



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۱۸۲۶۷-۱

چاپ اول

۱۳۹۲

INSO
18267-1
1st. Edition
2014

جریان‌های اتصال کوتاه-

محاسبه اثرات-

قسمت ۱: تعاریف و روش‌های محاسبه

**Short-circuit currents-
Calculation of effects-
Part 1: Definitions and calculation
methods**

ICS : 27.160

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۰۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۰۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است. تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیر دولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های فنی مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)^۱ کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و / یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه-بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سامانه‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) و وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه‌ی تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر کارکرد آنها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) و وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International organization for Standardization

2 - International Electro technical Commission

3- International Organization for Legal Metrology (Organization International de Metrology Legal)

4 - Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

" جریان‌های اتصال کوتاه - محاسبه اثرات - قسمت ۱: تعاریف و روش‌های محاسبه "

رئیس:

ابوترابی زارچی، حسین
(دکترای برق - قدرت)

سمت و/یا نمایندگی

عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد و مدیر
آزمایشگاه تست میدانی فتوولتایی پژوهشکده هوا خورشید
دانشگاه فردوسی مشهد

دبیر:

صفایی، سمانه
(لیسانس برق الکترونیک)

کارشناس استاندارد

اعضاء: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

ابوترابی زارچی، محسن
(فوق لیسانس مهندسی برق)

رئیس گروه استاندارد و پشتیبانی فنی شرکت توزیع برق
مشهد

احمدی، ابوالفضل
(فوق لیسانس مهندسی برق)

معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات برق منطقه‌ای یزد

اصغریان رضایی، مسعود
(لیسانس برق)

مدیر کل استاندارد خراسان رضوی

بشیر، محسن
(فوق لیسانس مهندسی برق - قدرت)

کارشناس ارشد پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی
مشهد

بشیر، مجید
(لیسانس مکانیک)

کارشناس و عضو هیئت مدیره شرکت فناوران صنعت دایا

چوبینه، معین
(فوق لیسانس مهندسی برق - قدرت)

کارشناس آزمایشگاه تست میدانی فتوولتایی پژوهشکده
هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد

حسینی، ابراهیم
(لیسانس فیزیک)

کارشناس اداره استاندارد

حقدادی، سام
(لیسانس مکانیک)

مهندس شرکت پارت لاستیک

خلوصی، مسعود
(لیسانس مهندسی برق - قدرت)

کارشناس سازمان صنعت، معدن و تجارت خراسان رضوی

کارشناس ارشد پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی
مشهد

رجب‌نیا، میثم
(فوق لیسانس مهندسی برق - قدرت)

کارشناس دفتر تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق
شهرستان مشهد

صبور داوودیان، سید علیرضا
(لیسانس برق - قدرت)

مدیر فنی آزمایشگاه تست میدانی فتوولتایی پژوهشکده
هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد

صادقی شقاقی، حمیدرضا
(فوق لیسانس برق - الکترونیک)

رئیس هیئت مدیره شرکت آسایش محور اسپادانا

صفایی، محمد ناصر
(مهندس مکانیک)

کارشناس شرکت برق منطقه‌ای خراسان رضوی

علی‌آبادی، هادی
(فوق لیسانس برق - قدرت)

کارشناس خطوط انتقال شرکت مهندسی مشاور منیران

محمد فاضلی فر
(لیسانس مهندسی برق-قدرت)

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ب	آشنایی با سازمان ملی استاندارد
ج	کمیسیون فنی تدوین استاندارد
ز	پیش‌گفتار
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۲	۲ مراجع الزامی
۲	۳ اصطلاحات، تعاریف، نمادها و یکاها
۲	۱-۳ اصطلاحات و تعاریف
۵	۲-۳ نمادها و یکاها
۸	۴ کلیات
۹	۵ مقدماتی بر هادی صلب
۹	۱-۵ کلیات
۱۰	۲-۵ محاسبه نیروهای الکترومغناطیس
۱۱	۳-۵ فاصله موثر بین هادی‌های اصلی و بین هادی‌های فرعی
۱۳	۴-۵ محاسبه تنش‌ها در هادی‌های صلب
۱۸	۵-۵ بارهای سازه‌ای ناشی از هادی‌های صلب
۱۹	۶-۵ ملاحظات مربوط به وصل مجدد خودکار
۲۱	۷-۵ محاسبه با توجه ویژه به نوسانات هادی
۲۵	۶ آرایش‌های هادی انعطاف‌پذیر
۲۵	۱-۶ کلیات
۲۶	۲-۶ اثرات بر روی هادی‌های اصلی عمودی
۳۵	۳-۶ اثرات بر هادی اصلی عمودی (هادی‌های آویز)
۳۶	۴-۶ اثرات بر روی هادی‌های باندل
۴۲	۵-۶ ساختار بارها ناشی از هادی‌های انعطاف‌پذیر
۴۲	۷ اثرات حرارتی بر روی هادی‌های بدون روکش
۴۲	۱-۷ کلیات
۴۳	۲-۷ محاسبه جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی
۴۳	۳-۷ محاسبه افزایش دما و چگالی جریان قابل تحمل کوتاه مدت اسمی برای هادی‌ها
۴۵	۴-۷ محاسبه استقامت کوتاه مدت حرارتی برای مدت زمان‌های مختلف اتصال کوتاه
۵۶	پیوست (اطلاعات الزامی)
۶۱	کتابنامه

- شکل ۱ مدول $k1s$ برای محاسبه فاصله موثر هادی ۱۲
- شکل ۲ جهت بارگذاری و محور خمش برای آرایشهای هادی چندتایی ۱۵
- شکل ۳ الف آرایش قطعات اتصال دهنده در یک اسپن ۲۳
- شکل ۴ ضرایب VF ، $V\sigma m$ و $V\sigma s$ استفاده شده در اتصال کوتاه سه فاز و فاز به فاز ۲۴
- شکل ۵ ضرایب Vrm و Vrs مورد استفاده در وصل مجدد خودکار سه فاز ۲۵
- شکل ۶ حداکثر زاویه نوسان δ_{max} در حداکثر زمان اتصال کوتاه T_{kl} ۳۰
- شکل ۷ مدول Ψ برای نیروی کششی در هادیهای انعطافپذیر ۳۱
- شکل ۸ شکل هندسی هادی آویز ۳۴
- شکل ۹ $v2$ به عنوان تابعی از $v1$ ۳۸
- شکل ۱۰ $v3 \times \sin 1800n$ به عنوان تابعی از asd ۳۹
- شکل ۱۱ ξ به عنوان تابعی از Z و ε_{st} ۴۰
- شکل ۱۲ η به عنوان تابعی از Z و ε_{st} ۴۱
- شکل ۱۳ رابط بین چگالی جریان قابل تحمل کوتاه مدتی ($Tkr = 1 s$) و دمای هادی ۴۵
- جدول ۱ فاصله موثر as بین هادیهای فرعی برای ابعاد با سطح مقطع مستطیل ۱۳
- جدول ۲ حداکثر مقدار ممکن $V\sigma sVrs$ ، $V\sigma mVrm$ ، $VFVrm$ ۱۶
- جدول ۳ ضرایب α ، β ، γ برای آرایشهای مختلف نگهدارنده شیشه‌ها ۱۷
- جدول ۴ مدول q ۲۰
- جدول ۵ مدول مقطع Wm هادیهای اصلی با دو یا چند عنصر مستحکم کننده بین دو نگهدارنده مجاور ۲۱
- جدول ۶ بالاترین دمای پیشنهاد شده برای هادی تحت تنش‌های مکانیکی در طول مدت اتصال کوتاه ۴۴

پیش‌گفتار

استاندارد " جریان‌های اتصال کوتاه- محاسبه اثرات- قسمت ۱: تعاریف و روش‌های محاسبه " که پیش نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط سازمان ملی استاندارد ایران تهیه و تدوین شده و در هفتصد و سی و هشتمین اجلاس کمیته ملی استاندارد برق و الکترونیک مورخ ۱۳۹۲/۱۲/۰۳ مورد تصویب قرار گرفته است ، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح مقررات و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ ، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدیدنظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و مأخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

IEC 60865-1: 2011, Short-circuit Currents - Calculation of Effects - Part 1 Definitions and Calculation Methods

جریان‌های اتصال کوتاه - محاسبه اثرات - قسمت ۱: تعاریف و روش‌های محاسبه

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد محاسبه اثرات مکانیکی و حرارتی جریان‌های اتصال کوتاه می‌باشد. این استاندارد برای محاسبه اثرات در موارد زیر کاربرد دارد:

- اثرات الکترومغناطیس بر روی هادی‌های انعطاف‌پذیر و صلب.
- اثرات حرارتی بر روی هادی‌های بدون روکش.

