$n_e = \frac{K_n}{1-\gamma} \cdot \frac{\sigma_f}{CFO} \cdot n_T = \frac{0.7}{1-0.73} \times 0.05 \times \frac{19000}{250} = 9.85$$

n_T تعداد متوسط برج‌های خط است که با فرض طول ۱۹ کیلومتر و اسپین ۲۵۰ متر برای خط مقدار آن برابر ۷۶ خواهد بود.

از جدول (۸-۲) برای $n_e = 9/85$ ، مقدار K_f با درون‌یابی خطی عدد 0.9184 به دست می‌آید. برای تعیین K_G ابتدا رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\sigma_0}{E_2} = \frac{0.306}{2.8} = 0.109286$$

از جدول (۹-۲) مقدار K_G برای ۵ بار قطعی در هر ۱۰۰ بار کلیدزنی با استفاده از درون‌یابی خطی برابر 0.9151 می‌آید. در نهایت مقدار V_3 از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{V_3}{E_2} = K_f K_G = 0.9184 \times 0.9151 = 0.840428 \Rightarrow V_3 = 2.8 \times \frac{V_3}{E_2} = 2.3532$$

(ت) از رابطه (۴۹-۲) داریم:

$$CFO_A = \frac{V_3}{1 - \frac{3\sigma_f}{CFO}} = \frac{2.3532}{1 - 3 \times 0.05} = 2.768 \text{ pu}$$

$$CFO_A = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 72.5 \times 2.768 = 163.85 \text{ kV}$$

(ث) از رابطه (۵۰-۲) با فرض $m = 0.5$ مقدار S_s برای فازهای بیرونی برج به دست می‌آید.

$$S_s = \frac{8}{\frac{0.96 \times 3400 K_g (\delta_h)^m}{CFO_A} - 1} = \frac{8}{\frac{0.96 \times 3400 \times 1.45 \times (0.88453)^{0.5}}{163.85} - 1} = 0.306 \text{ m}$$

با جایگذاری S_s بدست آمده در رابطه (۵۱-۲) مقدار جدید m محاسبه می‌شود.

$$CFO_s = 0.96 K_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{S_s}} = 0.96 \times 1.45 \times \frac{3400}{1 + \frac{8}{0.306}} = 174.22$$

$$G_0 = \frac{CFO_s}{500 S_s} = \frac{174.22}{500 \times 0.306} = 1.139$$

$$m = 1.25 G_0 (G_0 - 0.2) = 1.25 \times 1.14 (1.14 - 0.2) = 1.34$$

با انجام روش تکراری، در نهایت $m = 1/33$ و $S_s = 0.334$ متر به دست می‌آید. ملاحظه می‌شود که فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای کلیدزنی از مقدار آن بر مبنای اضافه ولتاژهای صاعقه کوچکتر است و لذا S_s تعیین‌کننده طول زنجیره مقرر نخواهد بود.

۳-۷-۳- محاسبه فاصله عایقی هادی تا برج بر مبنای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت

از رابطه (۵۲-۲) حداقل فاصله لازم در شرایط جوی استاندارد به دست می‌آید.

$$U_{50} = 750 \times \ln(1 + 0.55 S_p^{1.2}) (1.35 K_m - 0.35 K_m^2)$$

ضریب تصحیح ارتفاع از رابطه (۵۳-۲) برابر است با:

$$K_a = e^{m' \left(\frac{H_L}{8150} \right)} = e^{\frac{1000}{8150}} = 1.13$$

که در این رابطه برای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت m' برابر یک و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. لذا فاصله عایقی لازم بین هادی و برج بر مبنای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت اعمال با ضریب تصحیح ارتفاع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$1.13 \times 72.5 = 750 \times \ln(1 + 0.55 S_p^{1.2}) (1.35 \times 1.45 - 0.35 \times 1.45^2)$$

$$S_p = 0.228 \text{ m}$$

۳-۷-۴- محاسبه فاصله خزشی هادی تا برج بر مبنای آلودگی محیط

آلودگی منطقه در رده سنگین ارزیابی شده است و لذا فاصله خزشی لازم طبق جدول (۲-۱۱) برابر با ۲۵ میلی‌متر بر کیلوولت انتخاب می‌گردد. به این ترتیب کل فاصله خزشی مورد نیاز طبق رابطه (۲-۵۴) برابر است با:

$$L_c = U_m \cdot CD_1 = 72.5 \times 25 = 1812.5 \text{ mm}$$

۳-۷-۵- انتخاب مقره از نظر الکتریکی

انتخاب مقره برای ایجاد فواصل عایقی و خزشی مورد نیاز باید بر مبنای فواصل عایقی S_L و S_S و فاصله خزشی L_c صورت گیرد. برای انتخاب مقره پورسلینی می‌توان از جدول (۳-۳) استفاده نمود.

جدول ۳-۳: مشخصات عمومی مقره‌های پورسلینی استاندارد موجود

نوع مقره استاندارد	نیروی شکست مکانیکی یا الکترو مکانیکی (KN)	حداکثر قطر بخش عایقی (mm)	طول نامی (mm)	حداقل فاصله خزشی نامی (mm)
U120B	۱۲۰	۲۵۵	۱۴۶	۲۹۵
U120BP	۱۲۰	۲۸۰	۱۴۶	۴۴۰
U160BS	۱۶۰	۲۸۰	۱۴۶	۳۱۵
U160BSP	۱۶۰	۳۳۰	۱۴۶	۴۴۰
U210B	۲۱۰	۳۰۰	۱۷۰	۳۷۰
U210BP	۲۱۰	۳۳۰	۱۷۰	۵۲۵

در صورت استفاده از بشقاب مقره‌های U120B تعداد بشقاب لازم n_1 برای تأمین فاصله خزشی مورد نیاز عبارت است از:

$$\frac{1812.5}{295} = 6.14 \Rightarrow n_1 = 6$$

لزومی به انتخاب ۷ بشقاب مقره نیست زیرا رده‌بندی آلودگی منطقه به صورت سنگین و نیز فاصله خزشی استاندارد ۲۵ میلی‌متر بر کیلوولت، تقریبی هستند و عدد ۶/۱۴ نیز چندان از ۶ بزرگتر نیست. فاصله عایقی ایجادشده توسط ۶ عدد بشقاب مقره U1208 برابر است با:

$$S = 6 \times 146 = 876 \text{ mm}$$

فاصله عایقی ایجادشده از S_L ، S_S و S_P بزرگتر است و لذا انتخاب فوق تأمین‌کننده فواصل عایقی و خزشی مورد نیاز خواهد بود.

۳-۷-۶- بررسی ارتفاع استاندارد برج

حداقل فاصله ایمنی لازم بین سیم و زمین در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت در پیوست (۲-۲) برابر با ۷ متر (در تقاطع با راه‌ها) داده شده است. با توجه به جدول کشش - فلش هادی Lynx حداکثر فلش در اسپن طراحی ۲۵۰ متر در شرایط حداکثر دما با لحاظ کردن پیری سیم حاصل شده و مقدار آن ۷/۰۸ متر می‌باشد. طول ۶ عدد بشقاب مقره ۸۷۶ میلی‌متر است با این حال طول کل زنجیره مقره در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت به طور معمول ۱/۲۵ متر فرض می‌شود. لذا ارتفاع استاندارد برج (ارتفاع برج تحت اسپن طراحی) برابر است با:

$$H_{\text{tower}} = 7 + 7.08 + 1.25 \approx 15.25 \text{ m}$$

ارتفاع بدنه برج آویزی مورد استفاده ۱۲/۲۵ متر است و لذا با ۳ متر پایه الحاقی، ارتفاع مورد نیاز تأمین خواهد شد.

۳-۷-۷- بررسی زوایای انحراف زنجیره مقره آویزی

در این بخش ابتدا میزان انحراف زنجیره مقره آویزی بر اثر وزش باد (۳۰ درصد، ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد فشار شدیدترین باد) محاسبه شده و سپس براساس شکل و ابعاد برج رعایت فواصل عایقی مورد نیاز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۷-۷-۱- انحراف زنجیره مقره بر اثر باد

الف) ۳۰ درصد باد شدید: فشار ناشی از این باد ۳۰ درصد فشار باد در حالت حدی باد شدید خواهد بود. به علاوه کشش هادی در این حالت از جدول کشش - فلش برابر با ۱۴۲۸/۶ کیلوگرم به دست می‌آید (در اسپن ۲۵۰ متر). لذا زاویه انحراف α_d از رابطه (۲-۵۵) برابر است با:

$$\tan \alpha_d = \frac{d \times 10^{-3} \times W_{wn} \times S_{wn} + 2H \sin \frac{\alpha}{2}}{W_c \times S_{we} + 0.5W_{ins}} = \frac{19.53 \times 10^{-3} \times (0.3 \times 100) \times 250 + 2 \times 1428.6 \times \sin \frac{3}{2}}{0.842 \times 250 + 0.5 \times 40} \Rightarrow \alpha_d \approx 43.8^\circ$$

α زاویه انحراف برج آویزی ۳ درجه بوده و W_{ins} وزن زنجیره مقره ۴۰ کیلوگرم فرض شده است. در رابطه فوق اسپن‌های باد و وزن برابر با اسپن طراحی فرض شده‌اند. در حین برجگذاری در صورتی که شرط اخیر برقرار نباشد باید برای حصول اطمینان نسبت به رعایت زوایای مجاز انحراف از منحنی‌های کاربردی کمک گرفت.

ب) ۵۰ درصد باد شدید: فشار ناشی از این باد ۵۰ درصد فشار شدیدترین باد منطقه (۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع) خواهد بود.