این استاندارد برای کابل‌ها و هادی‌های عایق شده روکش‌دار کاربرد ندارد. در این موارد به استانداردهای ملی ایران شماره ۱۶۸۳۴ و شماره ۱۲۵۳۸ مراجعه شود. این استاندارد در مورد محاسبه اثرات الکترومغناطیس و حرارتی در تاسیسات کمکی جریان مستقیم (D.C) موجود در نیروگاه‌ها کاربرد ندارد. در این موارد به استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۲۰۷-۲ مراجعه شود.

در این استاندارد فقط به سامانه‌های جریان متناوب (A.C) پرداخته می‌شود. موارد زیر باید بصورت خاص، ذکر شود:

الف) محاسبه جریان اتصال کوتاه باید بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۸۳۴ باشد. برای تعیین بیشترین جریان ممکن اتصال کوتاه، ممکن است به اطلاعات اضافی در استانداردهای دیگر IEC ارجاع داده شود. برای مثال جزئیات مداربندی‌های اساسی مربوط به محاسبات یا جزئیات مربوط به دستگاه‌های محدود کننده جریان در صورتی که این مساله منجر به کاهش تنش مکانیکی شود.

ب) مدت زمان اتصال کوتاه مورد استفاده در این استاندارد بستگی به طرح حفاظتی داشته و باید بر این اساس در نظر گرفته شود.

پ) این رویه‌های استاندارد شده مطابق با الزامات اجرایی وضع شده و دارای ساده‌سازی‌های محافظه کارانه است. روش‌های آزمون یا محاسبات دقیق‌تر یا هر دو ممکن است مورد استفاده قرار گیرد.

ت) در بند ۵ این استاندارد، در آرایش یا چیدمان هادی‌های صلب، تنها تنش ایجاد شده بوسیله جریان‌های اتصال کوتاه محاسبه می‌شود. با این وجود، تنش‌های دیگر نیز می‌توانند وجود داشته باشند، برای مثال تنش ایجاد شده بوسیله بار مرده، باد، یخ، نیروهای وابسته به عملکرد یا زلزله از این دسته می‌باشند. ترکیب این نیروها با بار ناشی از اتصال کوتاه باید قسمتی از قرارداد و/ یا در استاندارد آورده شود برای مثال کدهای نصب.

نیروهای کششی مرتبط با هادی‌های انعطاف‌پذیر شامل اثرات بار مرده می‌باشند. نسبت به ترکیب سایر پارامترها ملاحظات در نظر گرفته شده در بالا معتبر می‌باشد.

ث) بارهای محاسبه شده، بارهای طراحی هستند و باید به عنوان بارهای استثنایی بدون هر ضریب ایمنی نسبی اضافی با توجه به کدهای نصب و راه‌اندازی استفاده شود برای مثال استاندارد IEC 61936-1 [1].

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی محسوب می‌شود.

در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی آن مورد نظر است.

۱-۲ استاندارد ایران-آی‌ای‌سی شماره ۰-۶۰۹۰۹: سال ۱۳۹۰، جریان‌های اتصال کوتاه در سیستم‌های سه فاز - AC قسمت ۰: محاسبه‌ی جریان‌ها.

۲-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۸۳۴: سال ۱۳۹۰، محاسبه‌ی جریان‌های اتصال کوتاه مجاز از نظر حرارتی، با احتساب اثرات تبادل حرارتی.

۳-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۵۳۸: سال ۱۳۹۱، محدوده‌ی دمایی اتصال کوتاه کابل‌های الکتریکی با ولتاژهای مجاز ۶ کیلووات و تا خود ۳۰ کیلوولت.

۴-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۲-۱۱۲۰۷: سال ۱۳۸۸، جریان‌های اتصال کوتاه در تاسیسات جانبی D.C نیروگاه‌ها و پست برق - قسمت دوم: محاسبه‌ی اثرات.

2-5 IEC 60909 (all parts): Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems.

2-6 IEC 61936-1 Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules.

۳ اصطلاحات، تعاریف، نمادها و یکاها

۱-۳ اصطلاحات و تعاریف

در ادامه اصطلاحات و تعاریف به کار گرفته شده در این استاندارد آورده شده است.

۱-۱-۳

هادی اصلی

هادی یا چیدمانی مرکب از تعدادی هادی که حامل تمامی جریان یک فاز هستند.

۲-۱-۳

هادی فرعی

هادی تک که حامل بخش معینی از کل جریان یک فاز بوده و جزئی از هادی اصلی می‌باشد.

۳-۱-۳

نگهدارنده ثابت

نگهدارنده هادی صلب بوده که مُمان‌ها^۱ در سطح مربوطه به آن اعمال می‌شوند.

۴-۱-۳

نگهدارنده ساده

نگهدارنده هادی صلب بوده که در آن هیچ مُمانی در صفحه مربوطه اعمال نمی‌شوند.

۵-۱-۳

قطعه اتصال

هر گونه جرم اضافی در محدوده یک اسپن^۱ است که جزئی از ماده هادی یکنواخت نمی‌باشد. از جمله این قطعه‌ها می‌توان به: جداکننده‌ها، المان‌های مستحکم کننده، قطعاتی جهت همپوشانی هادی‌ها، انشعاب‌ها و غیره اشاره شود.

یادآوری-در این استاندارد بجای واژه گام بین دو تیر یا فاصله تکیه گاه از واژه اسپن استفاده می‌شود.

۶-۱-۳

جداکننده

یک قطعه مکانیکی است که بین هادی‌های فرعی، صلب یا انعطاف‌پذیر قرار گرفته و در محل نصب، فاصله الکتریکی لازم بین هادی‌های فرعی را حفظ می‌نماید.

۷-۱-۳

عنصر مستحکم کننده

یک جداکننده خاص است که با هدف کاهش تنش مکانیکی در هادی‌های صلب بکار می‌رود.

۸-۱-۳

بسامد طبیعی مرتبط

(f_{cm})

اولین بسامد طبیعی نوسان آزاد یک هادی تک اسپنی بدون میرایی و بسامد طبیعی مرتبه ۷ ام هادی در صورتی که ۷ اسپن بدون میرایی وجود داشته باشد.

۹-۱-۳

نیروی کشش ناشی از اتصال کوتاه

$(F_{t,d})$

حداکثر نیروی کششی (مقدار طراحی) در هادی اصلی انعطاف‌پذیر ناشی از نوسانات ایجاد شده در مدت اتصال کوتاه.

۱۰-۱-۳

نیروی سقوط

$(F_{f,d})$

حداکثر نیروی کشش (مقدار طراحی) در هادی اصلی انعطاف‌پذیر که در هنگام فروافتادن هادی بین دو نگهدارنده بعد از نوسانات ایجاد شده اتفاق می‌افتد.

1-Span

۱۱-۱-۳

نیروی جاذب^۱

$(F_{pi,d})$

حداکثر نیروی کشش (مقدار طراحی) در هادی انعطاف‌پذیر باندل^۲ شده در مدت اتصال کوتاه ناشی از ربایش بین هادی‌های فرعی موجود در یک باندل.

۱۲-۱-۳

مدت زمان اولین جریان اتصال کوتاه

(T_{kl})

فاصله زمانی بین شروع اتصال کوتاه و اولین قطع جریان می‌باشد.

۱۳-۱-۳

جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی

(I_{th})

مقدار موثر جریانی است که دارای اثر حرارتی یکسان و مدت زمان یکسانی با جریان اتصال کوتاه واقعی باشد و این موج می‌تواند شامل مولفه D.C بوده و با گذشت زمان کاهش یابد.

۱۴-۱-۳

چگالی جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی

(S_{th})

نسبت جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی به سطح مقطع هادی است.

۱۵-۱-۳

چگالی جریان قابل تحمل کوتاه مدتی اسمی برای هادی‌ها

(S_{thr})

مقدار موثر چگالی جریانی است که یک هادی در زمان کوتاه اسمی توانایی تحمل آن را دارد.

۱۶-۱-۳

مدت زمان جریان اتصال کوتاه

(T_k)

مجموع مدت زمان‌های عبور جریان اتصال کوتاه از لحظه آغاز اتصال کوتاه تا قطع نهایی جریان در تمام فاز-ها را گویند.

2-pinch force
3-Bundle

۱۷-۱-۳

زمان کوتاه اسمی

(T_{kr})

مدت زمانی است که در آن هادی می‌تواند چگالی جریانی برابر با چگالی جریان کوتاه مدت اسمی خود را تحمل کند.

۲-۱-۳

نمادها و یکاها

تمام معادلات مورد استفاده در این استاندارد معادلات کمی بوده، که در آن کمی بیانگر کمیت‌های فیزیکی از قبیل مقادیر عددی و ابعاد می‌باشند. نمادهای مورد استفاده در این استاندارد و یکاهای SI مربوطه در لیست زیر آورده شده است:

m^2	سطح مقطع هادی اصلی	A
m^2	سطح مقطع هادی فرعی	A_s
m	فاصله مرکز تا مرکز هادی‌ها	a
m	فاصله موثر بین هادی‌های اصلی	a_m
m	حداقل فاصله هوایی	a_{min}
m	فاصله موثر بین هادی‌های فرعی	a_s
m	فاصله خطی بین مرکز هادی فرعی یکم و هادی فرعی n ام	a_{1n}
m	فاصله خطی بین مرکز هادی‌های فرعی	a_{1s}
m	حداکثر جابه‌جایی افقی	b_h
m	ابعاد هادی اصلی عمود بر راستای نیرو	b_m
m	ابعاد هادی فرعی عمود بر راستای نیرو	b_s
1	مدول انبساط حرارتی	C_D
1	مدول شکل‌دهی	C_F
m	ابعاد هادی اصلی در راستای نیرو	c_m
m	ابعاد هادی فرعی در راستای نیرو	c_s
$m^4/(A^2s)$	ثابت مواد	c_{th}
m	قطر خارجی هادی لوله‌ای یا انعطاف‌پذیر	d
N/m^2	مدول یانگ	E
N/m^2	مدول یانگ حقیقی	E_{eff}
1	مدول برای تاثیر قطعات اتصال دهنده	e
N	نیروی اعمالی مابین دو هادی بلند و موازی در مدت زمان اتصال کوتاه	F
N/m	مشخصه نیروی الکترومغناطیسی بر واحد طول در هادی اصلی انعطاف‌پذیر	F'
N	نیروی بین هادی‌های اصلی در مدت اتصال کوتاه	F_m

N	نیروی بین هادی‌های اصلی در مدت اتصال کوتاه دو فاز	F_{m2}
N	نیروی وارده بر هادی اصلی مرکزی در مدت اتصال کوتاه سه فاز متعادل	F_{m3}
N	نیروی وارده بر نگهدارنده هادی صلب (مقدار ماکزیمم، مقدار طراحی)	$F_{r,d}$
N	نیروی سقوط وارده بر هادی اصلی (مقدار طراحی)	$F_{f,d}$
N	نیروی جاذب وارده بر هادی اصلی (مقدار طراحی)	$F_{pi,d}$
N	نیروی بین هادی‌های فرعی در مدت اتصال کوتاه	F_s
N	نیروی کششی ایستا وارده بر یک هادی اصلی انعطاف‌پذیر	F_{st}
N	نیروی کششی اتصال کوتاه وارده بر یک هادی اصلی (مقدار طراحی)	$F_{t,d}$
N	نیروی جریان اتصال کوتاه بین هادی‌های فرعی در باندل	F_v
Hz	بسامد سامانه	f
Hz	بسامد طبیعی مرتبط هادی اصلی	f_{cm}
Hz	بسامد طبیعی مرتبط هادی فرعی	f_{cs}
m	شکم هادی متحرک در وسط اسپن	f_{ed}
m	معادل شکم هادی ایستا در وسط اسپن	f_{es}
m	شکم هادی ایستا در وسط اسپن	f_{st}
N/m ²	تنش مربوط به نقطه تسلیم	f_y
m/s ²	مقدار قراردادی برای شتاب ثقل	g
m	ارتفاع هادی آویز ¹	h
A	جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن اولیه (مقدار موثر)	I_k''
A	جریان اتصال کوتاه خط به زمین اولیه (مقدار موثر)	I_{k1}''
A	جریان اتصال کوتاه دو فاز متقارن اولیه (مقدار موثر)	I_{k2}''
A	جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی	I_{th}
A	ماکزیمم جریان اتصال کوتاه	i_p
A	ماکزیمم جریان اتصال کوتاه در اتصال کوتاه دو فاز	i_{p2}
A	مقدار لحظه‌ای جریان‌ها در هادی‌ها	i_1, i_2
m ⁴	ممان دوم سطح هادی اصلی	J_m
m ⁴	ممان دوم سطح هادی فرعی	J_s
1	پارامتر تعیین پیکربندی باندل در مدت عبور جریان اتصال کوتاه	j
1	تعداد مجموعه المان‌های جداکننده و سفت‌کننده.	k
1	مدولی برای فاصله موثر بین هادی فرعی ۱ یکم و هادی فرعی n ام	k_{1n}
1	مدولی برای فاصله موثر هادی	k_{1s}
m	فاصله خطی مرکز به مرکز نگهدارنده‌ها	l

m	طول هادی اصلی انعطاف‌پذیر در اسپن	l_c
m	طول یک زنجیر مقره	l_i
m	فاصله خط مرکزی بین قطعات اتصال دهنده یا بین مرکز یک قطعه اتصال دهنده و نگهدارنده مجاورش	l_s
m	طول هادی آویز	l_v
Kg/m	جرم واحد طول هادی اصلی	m_m'
Kg/m	جرم واحد طول یک هادی فرعی	m_s'
Kg	کل جرم مجموعه قطعات اتصال	m_z
1/N	معیار سفتی برای نصب با هادی‌های انعطاف‌پذیر	N
1	تعداد هادی‌های فرعی یک هادی اصلی	n
1	مدول شکل‌پذیری (پلاستیسیته)	q
1	نسبت نیروی الکترومکانیکی در یک هادی در شرایط اتصال کوتاه به نیروی گرانش	r
N/m	برآیند ثابت فنریت برای دو نگهدارنده در یک اسپن	S
A/mm ²	چگالی جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی	S_{th}
A/mm ²	چگالی جریان قابل تحمل کوتاه مدت اسمی	S_{thr}
s	دوره تناوب نوسانات هادی	T
s	مدت زمان جریان اتصال کوتاه	T_k
s	مدت زمان اتصال کوتاه i ام در اتصال کوتاه‌های تکرار شونده	T_{ki}
s	زمان کوتاه نامی	T_{kr}
s	مدت زمان اولین عبور جریان اتصال کوتاه	T_{kl}
s	برآیند دوره تناوب نوسانات هادی در مدت جریان اتصال کوتاه	T_{res}
m	ضخامت دیواره لوله	t
1	نسبت نیروی استاتیکی و دینامیکی بر روی نگهدارنده	V_F
1	نسبت تنش دینامیکی (نیروی وارده بر نگهدارنده‌ها، سهم تنش خمشی هادی اصلی) ناشی از نیروهای بین هادی‌های اصلی با وصل مجدد سه فاز خودکار ناموفق و تنش دینامیکی با وصل مجدد سه فاز خودکار موفق	V_{rm}
1	نسبت سهم تنش دینامیکی ایجاد شده توسط نیروی بین هادی‌های فرعی با وصل مجدد سه فاز خودکار ناموفق و سهم تنش دینامیکی با وصل مجدد سه فاز خودکار موفق	V_{rs}
1	نسبت تنش دینامیکی و استاتیکی وارده بر هادی اصلی	V_{om}
1	نسبت تنش دینامیکی و استاتیکی وارده بر هادی فرعی	V_{os}
m ³	مدول مقطع هادی اصلی	W_m
m ³	مدول مقطع هادی فرعی	W_s