کشش سیم در این حالت با استفاده از معادله تغییر وضعیت به دست می‌آید.

$$S = 250 \text{ m}, E = 8157 \text{ kg/mm}^2$$

- شرایط اولیه: ۳۰ درصد باد شدید

$$W_{wn} = 0.3 \times 100 \times 19.53 \times 10^{-3} = 0.586 \text{ kg/m}$$

$$W_1 = \sqrt{(0.842)^2 + (0.586)^2} = 1.03 \text{ kg/m}$$

$$H_1 = 1428.6 \text{ kg}$$

- شرایط ثانویه: ۵۰ درصد باد شدید

$$W_{wn} = 0.5 \times 100 \times 19.53 \times 10^{-3} = 0.976 \text{ kg/m}$$

$$W_2 = \sqrt{(0.842)^2 + (0.976)^2} = 1.29 \text{ kg/m}$$

معادله تغییر وضعیت:

$$H_2^3 + \left[\frac{226.2 + 8157 \times 250^2 \times 1.03}{24 \times 1428.6} - 1428.6 \right] H_2^2 - \frac{226.2 \times 8157 \times 250^2 \times 1.29}{24} = 0$$

از حل معادله فوق خواهیم داشت:

$$H_2 = 2331.7 \text{ kg}$$

لذا زاویه انحراف تحت ۵۰ درصد شدیدترین باد α_s برابر است با:

$$\tan \alpha_s = \frac{19.53 \times 10^{-3} \times (0.5 \times 100) \times 250 + 2 \times 2331.7 \times \sin \frac{3}{2}}{0.842 \times 250 + 0.5 \times 40} = 1.588 \Rightarrow \alpha_s \approx 57.8^\circ$$

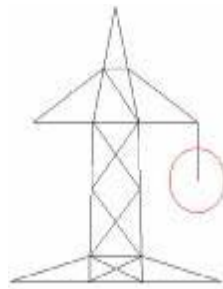
پ) ۱۰۰ درصد باد شدید: در این حالت مطابق با جدول کشش - فلش، کشش هادی برابر با ۲۴۸۱/۶ کیلوگرم است. لذا

زاویه انحراف تحت شدیدترین باد α_p برابر است با:

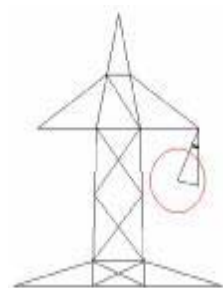
$$\tan \alpha_p = \frac{19.53 \times 10^{-3} \times 100 \times 250 + 2 \times 2481.6 \times \sin \frac{3}{2}}{0.842 \times 250 + 0.5 \times 40} = 2.682 \Rightarrow \alpha_p \approx 69.6^\circ$$

۳-۷-۲- بررسی تأمین فواصل عایقی

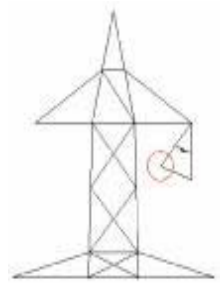
در شکل (۳-۷) رعایت فواصل عایقی S_L ، S_S و S_P به ترتیب تحت انحرافهای α_L ، α_S و α_P مورد بررسی قرار گرفته است. همان گونه که ملاحظه می شود در همه حالات، دایره رسم شده به مرکز هادی دربرگیرنده هیچ یک از اجزاء برج نیست و لذا فواصل عایقی مورد نیاز تأمین شده است.



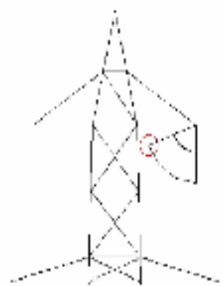
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۳-۷: بررسی فواصل عایقی در حین انحراف زنجیره مقره . الف) شرایط عادی،
 ب) ۳۰ درصد باد شدید، پ) ۵۰ درصد باد شدید، ت) ۱۰۰ درصد باد شدید.

۳-۷-۸- انتخاب سیم محافظ

با توجه به خوردگی‌ها در مسیر عبور خط، سیم محافظ از نوع ACS انتخاب می‌شود و لذا حداقل مقطع آن از دیدگاه عبور جریان صاعقه ۱۷ میلی‌متر مربع است. از دیدگاه عبور جریان‌های ناشی از بروز اتصال کوتاه نامتقارن حداقل مقطع سیم انتخابی باید در رابطه (۲-۵۶) صدق کند:

$$A_{sc} = \frac{I\sqrt{t_c}}{K_s} = \frac{I\sqrt{t_c}}{94}$$

مقاومت پایه برج در بخش ۳-۷-۱ برابر با ۲۰ اهم انتخاب شده است و لذا در خطاهای دور از پست حدود ۸۰ درصد جریان خطای تک فاز از سیم محافظ می‌گذرد. جریان خطای تک فاز ۶۰ درصد جریان اتصال کوتاه ماکزیمم سیستم فرض می‌شود.

$$I = 0.6 \times 15 = 9 \text{ KA}$$

$$I_{sc} = 0.8 \times 9 = 7.2 \text{ KA}$$

با فرض زمان اتصال کوتاه ۰/۵ ثانیه داریم:

$$A_{sc} = \frac{7200 \times \sqrt{0.5}}{94} = 54.16 \text{ mm}^2$$

سیم 7 No8 با سطح مقطع ۵۸/۵۶ میلی‌متر مربع انتخاب می‌شود. برای خطاهای نزدیک به پست که تقریباً ۹۰ درصد جریان خطای تک فاز از سیم محافظ می‌گذرد حداقل سطح مقطع لازم برای سیم محافظ برابر است با:

$$A_{sc} = \frac{0.9 \times 9000 \times \sqrt{0.5}}{94} = 60.93 \text{ mm}^2$$

لذا سیم 7No8 را می‌توان در تمامی طول خط به کار گرفت.

۳-۷-۹- تعیین مقاومت پایه برج

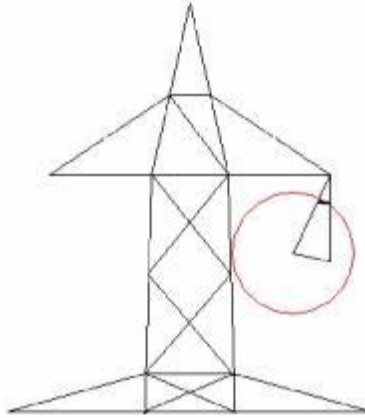
همان‌طور که در بخش ۳-۷-۵ مشخص شد عامل تعیین‌کننده طول مقره در این مثال فاصله خزشی است. لذا می‌توان با توجه به توضیحات بخش ۲-۷-۱۰ در مقدار انتخاب شده برای R_e در بخش ۳-۷-۱ تجدید نظر نموده و آن را به گونه‌ای افزایش داد که مقدار S_L با فاصله عایقی ایجادشده توسط ۶ عدد بشقاب مقره U120B برابر شود. اگر S_L برابر ۸۷۶ میلی‌متر انتخاب شود R_e لازم برای تأمین آن با استفاده از روابط (۲-۴۳) و (۲-۴۲) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$S_L = 876 \Rightarrow CF0_L = 605 \times 876 \times 0.88453 = 468783 \text{ V} = 468.8 \text{ KV}$$

$$CF0_L = \frac{1}{1.31} \left[(1 - 0.3) \times R_e \times 30.95 + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 0.83 \times 72.5 \right] = 468.8 \Rightarrow R_e \approx 26 \Omega$$

بنابراین می‌توان مقاومت پایه برج را تا حدود ۲۶ اهم افزایش داد بی‌آنکه در شرایط EDS مشکلی در ایزولاسیون خط ایجاد شود. به علاوه این افزایش مقاومت تأثیری بر جریان عبوری از سیم محافظ در حین وقوع خطای تک فاز به زمین نخواهد داشت. اما باید

تأمین فاصله S_L بین هادی تا برج تحت انحراف زنجیره مقره نیز مورد بررسی قرار گیرد. همان‌طور که در شکل (۳-۸) دیده می‌شود با مقاومت زمین ۲۶ اهم هم مشکلی در رعایت فواصل عایقی به وجود نمی‌آید.



شکل ۳-۸: بررسی تأمین فاصله عایقی S_L در صورت افزایش مقاومت زمین

۳-۷-۱۰- بررسی کارایی سیستم حفاظت از صاعقه

در این بخش با محاسبه SFFOR عملکرد مطلوب سیستم حفاظت از صاعقه خط مورد بازبینی قرار می‌گیرد. برای محاسبه SFFOR از روال مطرح شده در بخش ۲-۷-۱۰ استفاده خواهد شد. ارتفاع سیم گارد در محل برج با احتساب ۳ متر پایه الحاقی برابر است با:

$$h_g = 2.47 + 2 \times 3.4 + 12.25 + 3 = 24.52 \text{ m}$$

فلش سیم محافظ 7No8 در شرایط EDS تحت اسپن ۲۵۰ متر با توجه به جدول کشش- فلش سیم مذکور (که در بخش بعد ارائه خواهد شد) به دست می‌آید.

$$f_g = \frac{S^2}{8a_b} = \frac{S^2 W}{8H} = \frac{250^2 \times 0.39}{8 \times 1367.5} = 2.228 \text{ m}$$

لذا ارتفاع متوسط سیم محافظ برابر است با:

$$\bar{h} = h_g - \frac{2}{3} f_g = 24.52 - \frac{2}{3} \times 2.228 = 23.03 \text{ m}$$

به همین ترتیب ارتفاع متوسط بالاترین هادی به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{y} = y_t - \frac{2}{3} f_c = (24.52 - 2.434 - 1.25) - \frac{2}{3} \times \frac{250^2}{8 \times \frac{1204.0}{0.842}} = 17.193 \text{ m}$$

در رابطه فوق عدد ۱/۲۵ برای طول مقره در نظر گرفته شده است. I_c مطابق روابط (۲-۶۵) و (۲-۶۶) برابر است با:

$$I_c = \frac{2(\text{CFO})}{Z_1} = \frac{2 \times 605 \times 0.876}{372.6} = 2.845 \text{ KA}$$

۸۷۶ میلی متر طول فاصله عایقی بین هادی و برج می‌باشد. D_{cc} از روابط (۶۷-۲) تا (۷۲-۲) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$r_c = 7.1I_c^{0.75} = 7.1 \times (2.845)^{0.75} = 15.553 \text{ m}$$

$$r_g = 6.4I_c^{0.75} = 14.02 \text{ m}$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{r_g - \bar{y}}{r_c} = \sin^{-1} \frac{14.02 - 17.193}{15.553} = -11.77^\circ$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h - \bar{y}} = \tan^{-1} \frac{2.014}{23.03 - 17.193} = 19.04^\circ$$

در رابطه فوق، a فاصله افقی هادی تا سیم گارد از روی ابعاد برج به دست می‌آید.

$$\beta = \sin^{-1} \frac{(\bar{h} - \bar{y})\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}{2r_c} = \sin^{-1} \frac{(23.03 - 17.193)\sqrt{1 + (\tan 19.04)^\circ}}{2 \times 15.553} = 11.45$$

$$D_{cc} = r_c [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)] = 15.553 [\cos(-11.77) - \cos(19.04 + 9.27)] = 2.179 \text{ m}$$

محاسبه I_m مطابق با روابط (۷۳-۲) تا (۷۵-۲) به صورت زیر انجام می‌گیرد.

$$\gamma = 1.1094$$

$$r_{gm} = \frac{(\bar{h} + \bar{y})/2}{1 - \gamma \sin \alpha} = \frac{(23.03 + 17.193)/2}{1 - 1.1094 \sin 19.04} = 31.272 \text{ m}$$

$$I_m = \left(\frac{r_{gm}}{6.4}\right)^{\frac{1}{0.75}} = \left(\frac{31.272}{6.4}\right)^{\frac{1}{0.75}} = 8.292 \text{ kA}$$

اکنون می‌توان Z_m و Z_c را مطابق رابطه (۷۶-۲) محاسبه کرد.

$$I_m, I_c < 20 \text{ kA} \Rightarrow m = 64.1, \beta = 1.33$$

$$Z_c = \frac{\ln\left(\frac{I_c}{m}\right)}{\beta} = \frac{\ln\left(\frac{2.845}{64.1}\right)}{1.33} = -2.342$$

$$Z_m = \frac{\ln\left(\frac{I_m}{m}\right)}{\beta} = \frac{\ln\left(\frac{8.292}{64.1}\right)}{1.33} = -1.538$$

با استفاده از Z_m و Z_c و رابطه (۷۷-۲) مقادیر $Q(I_m)$ و $Q(I_c)$ به دست می‌آید. البته با توجه به اینکه I_c از ۳ کیلوآمپر کمتر

است می‌توان $Q(I_c)$ را برابر یک فرض نمود.

$$Q(I_c) = 1 - 0.31e^{-\frac{Z_c^2}{1.6}} = 0.989941$$

$$Q(I_m) = 1 - 0.31e^{-\frac{Z_m^2}{1.6}} = 0.929319$$

در نهایت SFFOR از رابطه (۷۸-۲) به دست می‌آید. شایان ذکر است که Ng قبلاً در بخش ۳-۷-۱ محاسبه شده است.

$$SFFOR = N_g LD_{CC} [Q(I_C) - Q(I_m)] =$$

$$1.6918 \times 19 \times 2.179 \times 10^{-3} \times [0.989941 - 0.929319] = 0.004246$$

ملاحظه می‌شود که نرخ جرقه ناشی از خطای سیستم حفاظت از صاعقه بسیار کوچکتر از کمترین مقداری (۰/۰۵) است که برای طراحی خطوط مهم مورد استفاده قرار می‌گیرد و لذا صحت عملکرد سیستم حفاظت از صاعقه مورد تأیید خواهد بود.

۳-۷-۱۱ - تهیه جدول کشش - فلش سیم محافظ

جدول کشش - فلش سیم گارد مورد استفاده در صفحات بعد آمده است. با استفاده از اطلاعات این جدول و نیز جدول کشش - فلش هادی باید فاصله سیم هادی و گارد از یکدیگر را مورد بررسی قرار داد. تحت هیچ شرایطی نباید این فاصله از مقدار به دست آمده در بخش ۳-۷-۳ کمتر شود. بدین منظور چند حالت را در نظر گرفته و در هر حالت فلش سیم‌های هادی f_c و محافظ f_g را به ازای مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر اسپن طراحی به دست می‌آوریم.

الف) شرایط EDS

S(m)	f_c (m)	f_g (m)
100	1.035	0.375
250	5.46	2.228
380	13.69	7.418

ب) وضعیت ۳۰ درصد فشار باد شدید

S(m)	f_c (m)	f_g (m)
100	0.896	0.359
250	4.605	2.027
380	11.35	6.017

SAG-TENSION & BASE DETERMINATION TABLE
INPUT DATA FOR SAG-TENSION

Page: 1

CONDUCTOR NAME:		7 NO. 8
INITIAL MODULUS OF ELASTICITY:	(kg/mm2)	16000
FINAL MODULUS OF ELASTICITY:	(kg/mm2)	16000
INITIAL COEFF OF LINEAR EXPANSION:	(1/°C)	0.000013
FINAL COEFF OF LINEAR EXPANSION:	(1/°C)	0.000013
CROSS SECTION AREA OF CONDUCTOR:	(mm2)	58.56
BARE CONDUCTOR UNIT WEIGHT:	(kg/m)	0.39
DIAMETER OF CONDUCTOR:	(mm)	9.78
ULTIMATE STRENGTH OF CONDUCTOR:	(kg)	7226
ICE UNIT WEIGHT:	(gr/cm3)	0.913
EQUIVALENT CREEP TEMPERATURE:	(°C)	0

LOADING CASES ZONE : HEAVY

Case	Ice Thickness (mm)	Wind Speed (m/s)	Temp (°C)	Tension Limit %UTS	K	Unit Weight (kg/m)
1) HIGH WIND	0.00	40.00	15.00	50.00	0.00	1.237
2) HEAVY ICE	20.00	0.00	-5.00	50.00	0.00	2.098
3) WIND & ICE	15.00	20.00	-20.00	40.00	0.00	1.883
4) NESC (HEAVY)	12.50	17.80	-20.00	40.00	0.45	1.898
5) MIN TEMP	0.00	0.00	-25.00	25.00	0.00	0.390
6) MAX TEMP	0.00	0.00	40.00	40.00	0.00	0.390
7) EDS FINAL	0.00	0.00	18.00	20.00	0.00	0.390
8) 30% HIGH WIND	0.00	21.90	15.00	40.00	0.00	0.525
9) MAX CREEP	0.00	0.00	40.00	40.00	0.00	0.390

Start Span = 100 End Span = 380 Step = 10 Rulling Span = 250

Span (m)	Governing case	Cold Param (m)	EDS Initial Tension	Max Creep Tension	Hot Param (m)	Sag in Hot Param	Tension Case No. 1	% UTS	Tension Case No. 2	% UTS	Tension Case No. 3	% UTS	Tension Case No. 4	% UTS	Tension Case No. 5	% UTS	Tension Case No. 6	% UTS	Tension Case No. 7	% UTS	Tension Case No. 8	% UTS	Tension Case No. 9	% UTS	Max Sag in Case	№
100.00	5	4632	1299.7	1050.4	2693	0.46	1549.7	21	1982.2	27	2055.1	28	2059.1	28	1806.5	25	1050.4	15	1299.7	18	1359.4	19	1050.4	15	1.32	2
110.00	5	4632	1303.0	1057.1	2710	0.56	1584.9	22	2040.4	28	2102.4	29	2106.9	29	1806.5	25	1057.1	15	1303.0	18	1367.0	19	1057.1	15	1.56	2
120.00	5	4632	1306.6	1064.1	2728	0.66	1620.5	22	2098.7	29	2150.3	30	2155.3	30	1806.5	25	1064.1	15	1306.6	18	1375.1	19	1064.1	15	1.80	2
130.00	5	4632	1310.4	1071.4	2747	0.77	1656.3	23	2156.7	30	2198.6	30	2204.1	31	1806.5	25	1071.4	15	1310.4	18	1383.6	19	1071.4	15	2.06	2
140.00	5	4632	1314.4	1079.1	2767	0.89	1692.3	23	2214.3	31	2247.1	31	2252.9	31	1806.5	25	1079.1	15	1314.4	18	1392.5	19	1079.1	15	2.32	2
150.00	5	4632	1318.6	1086.9	2787	1.01	1728.2	24	2271.5	31	2295.5	32	2301.8	32	1806.5	25	1086.9	15	1318.6	18	1401.7	19	1086.9	15	2.60	2
160.00	5	4632	1323.0	1095.0	2808	1.14	1764.0	24	2328.2	32	2343.9	32	2350.6	33	1806.5	25	1095.0	15	1323.0	18	1411.1	20	1095.0	15	2.88	2
170.00	5	4632	1327.5	1103.2	2829	1.28	1799.6	25	2384.2	33	2392.0	33	2399.1	33	1806.5	25	1103.2	15	1327.5	18	1420.9	20	1103.2	15	3.18	2
180.00	5	4632	1332.2	1111.5	2850	1.42	1834.9	25	2439.7	34	2439.8	34	2447.3	34	1806.5	25	1111.5	15	1332.2	18	1430.8	20	1111.5	15	3.48	2
190.00	5	4632	1337.0	1120.0	2872	1.57	1870.0	26	2494.5	35	2487.3	34	2495.2	35	1806.5	25	1120.0	15	1337.0	19	1440.9	20	1120.0	15	3.80	2
200.00	5	4632	1341.9	1128.5	2894	1.73	1904.8	26	2548.6	35	2534.5	35	2542.8	35	1806.5	25	1128.5	16	1341.9	19	1451.1	20	1128.5	16	4.12	2
210.00	5	4632	1346.9	1137.1	2916	1.89	1939.2	27	2602.2	36	2581.3	36	2589.9	36	1806.5	25	1137.1	16	1346.9	19	1461.4	20	1137.1	16	4.45	2
220.00	5	4632	1351.9	1145.7	2938	2.06	1973.3	27	2655.0	37	2627.6	36	2636.6	36	1806.5	25	1145.7	16	1351.9	19	1471.8	20	1145.7	16	4.78	2
230.00	5	4632	1357.1	1154.3	2960	2.23	2007.1	28	2707.3	37	2673.5	37	2682.8	37	1806.5	25	1154.3	16	1357.1	19	1482.3	21	1154.3	16	5.13	2
240.00	5	4632	1362.2	1162.9	2982	2.41	2040.5	28	2758.9	38	2719.0	38	2728.6	38	1806.5	25	1162.9	16	1362.2	19	1492.8	21	1162.9	16	5.48	2
250.00	5	4632	1367.5	1171.5	3004	2.60	2073.5	29	2809.9	39	2764.0	38	2774.0	38	1806.5	25	1171.5	16	1367.5	19	1503.4	21	1171.5	16	5.83	2