1	عرض هادی آویز	w
1	مدولی برای نیروی وارده بر نگهدارنده	α
1	مدول برای تنش هادی اصلی	β
1	مدول برای تخمین بسامد طبیعی مرتبط	γ
درجه	حداکثر زاویه واقعی نوسانی با توجه به محدودیت حرکت نوسانی ایجاد شده توسط هادی آویز	δ
درجه	زاویه نوسان در انتهای جریان اتصال کوتاه	δ_{end}
درجه	حداکثر زاویه نوسان	δ_{max}
درجه	راستای زاویه‌ای نیرو	δ_I
1	انبساط الاستیک	ε_{ela}
1	مدول تغییرشکل مربوط به فشردگی باندل	$\varepsilon_{pi}, \varepsilon_{st}$
1	انبساط حرارتی	ε_{th}
1	مدول تنش هادی اصلی انعطاف‌پذیر	ζ
1	مدول برای محاسبه $F_{pi,d}$ برای هادی‌های فرعی بدون برخورد	η
°C	دمای هادی در لحظه شروع اتصال کوتاه	θ_b
°C	دمای هادی در لحظه پایان اتصال کوتاه	θ_e
1	مدولی برای محاسبه ماکزیمم جریان اتصال کوتاه	κ
H/m	ثابت مغناطیسی، نفوذپذیری خلاء	μ_0
1	تعداد اسپن‌ها برای یک هادی صلب پیوسته	ν
1	ضرایب برای محاسبه $F_{pi,d}$	V_e, V_1, V_2, V_3, V_4
1	مدول محاسبه $F_{pi,d}$ در حالت هادی‌های فرعی برخوردی	ξ
N/m ²	حداقل مقدار تنش کابل وقتی مدول یانگ ثابت شود	σ_{fin}
N/m ²	تنش خمشی ناشی از نیروی بین هادی‌های اصلی (مقدار طراحی)	$\sigma_{m,d}$
N/m ²	تنش خمشی ناشی از نیروی بین هادی‌های فرعی (مقدار طراحی)	$\sigma_{s,d}$
N/m ²	مجموع تنش‌های هادی (مقدار طراحی)	$\sigma_{tot,d}$
1	مقداری برای محاسبه حداکثر زاویه نوسان	χ
1	ضرایبی برای نیروی کشش در هادی انعطاف‌پذیر	φ, ψ

۴ کلیات

- با روش‌های محاسباتی ارائه شده در این استاندارد می‌توان موارد زیر را تخمین زد.
- تنش‌ها در هادی‌های صلب؛
 - نیروهای کششی در هادی‌های انعطاف‌پذیر؛

- نیروهای وارده بر مقره‌ها و اجزای سازه‌ها، که ممکن است آنها را تحت خمش، کشش و یا فشرده‌سازی قرار دهد.

- جابه‌جایی اسپن در هادی‌های انعطاف‌پذیر؛

- میزان گرم شدن هادی‌ها؛

جریان عبوری از هادی‌ها باعث القا نیروهای الکترومغناطیس در آنها می‌شود. در هادی‌های موازی اثر متقابل این نیروهای الکترومغناطیس، باعث تنش‌هایی می‌شوند که باید در تاسیسات پست در نظر گرفته شوند. به این منظور:

- نیروهای بین هادی‌های موازی در بخش‌های بعدی بیان می‌شود.

- مولفه‌های نیروی الکترومغناطیسی که توسط هادی خم‌دار ایجاد می‌گردد، نادیده گرفته می‌شود.

در مورد سامانه‌های با پوشش فلزی^۱، تغییرات نیروی‌های الکترومغناطیس بین هادی‌ها ناشی از پوشش مغناطیسی^۲ ایجاد شده در آن می‌تواند مورد توجه باشد. علاوه بر این باید نیروهای عمل‌کننده بین هادی و اجزای داخلی آن و بین اجزای داخلی باید در نظر گرفته شود.

وقتی هادی‌های موازی در مقایسه با فاصله بین آنها بلند باشند، نیروها بصورت یکسان در طول هادی‌ها توزیع شده و با معادله (۱) بدست می‌آید.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \quad (1)$$

که در آن:

i_1 و i_2	مقدار جریان‌های لحظه‌ای در هادی‌ها
l	فاصله مرکز تا مرکز نگهدارنده‌ها
a	فاصله مرکز تا مرکز هادی‌ها

هنگامی که جهت جریان‌های دو هادی یکسان باشند، بین آنها نیروی جاذبه بوده و هرگاه جریان‌های بین دو هادی در جهات مخالف باشند نیروهایشان دافعه است.

۵ آرایش‌های هادی صلب

۱-۵ کلیات

هادی‌های صلب می‌توانند به روش‌های متفاوت چه بصورت ثابت یا متحرک و یا ترکیبی از هر دو نگهداری شوند. با توجه به نوع و تعداد نگهدارنده، تنش‌ها در هادی‌ها و نیروهای وارده بر نگهدارنده در یک جریان اتصال متفاوت است. در معادلات اشاره شده قابلیت ارتجاع نگهدارنده‌ها لحاظ شده است.

تنش‌های موجود در هادی‌ها و نیروهای وارده بر نگهدارنده به نسبت بین بسامد طبیعی مرتبط سامانه مکانیکی و بسامد سامانه الکتریکی وابسته می‌باشد. برای مثال در حالت تشدید یا نزدیک به این حالت تنش-

1-metal clad switchgera

2- magnetic shielding

ها و نیروهای وارده بر سامانه تقویت می‌شود. اگر $f_{cm}/f < 0.5$ باشد پاسخ سامانه کاهش یافته و حداکثر تنش‌ها در فازهای خارجی حادث می‌شوند.

۲-۵ محاسبه نیروهای الکترومغناطیس

۱-۲-۵ محاسبه حداکثر نیرو بین هادی‌های اصلی در مدت اتصال کوتاه سه فاز در سامانه‌های سه فازی که هادی‌های اصلی در یک صفحه قرار گرفته و فواصل بین مراکز آنها یکسان است، حداکثر نیروی اعمالی در مدت اتصال کوتاه سه فاز بر روی هادی اصلی مرکزی واقع شده و برابر معادله زیر بدست می‌آید:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} \frac{i_p^2}{2} \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

که در آن:

حداکثر مقدار جریان اتصال کوتاه در حالت اتصال کوتاه سه فاز متعادل بوده و برای نحوه محاسبه به	i_p
استانداردهای ملی ایران سری ۶۰۹۰۹ مراجعه شود.	
حداکثر فاصله مرکز به مرکز نگهدارنده‌های مجاور	l
فاصله موثر بین هادی‌های اصلی مطابق با بند ۳-۵.	a_m

یادآوری - هنگامی که هادی‌ها دارای سطح مقطع دایره بوده و نحوه قرارگیری آنها به گونه‌ای است که تشکیل یک مثلث متساوی الاضلاع را می‌دهد، می‌توان از معادله (۲) برای محاسبه برآیند حداکثر نیرو استفاده نمود که در آن a_m طول هر ضلع مثلث است.

۳-۲-۵ محاسبه حداکثر مقدار نیرو بین هادی‌های اصلی در مدت اتصال کوتاه دو فاز حداکثر نیروی اعمالی بین هادی‌های حامل جریان اتصال کوتاه در مدت اتصال کوتاه دو فاز در سامانه سه فاز یا در سامانه‌های تک فاز دو مداره به صورت زیر می‌باشد:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m} \quad (3)$$

که در آن:

حداکثر مقدار جریان اتصال کوتاه در حالت اتصال کوتاه دو فاز	i_{p2}
حداکثر فاصله مرکز به مرکز نگهدارنده‌های مجاور	l
فاصله موثر بین هادی‌های اصلی مطابق با بند ۳-۵.	a_m

۴-۲-۵ محاسبه حداکثر مقدار نیرو بین هادی‌های فرعی هم سطح حداکثر نیروی اعمالی در هادی‌های فرعی بیرونی و بین دو قطعه اتصال مجاور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n}\right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (4)$$

که در آن:

n	تعداد هادی‌های فرعی.
l_s	حداکثر فاصله موجود بین مراکز دو قطعه اتصال مجاور هم
a_s	فاصله موثر بین هادی‌های فرعی
i_p	برابر با i_p در سامانه سه فاز یا i_{p2} در سامانه تک فاز دو مداره.