SAG-TENSION & BASE DETERMINATION TABLE

Page:2

INPUT DATA FOR SAG-TENSION

Span (m)	Governing case	Cold Param (m)	EDS Initial Tension	Max Creep Tension	Hot Param (m)	Sag in Hot Param	Tension Case No. 1	%UTS	Tension Case No. 2	%UTS	Tension Case No. 3	%UTS	Tension Case No. 4	%UTS	Tension Case No. 5	%UTS	Tension Case No. 6	%UTS	Tension Case No. 7	%UTS	Tension Case No. 8	%UTS	Tension Case No. 9	%UTS	Max Sag in Case	No.
260.00	5	4632	1372.7	1180.0	3026	2.79	2106.2	29	2860.3	40	2808.5	39	2818.9	39	1806.5	25	1180.0	16	1372.7	19	1513.9	21	1180.0	16	6.20	2
270.00	5	4632	1378.0	1188.6	3048	2.99	2138.5	30	2910.0	40	2852.6	39	2863.3	40	1806.5	25	1188.6	16	1378.0	19	1524.5	21	1188.6	16	6.57	2
276.15	4	4632	1381.3	1193.8	3061	3.11	2158.1	30	2940.3	41	2879.5	40	2890.4	40	1806.5	25	1193.8	17	1381.3	19	1530.9	21	1193.8	17	6.80	2
280.00	4	4561	1359.7	1176.4	3016	3.25	2153.7	30	2943.5	41	2879.4	40	2890.4	40	1778.8	25	1176.4	16	1359.7	19	1513.2	21	1176.4	16	6.99	2
290.00	4	4377	1305.2	1133.0	2905	3.62	2142.5	30	2951.6	41	2878.9	40	2890.4	40	1707.1	24	1133.0	16	1305.2	18	1468.5	20	1133.0	16	7.47	2
300.00	4	4195	1253.0	1092.5	2801	4.02	2131.8	30	2959.3	41	2878.6	40	2890.4	40	1636.1	23	1092.5	15	1253.0	17	1425.9	20	1092.5	15	7.98	2
310.00	4	4016	1203.8	1054.9	2705	4.44	2121.5	29	2966.9	41	2878.2	40	2890.4	40	1566.4	22	1054.9	15	1203.8	17	1385.6	19	1054.9	15	8.50	2
320.00	4	3842	1157.7	1020.2	2616	4.89	2111.7	29	2974.1	41	2877.8	40	2890.4	40	1498.5	21	1020.2	14	1157.7	16	1347.7	19	1020.2	14	9.03	2
330.00	4	3675	1114.8	988.4	2534	5.37	2102.3	29	2981.1	41	2877.5	40	2890.4	40	1433.2	20	988.4	14	1114.8	15	1312.2	18	988.4	14	9.58	2
340.00	4	3515	1075.4	959.5	2460	5.87	2093.4	29	2987.8	41	2877.1	40	2890.4	40	1370.8	19	959.5	13	1075.4	15	1279.2	18	959.5	13	10.15	2
350.00	4	3364	1039.2	933.1	2393	6.40	2084.9	29	2994.3	41	2876.8	40	2890.4	40	1312.0	18	933.1	13	1039.2	14	1248.5	17	933.1	13	10.73	2
360.00	4	3223	1006.2	909.2	2331	6.95	2076.8	29	3000.6	42	2876.5	40	2890.4	40	1257.0	17	909.2	13	1006.2	14	1220.2	17	909.2	13	11.33	2
370.00	4	3092	976.2	887.5	2276	7.52	2069.1	29	3006.6	42	2876.2	40	2890.4	40	1206.0	17	887.5	12	976.2	14	1194.0	17	887.5	12	11.94	2
380.00	4	2972	949.0	867.8	2225	8.11	2061.8	29	3012.4	42	2875.9	40	2890.4	40	1159.1	16	867.8	12	949.0	13	1169.9	16	867.8	12	12.57	2

پ) وضعیت یخ و باد نامتعادل - سیم گارد در یخ و باد و سیم هادی در همان باد بدون یخ: بدین منظور باید حالت مذکور را در برنامه تهیه جدول کشش - فلش هادی وارد نمود.

S(m)	f _c (m)	f _g (m)
100	0.544	0.266
250	3.87	1.425
380	10.86	2.922

ملاحظه می‌شود که در تمامی حالات فلش هادی از فلش سیم محافظ بزرگتر است و با احتساب فاصله عمودی ۲/۴۳ متری بین هادی و سیم گارد در محل برج می‌توان اطمینان داشت که هیچ‌گاه فاصله دو سیم مذکور به ۰/۲۳۳ متر یا کمتر نمی‌رسد.

۳-۷-۱۲ - طراحی سیستم زمین

طراحی سیستم زمین برای دست‌یابی به مقاومت ۲۵ اهم برای پایه برج را با استفاده از میله‌های زمین انجام می‌دهیم. مقاومت مخصوص خاک محل احداث خط ۴۰ اهم‌متر فرض می‌شود. در این خاک مقاومت زمین میله‌ای به طول ۱/۵ متر و قطر ۱۶ میلی‌متر از رابطه (۲-۸۰) برابر است با:

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi L_R} \left(\ln \frac{4L_R}{a_R} - 1 \right) = \frac{40}{2\pi \times 1.5} \left(\ln \frac{4 \times 1.5}{0.008} - 1 \right) = 23.9 \Omega$$

بنابراین می‌توان برای هر برج از یک میله استفاده نمود. باید توجه داشت که مقاومت موجی میله از مقدار فوق کوچکتر است. در صورت استفاده از میله ۲ متری، مقاومت پایه تا حدود ۱۹ اهم کاهش خواهد یافت.

۳-۸-۱ - بررسی عملکرد مکانیکی خط

۳-۸-۱-۱ - بارگذاری برج

مقادیر مجاز اسپن‌های باد و وزن توسط سازنده برج به صورت زیر ارائه شده است.

- برج آویزی NN (۰ تا ۳ درجه):

Wind Span (0°) = 450 m

Wind Span (3°) = 310 m

Weight Span = 600 m

- برج کششی AA (۰ تا ۳۵ درجه):

Wind Span (0°) = 600 m

Wind Span (35°) = 300 m

Weight Span = 600 m

- برج کششی CC (۰ تا ۶۰ درجه):

Wind Span (0°) = 600 m

Wind Span (60°) = 300 m

Weight Span (0°) = 600 m

نیروهای قابل تحمل برج در شرایط مختلف بارگذاری نیز مطابق با جداول زیر توسط سازنده ارائه شده است.

TABLE OF ULTIMATE LOADS FOR TOWER TYPE "NN" (kg)										
LOAD CASE	LOADING TYPE	LOADING POINTS							WIND ON TOWER (km/h)	SAFETY FACTOR
		S	C1	C2	C3	C4	C5	C6		
NORMAL	Vertical	1370	1950	1950	1950	1950	1950	1950	140	2.5
	Transversal	690	835	835	835	835	835	835		
	Longitudinal	0	0	0	0	0	0	0		
BROKEN SHIELD WIRE	Vertical	1030	1950	1950	1950	1950	1950	1950	140	1.5
	Transversal	525	835	835	835	835	835	835		
	Longitudinal	3070	0	0	0	0	0	0		
BROKEN ANY ONE CONDUCTOR	Vertical	1370	1950	1950	1950	1950	1950	1480	140	1
	Transversal	690	835	835	835	835	835	530		
	Longitudinal	0	0	0	0	0	0	2855		

* All above tabulated loads should be increased by multiplying specified factors.

TABLE OF ULTIMATE LOADS FOR TOWER TYPE "AA" (kg)										
LOAD CASE	LOADING TYPE	LOADING POINTS							WIND ON TOWER (km/h)	SAFETY FACTOR
		S	C1	C2	C3	C4	C5	C6		
NORMAL	Vertical	915	1390	1390	1390	1390	1390	1390	140	2.5
	Transversal	2280	3030	3030	3030	3030	3030	3030		
	Longitudinal	0	0	0	0	0	0	0		
BROKEN SHIELD WIRE	Vertical	690	1390	1390	1390	1390	1390	1390	140	1.5
	Transversal	1250	3030	3030	3030	3030	3030	3030		
	Longitudinal	0	3070	0	0	0	0	0		
BROKEN ANY ONE CONDUCTOR	Vertical	915	1390	1390	1390	1390	1390	1080	140	1.5
	Transversal	2280	3030	3030	3030	3030	3030	1665		
	Longitudinal	0	0	0	0	0	0	4075		

* All above tabulated loads should be increased by multiplying specified factors.

TABLE OF ULTIMATE LOADS FOR TOWER TYPE "CC" (kg)										
LOAD CASE	LOADING TYPE	LOADING POINTS							WIND ON TOWER (km/h)	SAFETY FACTOR
		S	C1	C2	C3	C4	C5	C6		
NORMAL	Vertical	915	1390	1390	1390	1390	1390	1390	140	2.5
	Transversal	3505	4655	4655	4655	4655	4655	4655		
	Longitudinal	0	0	0	0	0	0	0		
BROKEN SHIELD WIRE	Vertical	690	1390	1390	1390	1390	1390	1390	140	1.5
	Transversal	1860	4655	4655	4655	4655	4655	4655		
	Longitudinal	3070	0	0	0	0	0	0		
BROKEN ANY ONE CONDUCTOR	Vertical	915	1390	1390	1390	1390	1390	1080	140	1.5
	Transversal	3505	4655	4655	4655	4655	4655	2480		
	Longitudinal	0	0	0	0	0	0	4075		

* All above tabulated loads should be increased by multiplying specified factors.

اکنون می‌توان نیروهای وارد بر برج‌های مورد استفاده در خط را محاسبه نمود. به عنوان نمونه، محاسبات مطابق با بخش ۱-۸-۲ برای برج آویزی با زاویه ۳ درجه و سیم هادی انجام می‌شود. شرایط آب و هوایی سنگین است و لذا نیروهای قائم، افقی و طولی برای حالات بارگذاری باد شدید، یخ سنگین، یخ و باد متوسط، پارگی یک سیم در یخ سنگین و یخ و باد در یک طرف اسپن محاسبه می‌شوند.

• حالت باد شدید

- نیروی قائم: ضخامت یخ صفر بوده و وزن کل مقره ۴۰ کیلوگرم فرض می‌شود. لذا از روابط (۲-۸۷)، (۲-۸۹) و (۲-۹۰) خواهیم داشت:

$$V_C = W_C \times S_{we} \times n_b = 0.842 \times 600 \times 1 = 505.2 \text{ kg}$$

$$V_{fi} = 40 \text{ kg}$$

$$F_V = (V_C + V_{fi}) \times S.F_V = (505.2 + 40) \times 1.1 = 600 \text{ kg}$$

- نیروی افقی: حداکثر اسپن باد برای برج آویزی ۳ درجه، ۳۱۰ متر و کشش هادی در اسپن مذکور برابر با ۲۵۲۰ کیلوگرم می‌باشد. سطح باد خور زنجیره مقره نیز ۰/۵ متر مربع فرض می‌شود. لذا از روابط (۲-۹۱)، (۲-۹۲)، (۲-۹۴) و (۲-۹۵) خواهیم داشت:

$$T_w = W_{wn} \times (d+2t) \times S_{wn} \times n_b \times 10^{-3} = 100 \times 19.53 \times 310 \times 1 \times 10^{-3} = 605.4 \text{ kg}$$

$$T_{if} = W_{wn} \times S_{if} \times i = 100 \times 0.5 \times 1 = 50 \text{ kg}$$

$$T_t = 2H \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right) \times n_b = 2 \times 2520 \times \left(\sin \frac{3}{2} \right) \times 1 = 131.9 \text{ kg}$$

$$F_t = (T_w + T_{if}) \times S.F_w + T_t \times S.F_t = (605.4 + 50) \times 1.1 + 131.9 \times 1.1 = 866.0 \text{ kg}$$

• حالت یخ سنگین

- نیروی قائم متعادل: در این حالت وزن یخ با ضخامت ۲۰ میلی‌متر نیز به نیروهای قائم محاسبه شده در مرحله قبل اضافه می‌شود. از روابط (۳۴-۲)، (۸۸-۲) و (۹۰-۲) داریم:

$$V_i = \pi t (t + d) \rho_i \times 10^{-6} \times S_{we} \times n_b = \pi \times 20 \times (20 + 19.53) \times 913 \times 10^{-6} \times 600 \times 1 = 1360.6 \text{ kg}$$

$$F_v = (V_c + V_i + V_{fi}) \times S.F_v = (505.2 + 1360.6 + 40) \times 1.1 = 2096.4 \text{ kg}$$

- نیروی قائم نامتعادل ناشی از پارگی سیم در یک طرف اسپن از روابط (۹۸-۲)، (۹۹-۲) و (۹۰-۲) برابر است با:

$$V_c = W_c \times S_{we} \times (n_b - k_x \times n_d) = 505.2 \times (1 - 0.3 \times 1) = 353.6 \text{ kg}$$

$$V_i = W_i \times S_{we} \times (n_b - k_x \times n_d) = 1360.6 \times (1 - 0.3 \times 1) = 952.4 \text{ kg}$$

$$F_v = (353.6 + 952.4 + 40) \times 1.1 = 1480.6 \text{ kg}$$

ضریب k_x برابر ۰/۳ انتخاب شده است.

- نیروی افقی متعادل: در حالت یخ سنگین نیروی افقی وارد بر برج تنها ناشی از زاویه خط است. در این حالت کشش سیم در اسپن ۳۰۰ متر (نصف حداکثر مقدار مجاز اسپن وزن) برابر با ۳۵۴۵/۳ کیلوگرم می‌باشد. لذا از روابط (۹۴-۲) و (۹۵-۲) خواهیم داشت:

$$T_t = 2H \sin \frac{\alpha}{2} \times n_b = 2 \times 3545.3 \times \sin \frac{3}{2} = 185.6 \text{ kg}$$

$$F_t = T_t \times S.F_t = 185.6 \times 1.1 = 204.1 \text{ kg}$$

- نیروی افقی نامتعادل ناشی از پارگی سیم در یک طرف اسپن از روابط (۱۰۱-۲) و (۹۵-۲) برابر است با:

$$T_t = 2 H \sin \frac{\alpha}{2} \times (n_b - 0.5n_d) = 185.6 \times (1 - 0.5) = 92.8 \text{ kg}$$

$$F_t = T_t \times S.F_t = 92.8 \times 1.1 = 102.1 \text{ kg}$$

- نیروی طولی نامتعادل ناشی از پارگی سیم در یک طرف اسپن از روابط (۱۰۲-۲) و (۹۷-۲) برابر است با:

$$L_t = H \times n_d \times k_b = 3545.3 \times 1 \times 0.6 = 2127.2 \text{ kg}$$

$$F_L = L \times S.F_L = 2127.2 \times 1 = 2127.2 \text{ kg}$$

ضریب k_b برای برج آویزی برابر با ۰/۶ فرض شده است.

• حالت یخ و باد متوسط

- نیروی قائم متعادل: ضخامت یخ ۱۵ میلی‌متر است. باتوجه به روابط (۳۴-۲)، (۸۸-۲) و (۹۰-۲) داریم:

$$V_i = \pi t (t + d) \times \rho_i \times 10^{-6} \times S_{we} \times n_b = \pi \times 15 \times (15 + 19.53) \times 913 \times 10^{-6} \times 600 \times 1 = 891.3 \text{ kg}$$

$$F_v = (505.2 + 891.3 + 40) \times 1.5 = 2154.8 \text{ kg}$$

- نیروی قائم نامتعادل ناشی از افتادن یخ هادی در یک طرف اسپن از روابط (۱۰۳-۲)، (۱۰۴-۲) و (۹۰-۲) برابر است با:

$$V_i = 0.5 \pi \rho_i [t_L^2 + t_R^2 + d \times (t_L + t_R)] \times 10^{-6} \times S_{we} \times n_b = \\ 0.5 \pi \times 913 [15^2 + 0^2 + 19.53 \times 15] \times 10^{-6} \times 600 \times 1 = 445.7 \text{ kg}$$

$$F_v = (505.2 + 445.7 + 40)1.1 = 1090 \text{ kg}$$

- نیروی افقی متعادل: در این حالت فشار باد ۲۵ کیلوگرم بر مترمربع و کشش هادی در اسپن ۳۱۰ متر، ۳۲۵۴/۸ کیلوگرم است. از روابط (۹۱-۲)، (۹۲-۲)، (۹۳-۲) و (۹۵-۲) داریم:

$$T_w = W_{wn} \times (d + 2t) \times S_{wn} \times n_b \times 10^{-3} = 25 \times (19.53 + 2 \times 15) \times 310 \times 1 \times 10^{-3} = 383.9 \text{ kg}$$

$$T_{if} = W_{wn} \times S_{if} \times i = 25 \times 0.5 \times 1 = 12.5 \text{ kg}$$

$$T_t = 2H \sin \frac{\alpha}{2} = 2 \times 3254.8 \times \sin \frac{3}{2} = 170.4 \text{ kg}$$

$$F_t = (T_w + T_{if}) \times S.F_w + T_t \times S.F_t = (383.9 + 12.5) \times 2.5 + 170.4 \times 1.65 = 1272.2 \text{ kg}$$

- نیروی افقی نامتعادل ناشی از افتادن یخ هادی در یک طرف اسپن از رابطه (۱۰۵-۲) برابر است با:

$$T_w = W_{wn} \times (d+t) \times S_{wn} \times n_b \times 10^{-3} = 25 \times (19.53 + 15) \times 310 \times 10^{-3} = 267.6 \text{ kg}$$

برای محاسبه نیروی ناشی از زاویه خط باید کشش سیم در حالت باد (۲۵ کیلوگرم بر متر مربع) بدون یخ را نیز محاسبه نمود که برابر با ۱۵۱۰/۳ کیلوگرم می‌باشد. از رابطه (۹۳-۲) و (۹۵-۲) خواهیم داشت:

$$T_t = (H_R + H_L) \times \sin \frac{\alpha}{2} \times n_b = (3254.8 + 1510.3) \sin 1.5 = 124.7 \text{ kg}$$

$$F_t = (T_w + T_{if}) \times S.F_w + T_t \times S.F_t = (267.6 + 12.5) \times 1.1 + 124.7 \times 1.1 = 445.3 \text{ kg}$$

- نیروی طولی نامتعادل ناشی از افتادن یخ هادی در یک اسپن از رابطه (۹۶-۲) برابر خواهد بود با:

$$L_t = (H_R - H_L) \times \cos \frac{\alpha}{2} \times n_b = 3254.8 - 1510.3 = 1744.5 \text{ kg}$$

برای اطمینان بیشتر زاویه برج آویزی برابر با صفر درجه فرض می‌شود. از رابطه (۹۷-۲) داریم:

$$F_L = L_t \times S.F_L \times B = 1744.5 \times 1 \times 0.35 = 610.6 \text{ kg}$$

• سیم کشی و تعمیرات

- بار قائم برج آویزی از رابطه (۱۰۸-۲) برابر است با:

$$V_m = W_c \times S_{we} \times n_b \times S.F = 0.842 \times 600 \times 1 \times 2 = 1010.4 \text{ kg}$$

نتایج فوق را می‌توان به صورت جدول (۳-۴) خلاصه نمود.