۳-۵ فاصله موثر بین هادی‌های اصلی و بین هادی‌های فرعی

نیروی‌های بین هادی‌هایی که حامل جریان اتصال کوتاه هستند، به آرایش هندسی و شکل مقطع هادی‌ها بستگی دارد. به همین دلیل در زیر بندهای ۱-۲-۵ و ۲-۲-۵، فاصله موثر بین هادی‌های اصلی a_m و در زیر بند ۳-۲-۵ فاصله موثر a_s بین هادی‌های فرعی مطرح شده‌اند. این فواصل باید به صورت زیر در نظر گرفته شوند.

فاصله موثر a_m بین هادی‌های اصلی هم سطح، با فاصله a از یکدیگر :
- هادی‌ها اصلی با سطح مقطع دایره:

$$a_m = a \quad (5)$$

- هادی‌های اصلی با سطح مقطع مستطیل و هادی‌های اصلی متشکل از هادی‌های فرعی با سطح مقطع مستطیل:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (6)$$

k_{12} باید از شکل ۱ و با فرض $a_{1s} = a$ ، $b_s = b_m$ و $c_s = c_c$ بدست آید.
فاصله موثر a_s بین n هادی فرعی هم سطح در یک هادی اصلی عبارت است از:
- هادی‌های فرعی با سطح مقطع دایره:

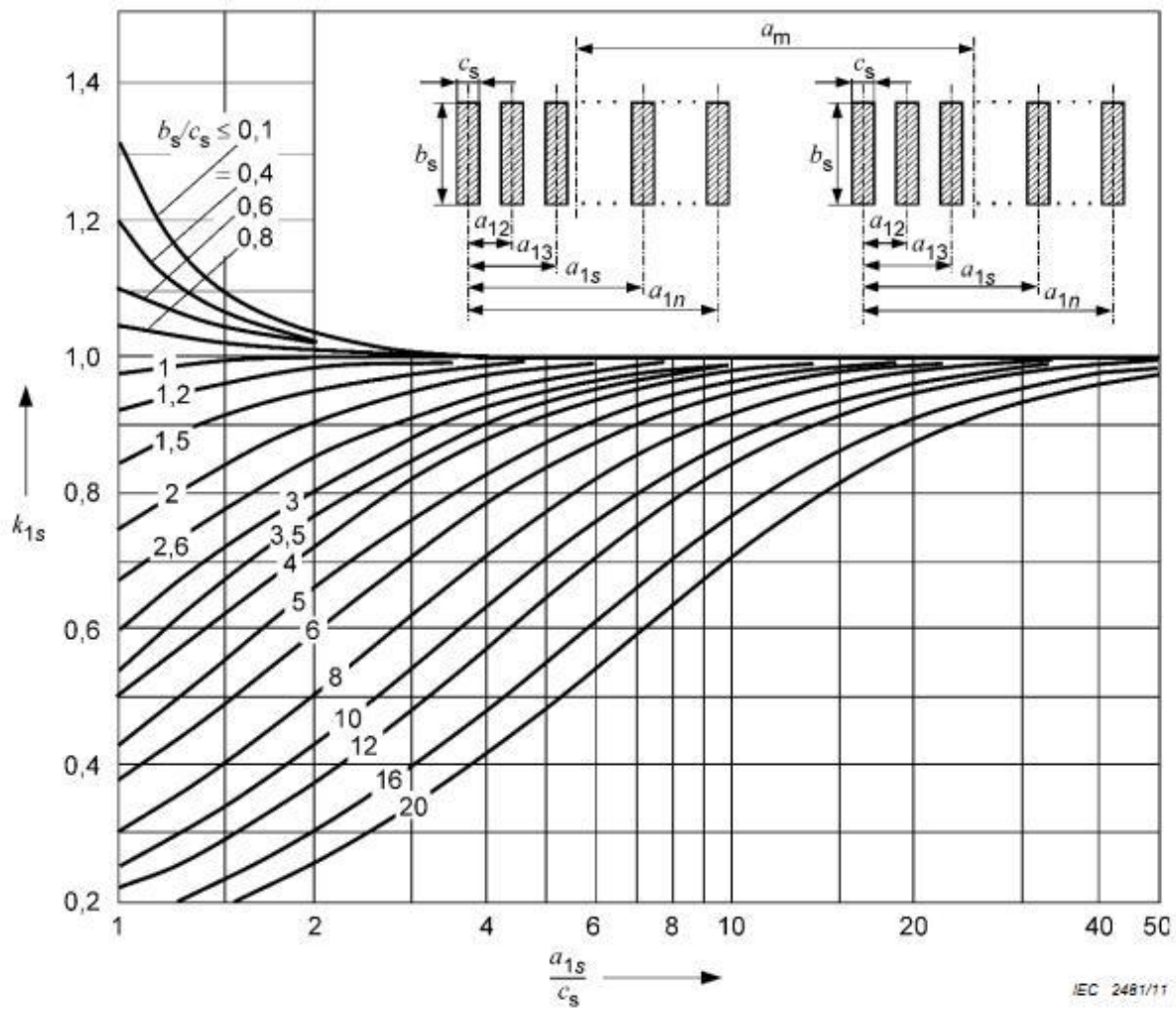
$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (7)$$

- هادی‌های فرعی با سطح مقطع مستطیل:

بعضی مقادیر a_s در جدول ۱ ارائه شده است. برای سایر فواصل و ابعاد دیگر هادی فرعی می‌توان از معادله زیر استفاده نمود.

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (8)$$

مقادیر k_{12}, \dots, k_{1n} را باید از شکل ۱ بدست آورد.



یادآوری - در پیوست الف-۲، معادله منحنی بالا برای برنامه‌نویسی، ارائه شده است.

شکل ۱ - جدول k_{1s} برای محاسبه فاصله موثر هادی

جدول ۱ - فاصله موثر a_s بین هادی‌های فرعی برای ابعاد با سطح مقطع مستطیل

ابعاد بر حسب متر:

									سطح مقطع مستطیل
± 0.20	± 0.16	± 0.12	± 0.10	± 0.08	± 0.06	± 0.05	± 0.04	b_s	c_s
-	-	-	± 0.40	± 0.33	± 0.27	± 0.24	± 0.20	± 0.05	
± 0.80	± 0.67	± 0.54	± 0.47	± 0.41	± 0.34	± 0.31	± 0.28	± 0.10	
-	-	-	± 0.22	± 0.18	± 0.15	± 0.13	-	± 0.05	
± 0.43	± 0.37	± 0.30	± 0.27	± 0.23	± 0.20	± 0.19	± 0.17	± 0.10	
-	-	-	-	-	-	-	-	± 0.05	
± 0.31	± 0.26	± 0.22	± 0.20	± 0.18	± 0.16	± 0.15	± 0.14	± 0.10	
-	-	-	± 0.20	± 0.18	± 0.15	± 0.14	-	± 0.05	
-	± 0.32	± 0.27	± 0.25	± 0.22	± 0.20	± 0.18	± 0.17	± 0.10	

۴-۵ محاسبه تنش‌ها در هادی صلب

۱-۴-۵ محاسبه تنش‌ها

هادی‌ها باید بگونه‌ای ثابت شوند که بتوان نیروهای محوری را نادیده گرفت. با این فرض نیروی‌های اعمالی عبارتند از نیروهای خمشی و معادله کلی برای تنش خمشی ایجاد شده ناشی از نیروهای بین هادی‌های اصلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{r m} \beta \frac{F_m l}{8W_m} \quad (9)$$

که در آن:

F_m عبارت است از مقدار F_{m3} در سامانه‌های سه فاز براساس معادله (۲) یا F_{m2} در سامانه‌های تک‌فاز دو

مداره براساس معادله (۳)

مدول مقطع هادی اصلی است که باید براساس راستای نیروهای بین هادی‌های اصلی محاسبه شود. W_m

تنش خمشی که توسط نیروهای بین هادی‌های فرعی ایجاد شده، به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_{s,d} = V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s l_s}{16 W_s} \quad (10)$$

که در آن:

F_m مطابق با معادله (۴) باید استفاده شود.