جدول ۳-۴: نیروهای وارد بر برج آویزی ۳ درجه

شماره حالت	نام حالت	نیروی قائم (kg)	نیروی افقی (kg)	نیروی طولی (kg)	برآیند نیروها (kg)
۱	باد شدید	۶۰۰	۸۶۶	۰	۱۰۵۴
۲	یخ سنگین	۲۰۹۶	۲۰۴	۰	۲۱۰۶
۳	یخ و باد متوسط	۲۱۵۵	۱۲۷۲	۰	۲۵۰۲
۴	پارگی سیم در حالت ۲	۱۴۸۱	۱۰۲	۲۱۲۷	۲۵۶۹
۵	افتادن یخ در یک طرف اسپن در حالت ۳	۱۰۹۰	۴۴۵	۶۱۱	۱۳۲۶
۶	سیم کشی و تعمیرات	۱۰۱۰	۰	۰	۱۰۱۰

به همین ترتیب باید محاسبه نیروها برای برج آویزی صفر درجه و برج‌های کششی نیز برای هر دو حالت هادی و سیم محافظ انجام گیرد تا نسبت به کافی بودن استقامت مکانیکی برج اطمینان حاصل شود.

۳-۸-۲- انتخاب زنجیره مقره و یراق‌آلات از دیدگاه مکانیکی

انتخاب مقره باید با توجه به حداکثر نیروی وارد بر آن مطابق با آنچه در بخش ۲-۸-۲-۱ آمده است صورت گیرد. با توجه به جدول (۳-۴) حداکثر نیروی وارد بر زنجیره آویزی در بدترین حالت کمتر از ۲۶۰۰ کیلوگرم است. لذا در صورت انتخاب مقره‌های پرسلینی U120B از نوع ۱۲۰ کیلونیوتنی ضریب اطمینان حاصل بیش از ۴/۶ خواهد بود که کاملاً مناسب می‌باشد. حداکثر کشش کاری هادی مورد استفاده ۳۶۲۹ کیلوگرم است که در شرایط یخ سنگین تحت حداکثر اسپن ۳۸۰ متر حاصل می‌شود. به این ترتیب حداقل نیروی الکترومکانیکی مقره کششی انتخابی با احتساب ضریب اطمینان ۳ باید در رابطه (۲-۱۲۰) صدق نماید.

$$P_1 \geq 3629 \times 1 \times 3 = 10890 \text{ kg}$$

بنابراین انتخاب بشقاب مقره پرسلینی U120B از نوع ۱۲۰ کیلونیوتنی ضریب اطمینان مورد نیاز را فراهم خواهد ساخت. انتخاب یراق‌آلات نیز باید مطابق با روال ارائه شده در مرجع [۱۹] صورت گیرد. بویژه باید توجه داشت که استقامت مکانیکی کلمپ کششی از حداکثر نیروی الکترومکانیکی مقره کوچکتر باشد تا کلمپ به صورت فیوز عمل نماید.

۳-۸-۳- انتخاب دمپرها

برای میراسازی نوسانات آتولین، دمپراستوک بریج انتخاب می‌شود. مطابق جدول کشش _ فلش هادی Lynx، کشش هادی در حالت ۳۰ درصد باد شدید (که به شرایط مناسب برای ایجاد نوسانات آتولین تا حدودی نزدیک است) برابر با ۱۵۴۷ کیلوگرم می‌باشد. لذا با استفاده از روابط (۲-۱۲۲) و (۲-۱۲۳) خواهیم داشت:

$$S_1 = 0.000415d\sqrt{H/W} = 0.000415 \times 19.53 \times \sqrt{\frac{15470}{0.842}} = 1.1\text{m}$$

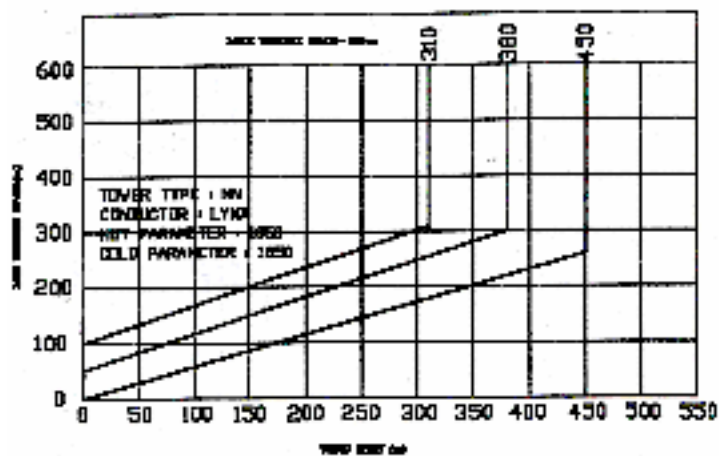
$$S_2 = \frac{703}{415} \times S_1 = 1.86\text{m}$$

S_1 و S_2 به دست آمده با مقادیر داده شده در جدول (۲-۶) برای هادی Lynx به خوبی مطابقت دارند.

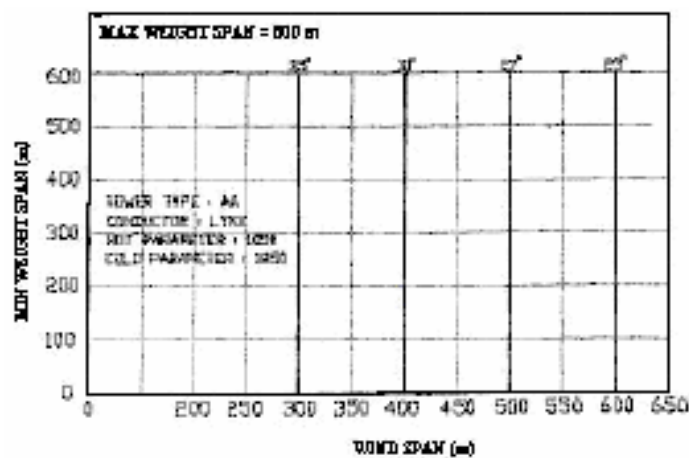
کشش هادی Lynx در شرایط EDS برای اسپن‌های کوتاه تا ۱۳۰ متر کمتر از ۱۵ درصد است و لذا مطابق با جدول (۲-۱۷) نیازی به نصب دمپر استوک‌بریج در این اسپن‌ها نیست. برای اسپن‌های بزرگتر تا ۳۰۰ متر کشش هادی بین ۱۵ تا ۱۹ درصد است و لذا باید در هر اسپن یک دمپر نصب شود. در اسپن‌های بزرگتر از ۳۰۰ متر هم دو دمپر در هر اسپن مورد نیاز است.

۳-۹- برج‌گذاری

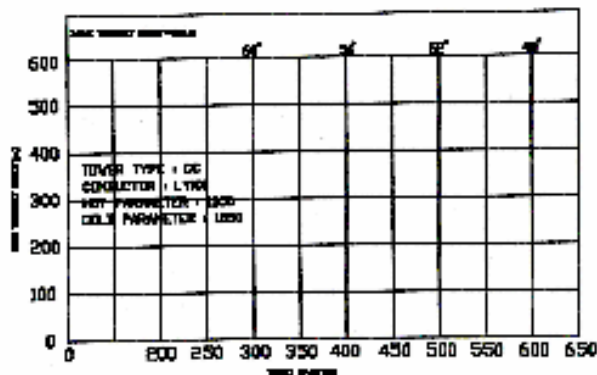
جهت انجام برج‌گذاری در دست داشتن منحنی‌های کاربردی برج‌ها ضروری است. این منحنی‌ها که توسط سازنده برج ارائه شده‌اند در شکل‌های زیر دیده می‌شوند.



شکل ۳-۹-الف: منحنی کاربردی برج NN



شکل ۳-۹-ب: منحنی کاربردی برج AA

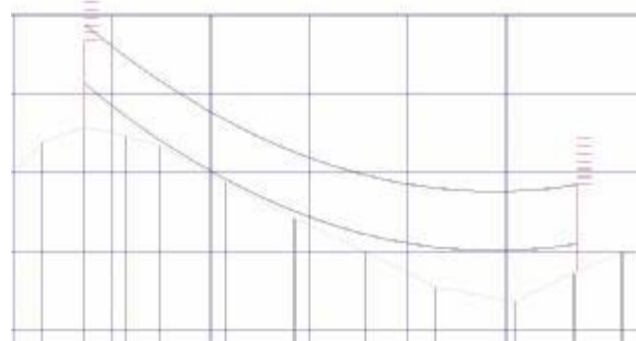


شکل ۳-۹-پ: منحنی کاربردی برج CC

در شکل‌های زیر نمونه‌ای از برج‌گذاری خط نشان داده شده است. در شکل (۳-۱۰-الف) منحنی سیم در شرایط EDS (منحنی بالایی) دو برج بدون پایه الحاقی را به یکدیگر متصل کرده است. منحنی پایینی، منحنی گرم است که همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با زمین پروفیل تداخل دارد و به معنی عدم رعایت فاصله مجاز سیم تا زمین در شرایط حداکثر دما است. مطابق با شکل (۳-۱۰-ب) با افزایش ۲ متری ارتفاع برج سمت چپ مشکل مذکور برطرف می‌شود.



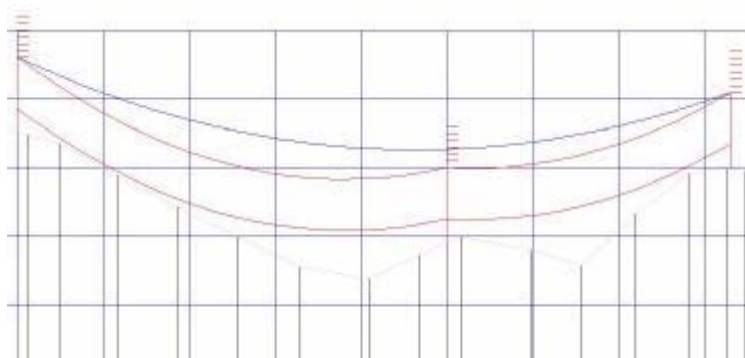
(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۰: برج‌گذاری روی پروفیل و بررسی منحنی گرم. الف) تداخل منحنی گرم با زمین پروفیل، ب) افزایش ارتفاع برج جهت جلوگیری از تداخل

در شکل (۱۱-۳) بالاترین منحنی، منحنی سرد است که نشان می‌دهد به برج وسطی نیرو بالابرنده وارد می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع برج وسط به میزان تقریبی ۳ متر این مشکل حل می‌شود. اما بهتر است مشکل نیروی بالابرنده با جابجایی برج‌ها برطرف شده و از افزایش ارتفاع آنها جلوگیری به عمل آید.



شکل ۱۱-۳: برج‌گذاری روی پروفیل و بررسی منحنی سرد

فهرست پارامترها:

γ	ضریب جذب انرژی خورشید	(-)
λ	مقداری ثابت	$(\text{w.m}^{-1}.\text{k}^{-1})$
δ_d	ضریب چگالی هوا	(-)
σ	طول موج طبیعی خط	(-)
δ	سرعت نور	(کیلومتر بر ثانیه)
α	ضریب انبساط طولی	(بر درجه سانتی گراد)
ρ_i	چگالی یخ	(کیلوگرم بر مترمکعب)
δ_h	ضریب تصحیح ارتفاع	(-)
α_L	زاویه برج آویزی	(درجه)
ρ	مقاومت مخصوص خاک	(اهم متر)
\bar{y}	ارتفاع متوسط هادی تا زمین در طول خط	(متر)
\bar{h}	ارتفاع متوسط سیم محافظ تا زمین در طول خط	(متر)
α	زاویه خط	(درجه)
β	زاویه ورود خط به پست	(درجه)
R'	نیروی کششی وارد بر بازوی مربوطه	(کیلوگرم)
V'_{ins}	وزن یک بازوی زنجیره V شکل	(کیلوگرم)
S'_{if}	سطح بادخور بازوی مذکور	(متر مربع)
α_s	نسبت ضربه	(-)
φ	درجه حرارت نهایی سیم محافظ	(درجه سانتی گراد)
φ_0	درجه حرارت اولیه سیم محافظ	(درجه سانتی گراد)
α_s	ضریب حرارتی سیم محافظ	(بر درجه سانتی گراد)
ρ_s	مقاومت مخصوص سیم محافظ	(اهم - سانتی متر)
A_1	مساحت طولی برج	(مترمربع)
A_t	مساحت عرضی برج	(مترمربع)
A	سطح مقطع هادی	(میلی مترمربع)
a	فاصله افقی سیم محافظ تا هادی کناری خط	(متر)
a_b	پارامتر منحنی سیم	(متر)
a_R	شعاع میله	(متر)
A_w	سطح قرارگرفته در مقابل باد	(مترمربع)
b	فشار هوا	(سانتی متر جیوه)
B	ضریب کاهش ناشی از انحراف زنجیره مقرر	(-)
c	ظرفیت خازنی	(فاراد)
C	ضریب کوپلینگ بین سیمهای گارد و هادیهای فاز	(-)

(میلی متر بر کیلوولت)	فاصله خزشی نامی	CD ₁
(-)	تعداد مدار خط	C _L
(سانتی متر)	قطر هادی	d
(گرم بر سانتی متر مکعب)	چگالی سیم محافظ	D
(سانتی متر)	حداقل فاصله میان دو هادی فرعی	d _b
(متر)	فاصله رؤیت صاعقه برای هادی فاز	D _c
(متر)	فاصله D _c به ازای جریان I _m	D _{cc}
(متر)	فاصله رؤیت صاعقه برای سیم‌های محافظ	D _g
(کیلوگرم بر میلی متر مربع)	مدول الاستیسیته	E
(کیلوولت)	ولتاژ بحرانی	E ₀
(کیلوولت)	مقدار اضافه ولتاژ کلیدزنی	E ₂
(هرتز)	فرکانس	f
(-)	ضریب کرونا	F
(-)	ضریب محاسبه مقاومت معادل الکترودهای موازی	f _b
(متر)	فلش هادی در حداکثر دما	f _m
(متر)	فلش هادی در شرایط EDS	f _c
(متر)	فلش سیم محافظ در شرایط EDS	f _g
(-)	ضریب شکل	F _s
(کیلوگرم)	کل نیروی عرضی وارد بر برج	F _t
(کیلوگرم)	کل نیروی قائم وارد بر برج	F _v
(کیلوولت بر سانتی متر)	گرادیان ولتاژ در سطح هادی	g
(صاعقه / کیلومتر مربع / سال)	چگالی صاعقه‌های برخوردی به زمین	GFD
(متر)	فاصله متوسط هندسی فازه	GMD
(متر)	شعاع معادل هادی‌های یک فاز	GMR
(کیلوگرم)	کشش هادی	H
(کیلوگرم)	میزان کشش هر رشته قبل از پاره شدن یکی از رشته‌ها	H _A
(متر)	ارتفاع سیم محافظ تا زمین در محل برج	h _g
(متر)	ارتفاع محل نصب خط از سطح دریا	H _L
(کیلوگرم)	کشش سیم در اسپن‌های سمت چپ برج	H _L
(کیلوگرم)	حداکثر کشش کاری هادی	H _m
(کیلوگرم)	کشش سیم در اسپن‌های سمت راست برج	H _R
(کیلوآمپر)	جریان	I
(-)	تعداد ست زنجیره مقرر در محل اتصال یک فاز به برج	i
(کیلوآمپر)	جریان بحرانی خط	I _C
(کیلوآمپر)	جریان شارژ خط	I _{CH}
	حداکثر جریان خطای سیستم حفاظت از صاعقه که به هادی	I _m

فاز برخورد نخواهد کرد		
(کیلوآمپر)		
جریان اتصال کوتاه	I_{sc}	(آمپر)
مقداری ثابت	J	(ژول بر کالری)
ضریب اضافه بار	K	(-)
ضریب تعدیل نیروی طولی بر اثر انحراف زنجیره مقرر در	K_b	
برج‌های آویزی		(-)
ضریب نوع سیم و موقعیت فازها	K_e	(-)
ضریب شکل فاصله هوایی	K_g	(-)
ضریب اصلاح ولتاژ فرکانس قدرت خط	K_{PF}	(-)
ضریب صدور تشعشع از هادی نسبت به اجسام تیره	K_r	(-)
ضریب تصحیح شکل موج	K_{wf}	(-)
ضریب اصلاح وزن سیم پاره شده	k_x	(-)
اندوکتانس	L	(هانری)
طول خط	L	(کیلومتر)
نیروی طولی	L_t	(کیلوگرم)
کل فاصله خزشی مورد نیاز در زنجیره مقرر	L_e	(میلی‌متر)
طول زنجیره مقرر	L_l	(متر)
اضافه بار طولی	L_m	(کیلوگرم)
طول میله	L_R	(متر)
ضریب عمر هادی	m	(-)
ضریب برای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت کوتاه مدت	m	(-)
تعداد هادی در فاز	n_b	(-)
تعداد سیم پاره شده در اسپین یک طرف از برج	n_d	(-)
تعداد برج‌های معادل خط	n_e	(-)
چگالی صاعقه‌های برخوردکننده به سطح زمین	N_g	(صاعقه / کیلومتر مربع / سال)
تعداد بشقاب در زنجیره	n_i	(-)
تعداد برج‌ها در سکشن	n_s	(-)
تعداد متوسط برج‌های خط	n_T	(-)
عدد ناسلت	Nu	(-)
توان انتقالی نامی خط	P	(مگاوات)
توان طبیعی خط	P_0	(مگاوات)
تلفات کرونای خط در هوای خوب	P_c	(کیلووات)
حداقل فاصله فازها در وسط اسپین	PC	(متر)
حرارت خارج شده از هادی بر اثر همرفت گرما	P_{conv}	(وات بر متر)
استقامت مکانیکی مقرر	P_I	(کیلوگرم)