W_s مدول مقطع هادی فرعی بوده و باید براساس راستای نیروهای بین هادی‌های فرعی محاسبه شود.

ضرایب V_{rs} و V_{rm} ، V_{sm} ، V_{om} پدیده‌های دینامیکی را نیز در بردارند و β مدولی مرتبط با نوع و تعداد نگهدارنده‌ها می‌باشد. حداکثر مقدار ممکن برای $V_{om} V_{rm}$ و $V_{\sigma s} V_{rs}$ باید از جدول ۲ و مدول β از جدول ۳ استخراج شود.

یادآوری- مدول β ، بیانگر کاهش میزان تنش خمشی در محل نگهدارنده بوده، که تغییر شکل غیر قابل برگشت هادی نیز در نظر گرفته شده است (به جدول ۳ مراجعه شود).

در صورتی که در طول یک هادی اسپن‌های متوالی نابرابری وجود داشته باشد آنگاه با درجه دقت کافی می‌توان بلندترین اسپن را مد نظر قرار داد. این امر بدان معنی است که:

- نگهدارنده‌های انتهایی نسبت به نگهدارنده داخلی در معرض تنش‌های بزرگتری از قرار نمی‌گیرد.
 - باید از اسپن‌هایی با طول کمتر از ۲۰٪ اسپن‌های مجاور اجتناب شود و در صورتی که این عمل امکان‌پذیر نباشد، هادی‌ها باید با استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر در نگهدارنده‌ها از یکدیگر جدا شوند. در صورت وجود اتصال انعطاف‌پذیر در یک اسپن، طول این اسپن باید کمتر از ۷۰٪ مجموع طول‌های اسپن‌های مجاور باشد.
 - اگر ثابت بودن یا دارای نگهدارنده بودن هادی مشخص نباشد، بدترین وضعیت را باید در نظر گرفت.
- برای ملاحظات بیشتر به بند ۷-۵ مراجعه شود.

۴-۵-۲ مدول مقطع و مدول q هادی اصلی متشکل از هادی‌های فرعی

تنش خمشی و در نتیجه استحکام مکانیکی هادی، به مدول مقطع بستگی دارد. در صورتی که تنش مطابق شکل ۲ الف بوجود آید، مدول مقطع W_m مستقل از تعداد قطعات اتصال بوده و برابر با مجموع مدول مقطع W_s هادی‌های فرعی می‌باشد (W_s نسبت به محور X-X). برای سطح مقطع‌های مستطیل، مدول q برابر با ۱/۵ و برای مقاطع U و I برابر با ۱/۱۹ می‌باشد.

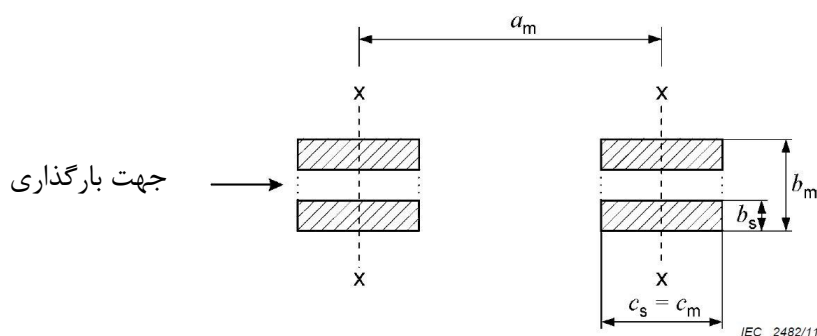
در صورتی که تنش مطابق شکل ۲ ب ایجاد شده باشد، در حالتی که حداکثر یک عنصر مستحکم‌کننده در فاصله بین نگهدارنده‌ها، وجود داشته باشد، مدول مقطع W_m برابر با مجموع مدول‌ها مقطع W_s هادی‌های فرعی می‌باشد (W_s نسبت به محور Y-Y). برای سطح مقطع‌های مستطیل، مدول q برابر با ۱/۵ و برای مقطعی با شکل U و I برابر با ۱/۸۳ می‌باشد.

وقتی در یک فاصله، دو یا چند عنصر مستحکم کننده وجود داشته باشد، می توان از مقادیر بزرگتر مدول مقطع استفاده نمود.

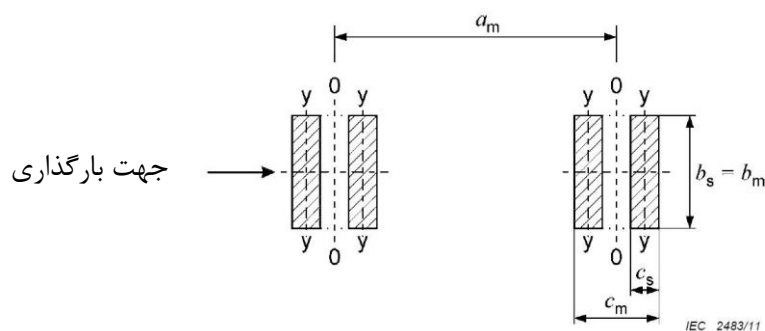
- برای هادی های اصلی متشکل از هادی های فرعی با سطح مقطع مستطیل که فاصله بین هادی های آن برابر با ضخامت یک هادی می باشد، مدول مقطع در جدول ۵ ارائه شده است.

- برای گروهی از هادی ها که سطح مقطع آنها به شکل U و I هستند، باید از ۵۰٪ مدول مقطع نسبت به محور 0-0 استفاده نمود.

مدول q در این حالت برای سطح مقطع های مستطیل، برابر با $1/5$ و برای مقاطعی با شکل U و I برابر با $1/83$ می باشد.



شکل ۲ الف - بارگذاری در امتداد سطح




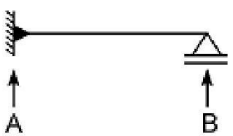
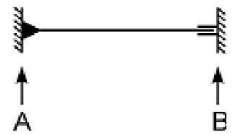
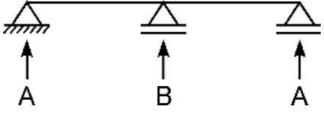
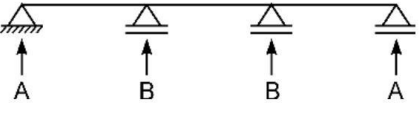
شکل ۲ ب - بارگذاری عمود بر سطح

شکل ۲ - جهت بارگذاری و محور خمش برای آرایش های هادی چندتایی

جدول ۲- حداکثر مقدار ممکن $V_F V_{rm}, V_{\sigma s} V_{rs}, V_{\sigma m} V_{rm}$

نوع اتصال کوتاه	سامانه		
	بدون وصل مجدد خودکار سه فاز	با وصل مجدد خودکار سه فاز	با و بدون وصل مجدد خودکار سه فاز
	$V_{\sigma m} V_{rm}, V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_{\sigma m} V_{rm}, V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_F V_{rm}$
		اولین عبور جریان	دومین عبور جریان
فاز به فاز	۱/۰	۱/۰	۱/۸
			محدوده
			$\frac{\sigma_{tot,d}}{0.8f_y} \leq 0.5$ ۲/۰ ۱ $\frac{\sigma_{tot,d}}{0.8f_y} \leq 1.0$ $\frac{0.8f_y}{\sigma_{tot,d}}$ ۲ $\frac{\sigma_{tot,d}}{0.8f_y}$ ۱/۰ ۳
سه فاز	۱/۰	۱/۰	۱/۸
			محدوده
			$\frac{\sigma_{tot,d}}{0.8f_y} \leq 0.37$ ۲/۷ ۱ $\frac{\sigma_{tot,d}}{0.8f_y} \leq 1.0$ $\frac{0.8f_y}{\sigma_{tot,d}}$ ۲ $\frac{\sigma_{tot,d}}{0.8f_y}$ ۱/۰ ۳

جدول ۳- ضرایب α ، β ، γ برای آرایش‌های مختلف نگهدارنده شینه‌ها

α	β^*	γ	نوع تیر و نگهدارنده	
A: ۰/۵ B: ۰/۵	۱/۰	۱/۵۷		A و B: نگهدارنده‌های ساده
A: ۰/۶۲۵ B: ۰/۳۷۵	$\frac{8}{11} = ۰/۷۳$	۲/۴۵		A: نگهدارنده ثابت B: نگهدارنده ساده
A: ۰/۵ B: ۰/۵	$\frac{8}{61} = ۰/۱۳$	۳/۵۶		A و B: نگهدارنده های ثابت
A: ۰/۳۷۵ B: ۱/۲۵	$\frac{8}{11} = ۰/۷۳$	۲/۴۵		دو اسپن هادی با اسپن‌های متوالی و نگهدارنده-های ساده
A: ۰/۴ B: ۱/۱	$\frac{8}{11} = ۰/۷۳$	۳/۵۶		سه اسپن یا بیشتر

* اثرات انعطاف‌پذیری را در بر می‌گیرد.