(وات بر متر)	حرارت تولید شده در هادی به واسطه اثر ژولی	P_j
(مگاوات)	تلفات اهمی خط در بار پیک	P_L
(مگاوات)	حداکثر توان انتقالی	P_m
(وات بر متر)	حرارت خارج شده از هادی بر اثر تشعشع حرارت	P_{rad}
(وات بر متر)	توان حرارتی جذب شده از خورشید در سطح هادی	P_{sol}
(مگاوار)	توان راکتیو شارژر خط	Q
	احتمال اینکه حداکثر دامنه جریان صاعقه در هر بار برخورد برابر با یا بزرگتر از I باشد	$Q(I)$
(-)		
(سانتی متر)	شعاع هادی	r
(اهم)	مقاومت یک میله زمین منفرد	R_0
اهم	مقاومت هادی در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد	R_{20}
(متر)	فاصله برخورد صاعقه به هادی فاز و سیم‌های محافظ	r_c
(متر)	فاصله r_c به ازای جریان I_m	r_{cm}
(متر)	شعاع معادل هادی	r_e
(-)	عدد رینولدز	Re
(اهم)	امپدانس موجی معادل برج	R_e
(متر)	فاصله برخورد صاعقه به زمین	r_g
(متر)	فاصله r_g به ازای جریان I_m	r_{gm}
(-)	مقاومت موجی پایه برج	R_i
(اهم)	مقاومت متقابل میله‌های نام و زام	R_{ij}
(اهم/متر)	مقاومت هادی در دمای T_2	R_T
	مقاومت موثر هر فاز با در نظر گرفتن تعداد باندل و اثر پوستی	R_u
(اهم)	در دمای حداکثر هادی	
(متر)	اسپن تحت بررسی	S
(-)	ضریب ایمنی	$S.F$
(-)	ضریب اضافه بار نیروهای طولی	$S.F_L$
(-)	ضریب اضافه بار برای نیروی عرضی ناشی از زاویه خط	$S.F_t$
(-)	ضریب اضافه بار نیروهای قائم	$S.F_v$
(-)	ضریب اضافه بار برای نیروهای ناشی از باد	$S.F_w$
($wm^{-2}k^{-4}$)	ثابت بولتزمان	S_B
(متر)	فاصله بین دو سیم گارد در محل برج	S_g
(کالری بر گرم بر درجه سانتی گراد)	گرمای ویژه	S_H
(وات بر مترمربع)	شدت اشعه خورشید در محل خط	S_i
(متر)	فاصله هوایی هادی از برج	S_l
(متر مربع)	سطح بادخور	S_{if}
()	$j \quad i$	S_{ij}

S_L	حداقل فاصله هوایی مجاز جهت حصول به BFR مطلوب (متر)
S_P	فاصله عایقی هادی تا برج بر مبنای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت
S_S	حداقل فاصله هوایی مجاز جهت حصول به SSFOR مطلوب (متر)
S_{we}	اسپن وزن (متر)
S_{we}	اسپن وزن (متر)
S_{wn}	اسپن باد (متر)
S_{wn}	اسپن باد (متر)
T	دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)
t	ضخامت یخ (میلی‌متر)
T_1	دمای متوسط محیط (درجه کلوین)
T_2	دمای نهایی هادی (درجه کلوین)
t_c	مدت زمان اتصال کوتاه (ثانیه)
T_C	دمای هادی (درجه سانتی‌گراد)
T_d	سطح کروونیک سالانه (تعداد روزهای رعد و برقی در سال) (بر سال)
T_{if}	نیروی افقی وارد از باد بر سطح زنجیره مقره و یراق‌آلات (کیلوگرم)
t_L	ضخامت یخ در اسپن‌های طرف چپ برج (میلی‌متر)
T_m	حداکثر دمای محیط (درجه سانتی‌گراد)
t_R	ضخامت یخ در اسپن‌های طرف راست برج (میلی‌متر)
T_t	نیروی افقی ناشی از زاویه‌داربودن خط (کیلوگرم)
T_w	نیروی افقی وارد از باد بر سیم (کیلوگرم)
U_{50}	ولتاژ فرکانس قدرتی که به احتمال ۵۰ درصد منجر به بروز قوس در فاصله هوایی می‌شود
U_m	حداکثر ولتاژ فاز - فاز سیستم (کیلوولت)
V	ولتاژ فاز به زمین (کیلوولت)
v	سرعت باد (متر بر ثانیه)
V_3	ولتاژ استقامت آماری عایقی خط (کیلوگرم)
V_f	وزن یراق‌آلات (کیلوگرم)
V_{fi}	وزن زنجیره مقره و یراق‌آلات متصل به آن (کیلوگرم)
V_{ins}	وزن یک بشقاب مقره (کیلوگرم)
V_L	ولتاژ خط (کیلوولت)
V_m	اضافه بار قائم (کیلوگرم)
W	وزن واحد طول هادی با احتساب اثر یخ و باد (کیلوگرم بر متر)
W_C	وزن واحد طول هادی (کیلوگرم بر متر)
W_i	وزن واحد طول یخ (کیلوگرم بر متر)
W_{ins}	وزن زنجیره مقره (کیلوگرم)

(کیلوگرم بر متر)	نیروی ناشی از باد بر واحد طول سیم	W_w
(کیلوگرم بر مترمربع)	فشار باد	W_{wn}
(مگااهم کیلومتر)	راکتانس خازنی	X_C
(اهم بر کیلومتر هر فاز)	راکتانس سلفی	X_L
(متر)	ارتفاع هادی تا زمین در محل برج	y_t
(-)	مقاومت موجی سیم گارد	Z_g
(-)	امپدانس موجی خط	Z_l

مراجع

- [۱] قدرت الله حیدری، "طراحی الکتریکی خطوط انتقال نیرو"، انتشارات تابش برق، چاپ اول، ۱۳۷۹، شابک: ۹۶۴-۹۱۷۴۲-۷-۳-۳.
- [۲] امیر منصور قاضی زاهدی و علی محمد رنجبر، "طراحی خطوط انتقال نیرو"، انتشارات وزارت نیرو، چاپ سوم، ۱۳۶۴.
- [۳] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "مسیریابی خطوط نیرو".
- [۴] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "زمین شناسی خطوط انتقال نیرو".
- [۵] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "نقشه برداری مسیر خطوط نیرو".
- [۶] محسن پوررفیع عربانی و پرویز اسلامزاده، "طراحی خطوط انتقال انرژی"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول، ۱۳۷۷، شابک: ۹۶۴-۴۶۳-۰۲۳-۸.
- [۷] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی پایه‌های خطوط هوایی انتقال نیرو".
- [۸] استاندارد جامع طراحی و مهندسی خطوط انتقال نیروی برق ایران "آئین‌نامه و استاندارد انتخاب هادی‌های خطوط انتقال نیرو، مشانیر، ۱۳۷۵.
- [۹] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی هادی‌های خطوط انتقال".
- [۱۰] استاندارد جامع طراحی و مهندسی خطوط انتقال نیروی برق ایران، جلد ۲۰۷: مبانی طراحی مکانیکی خطوط انتقال نیرو، مشانیر، ۱۳۷۸.
- [۱۱] استاندارد سوئد برای ایران SSPB.
- [۱۲] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی مقره‌های خطوط انتقال".
- [13] IEC 60071-2 , " Insulation coordination – part 2 : application guide" , third edition, 1996.
- [۱۴] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی سیستم حفاظت از صاعقه در خطوط انتقال نیرو".
- [15] Andrew R.Hileman , "insulation coordination for power system" , marcel dekker inc. , 1999 , ISBN " 0824799577.
- [۱۶] استاندارد جامع مهندسی و طراحی خطوط انتقال نیروی ایران، دستورالعمل فنی انتخاب سیم محافظ هوایی خطوط انتقال نیرو، مشانیر.
- [۱۷] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی سیستم زمین خطوط انتقال".
- [۱۸] استاندارد جامع مهندسی و طراحی خطوط انتقال نیروی برق ایران، جلد ۲۱۱: آئین‌نامه و استاندارد بارگذاری برج‌های خطوط انتقال نیرو، مشانیر، ۱۳۷۷.
- [۱۹] گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی یراق‌آلات خطوط هوایی انتقال نیرو".
- [20] G. Orawski, "overhead lines – the state of the art", POWER ENGINEERING JOURNAL , oct . 1998, PP . 221 – 231.
- [۲۱] استاندارد جامع مهندسی و طراحی خطوط انتقال نیروی برق ایران، جلد ۲۰۲: دستورالعمل فنی و اجرایی برج‌گذاری خطوط انتقال نیرو، مشانیر، ۱۳۷۶.
- [۲۲] استاندارد جامع مهندسی و طراحی خطوط انتقال نیروی برق ایران، جلد ۲۱۰: آئین‌نامه تهیه منحنی کاربردی خطوط انتقال نیرو، مشانیر، ۱۳۷۷.

[۲۳] حریم خطوط انتقال، مرکز تحقیقات نیرو، آذر ۶۹.

[24] IEC / TR3 61597. "Overhead Electrical Conductors Calculation Methods for Stranded Bare Conductors", First Edition, 1995-05.

[25] PAUL F.WINKELMAN, "Sag – Tension Computations and Field Measurements of Bonneville Power Administration".

خواننده گرامی

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

دفتر نظام فنی اجرایی

این نشریه

با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی
پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال -
طراحی عمومی خطوط نیرو» «مشمول بر طراحی
خطوط فوق توزیع و انتقال بر مبنای استفاده از
برج های تیپ ارایه گردیده است. این نشریه
مشمول بر سه فصل می باشد که به ترتیب
تمت عنوان های کلیات و تعاریف، اصول و
مراحل طراحی خطوط نیرو و نمونه ای از طراحی
یک خط فوق توزیع تهیه شده است.