۳-۴-۵ تنش مجاز هادی

فرض می‌شود یک هادی یک زمانی می‌تواند نیروهای اتصال کوتاه را تحمل کند که:

$$\sigma_{m,d} \leq q f_y \quad (۱۱)$$

که در آن:

f_y تنش مربوط به نقطه تسلیم است.

مدول q باید از جدول ۴ بدست آید (به زیر بند ۲-۴-۵ نیز مراجعه شود).

یادآوری- مدول q ارائه شده در جدول ۴ و زیر بند ۲-۴-۵، بیانگر افزایش تنش مجاز هادی ناشی از رفتار برگشت-ناپذیر آن در مکان‌هایی خارج از محل نگهدارنده‌ها می‌باشد که در آن شکل هادی در نظر گرفته شده است.

وقتی هادی اصلی شامل دو یا تعدادی بیشتر هادی فرعی باشد. کل تنش وارده بر هادی از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_{tot,d} = \sigma_{m,d} + \sigma_{s,d} \quad (12)$$

فرض بر این است که هادی هنگامی قادر به تحمل نیروهای اتصال کوتاه است که:

$$\sigma_{tot,d} \leq qf_y \quad (13)$$

تصدیق این موضوع که اتصال کوتاه تاثیر چندان زیادی بر فاصله بین هادی‌های فرعی نمی‌گذارد، ضروری است. بنابراین مقدار زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\sigma_{s,d} \leq f_y \quad (14)$$

بالاترین مقادیر قابل قبول q برای سطح مقطع‌های مختلف در جدول ۴ ارائه می‌شود. برای $\sigma_{m,d} = qf_y$ ، و به طبع آن $\sigma_{tot,d} = qf_y$ امکان ایجاد تغییر شکل‌های دائمی کوچک وجود دارد که میزان آن به طور تقریبی یک درصد فاصله بین نگهدارنده‌ها برای مقادیر q مطابق با جدول ۴ است که ایمنی کار را به خطر نمی‌اندازد بطوری که حداقل فاصله بین هادی‌های اصلی یا بین هادی‌های اصلی و سازه زمین شده رعایت می‌گردد.

برای نقطه تسلیم مواد هادی، f_y ، استانداردها اغلب گستره‌هایی با مقادیر حداقل و حداکثر را معرفی می‌کنند. اگر بجای مقادیر خوانده شده، تنها این مقادیر حدی در دسترس باشند، لازم است حداقل مقدار در زیربند ۳-۴-۵ و مقدار حداکثر، در جدول ۲ استفاده شود.

یادآوری - تنش ایستایی احتمالی در هادی (برای مثال نیروی ناشی از وزن مرده آن) در معادلات (۱۱) تا (۱۴) در نظر گرفته نشود. در صورت امکان بهتر است با تنش حاصل از اتصال کوتاه متناظر با راستای عملکرد آن ترکیب شود.

۵-۵ بارهای سازه‌ای^۱ ناشی از هادی‌های صلب

نیروی استاتیکی معادل $F_{r,d}$ بر روی نگهدارنده‌های هادی‌های صلب باید به صورت زیر محاسبه شود:

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_m \quad (15)$$

که در آن:

F_m برابر با مقدار F_{m3} در اتصال کوتاه سه فاز سامانه‌ها بر مبنای معادله (۲) و یا F_{m2} در سامانه‌های تک فاز دو مداره براساس معادله (۳) می‌باشد.

حداکثر مقدار ممکن $V_F V_{rm}$ باید از جدول ۲ بدست آید.

مدول α بستگی به نوع و تعداد نگهدارنده‌ها داشته و باید از جدول ۳ استخراج شود.

برای ملاحظات بیشتر به بند ۷-۵ مراجعه شود.

نیروی $F_{r,d}$ نباید بزرگتر از حد تحمل تعیین شده توسط سازنده نگهدارنده‌ها و مقره‌ها باشد. برای مقره‌ای که تحت تنش ناشی از نیروی خمشی قرار گرفته است، مقدار قابل تحمل اسمی، بعنوان نیروی اعمالی در نوک مقره داده می‌شود.

یادآوری - برای نیرویی که در نقطه‌ای بالاتر از نوک مقره اعمال می‌شود، باید از مقداری کمتر از عدد تحمل نامی استفاده شود که این مقدار براساس ممان خمش قابل تحمل در سطح مقطع بحرانی مقره می‌باشد.

۵-۶ ملاحظات مربوط به وصل مجدد خودکار

در هادی‌های صلب در صورتی که وصل مجدد خودکار سه فاز استفاده شده باشد، وصل مجدد خودکار باید در نظر گرفته شود.

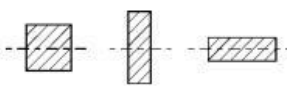


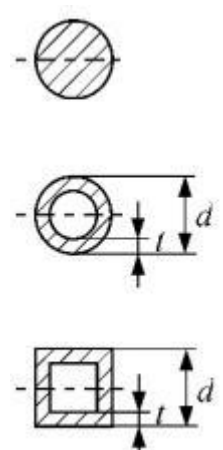
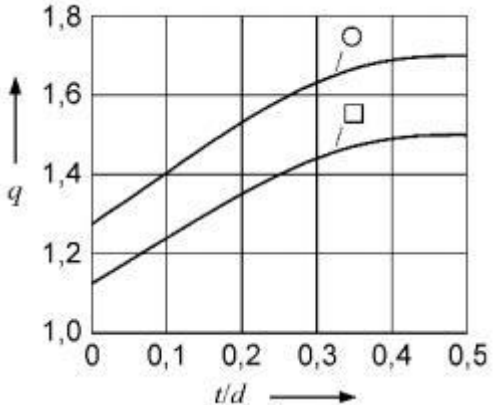
در شبکه‌ها با وصل مجدد خودکار سه فاز، تنش‌های مکانیکی متفاوتی در طی اولین و دومین عبور جریان رخ می‌دهد. بنابراین نیروهای متفاوتی می‌تواند در طی مدت عبور این دو جریان بر نگهدارنده‌ها وارد شود. به همین دلیل نیروی $F_{r,d}$ به شرح زیر محاسبه می‌شود:

- محاسبه $\sigma_{tot,d}$ براساس بند ۴-۵ با استفاده از مقادیر $V_{\sigma s}V_{r s}, V_{\sigma m}V_{r m}$ استخراج شده از جدول ۲ برای مدت زمان عبور جریان اولیه و $V_F V_{r m}$ تعیین شده از جدول ۲؛

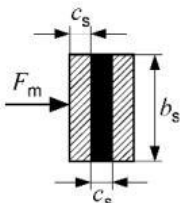
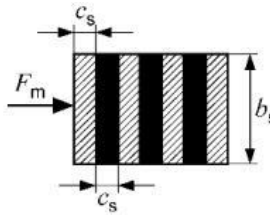
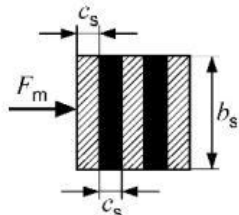
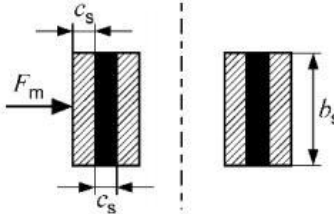
- محاسبه $\sigma_{tot,d}$ براساس بند ۴-۵ با استفاده از مقادیر $V_{\sigma s}V_{r s}, V_{\sigma m}V_{r m}$ استخراج شده از جدول ۲ برای مدت زمان عبور جریان ثانویه و $V_F V_{r m}$ تعیین شده از جدول ۲؛

- محاسبه $F_{r,d}$ براساس معادله (۱۵) با حداکثر مقدار $V_F V_{r m}$ خارج از مدت عبور هر دو جریان؛

جدول ۴- مدول q

سطح مقطع	سطح مقطع
 <p style="text-align: center;">$q=1.5$</p>	 <p style="text-align: right;">$q=1.83$</p> <hr/>  <p style="text-align: right;">$q=1.19$</p>
 <p style="text-align: center;">$q=1.7$</p> <p style="text-align: center;">$q = 1.7 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$</p> <p style="text-align: center;">$q = 1.5 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$</p>	
<p>q برای محور خمش نقطه چین معتبر است. نیروها عمود بر آنها هستند.</p>	

جدول ۵- مدول مقطع W_m هادی‌های اصلی با دو یا چند عنصر مستحکم کننده بین دو نگهدارنده مجاور

مقطع مستطیل	W_m	مقطع مستطیل	W_m
	$0.1867 C_s^2 b_s$		$2/48 C_s^2 b_s$
	$1/98 C_s^2 b_s$		$1/72 C_s^2 b_s$
عناصر مستحکم کننده با رنگ مشکی نشان داده شده‌اند.			

۷-۵ محاسبه با توجه ویژه به نوسانات هادی

۱-۷-۵ کلیات

معادلات موجود در زیر بندهای ۵-۴-۱ و ۵-۵ شامل ضرایب $V_{\sigma s}$ ، V_F ، V_{rm} و V_{rs} بوده که ماهیت نوسانی تنش‌ها و نیروها را مورد توجه قرار می‌دهند.

حدود بالای این ضرایب در جدول ۲ ارائه شده‌اند. مقادیر پایین‌تر از این حدود، زمانی مجاز هستند که برابر با زیربندهای زیر تعیین شده باشند. ضروری است به منظور محاسبه بسامدهای طبیعی مرتبط f_{cm} دقت داده‌ها نیز در نظر گرفته شود.

۲-۷-۵ تعیین بسامد طبیعی مرتبط

بسامد طبیعی مربوط به یک هادی را می‌توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$f_{cm} = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (16)$$

معادله (۱۶) مستقیماً برای هادی‌های اصلی با سطح مقطع واحد قابل اجرا است. مدول γ وابسته به نوع و تعداد نگهدارنده‌ها بوده و در جدول ۳ ارائه شده است.

یادآوری- بسامد طبیعی مرتبط با هادی صلبی که دارای ۳ یا بیش از ۳ اسپن بوده و براساس معادله (۱۶) محاسبه شده، تا اندازه‌ای بزرگتر است و دستیابی به محاسبه دقیقتر نیازمند تلاش اضافی است.

اگر هادی اصلی متشکل از هادی‌های فرعی با سطح مقطع مستطیل باشند، بسامد طبیعی مرتبط با هادی اصلی باید از معادله زیر محاسبه شود:

$$f_{cm} = e \frac{\gamma^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (17)$$

مدول e باید از شکل ۳ ب و ج استخراج شود. در حالتی که قطعه اتصالی وجود نداشته باشد $e=1$ می‌باشد. برای هادی اصلی متشکل از هادی‌های فرعی با مقطعی به شکل U و I، f_{cm} از معادله (۱۶) محاسبه می‌شود: J_m و m'_m باید برای طراحی هادی اصلی بکار روند. برای محاسبه تنش هادی فرعی، با در نظر گرفتن بسامد طبیعی مرتبط، باید از معادله زیر استفاده نمود:

$$f_{cs} = \frac{3.56^2}{l_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (18)$$

یادآوری- ممان دوم سطح، J_m و J_s مطابق با شکل ۲ الف و ب محاسبه می‌شود.

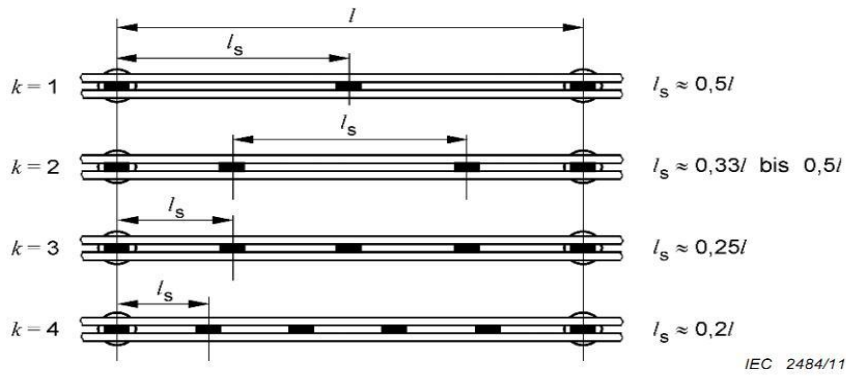
۵-۷-۳ ضرایب V_{rs} و V_{rm} ، V_{os} ، V_{om} ، V_F

اگر اتصال کوتاه سه فاز یا دو فاز مد نظر باشد ضرایب V_{rs} ، V_{rm} ، V_{os} ، V_{om} ، V_F به عنوان توابعی از نسبت f_{cm}/f و f_{cs}/f که در آنها f بسامد سامانه است، اندکی متفاوت می‌باشند. همچنین این ضرایب به میرایی مکانیکی هادی سامانه وابسته هستند. برای محاسبات عملی، این ضرایب باید از شکل ۴ استخراج شود.

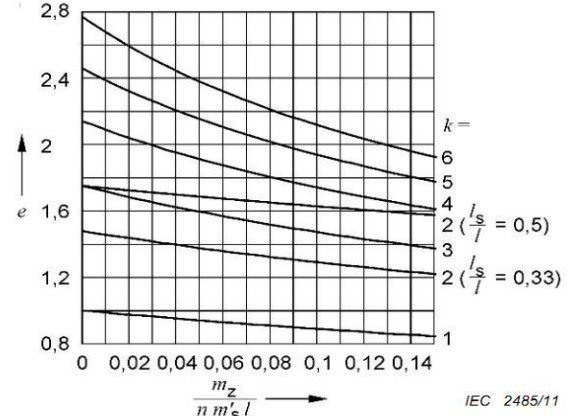
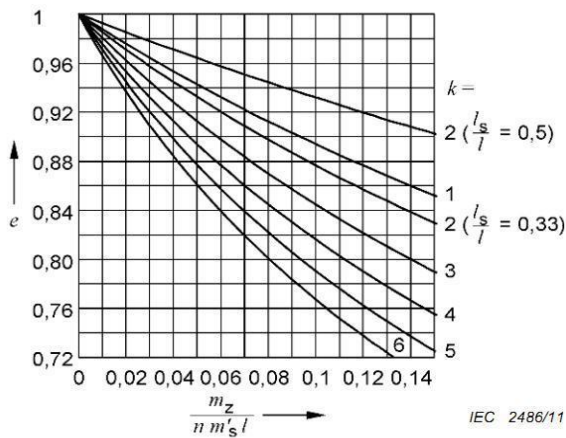
یادآوری ۱- مدت زمان اتصال کوتاه $T_{k1} \leq 0.1 s$ می‌تواند باعث کاهش محسوس تنش در سازه‌هایی با $\frac{f_{cm}}{f} \leq 1$ شود.

یادآوری ۲- در حالتی که نگهدارنده‌ها انعطاف‌پذیر هستند، بسامد طبیعی مرتبط کمتر از مقدار محاسبه شده در معادله (۱۶) می‌باشد. در صورتی که مقدار عبارت $f_{cm}/f \geq 2.4$ باشد این موضوع در هنگام استفاده از شکل ۴ نظر گرفته می‌شود.

در وصل مجدد خودکار سه فاز، ضرایب V_{rs} و V_{rm} باید از شکل ۵ استخراج گردد. در حالات دیگر $V_{rm}=1$ و $V_{rs}=1$ است.



شکل ۳ الف- آرایش قطعات اتصال دهنده در یک اسپین



شکل ۳ پ- قطعات اتصال جدا کننده هستند یا به عنوان جداکننده عمل می کنند.

شکل ۳ ب- قطعات اتصالی عناصر مستحکم کننده هستند.

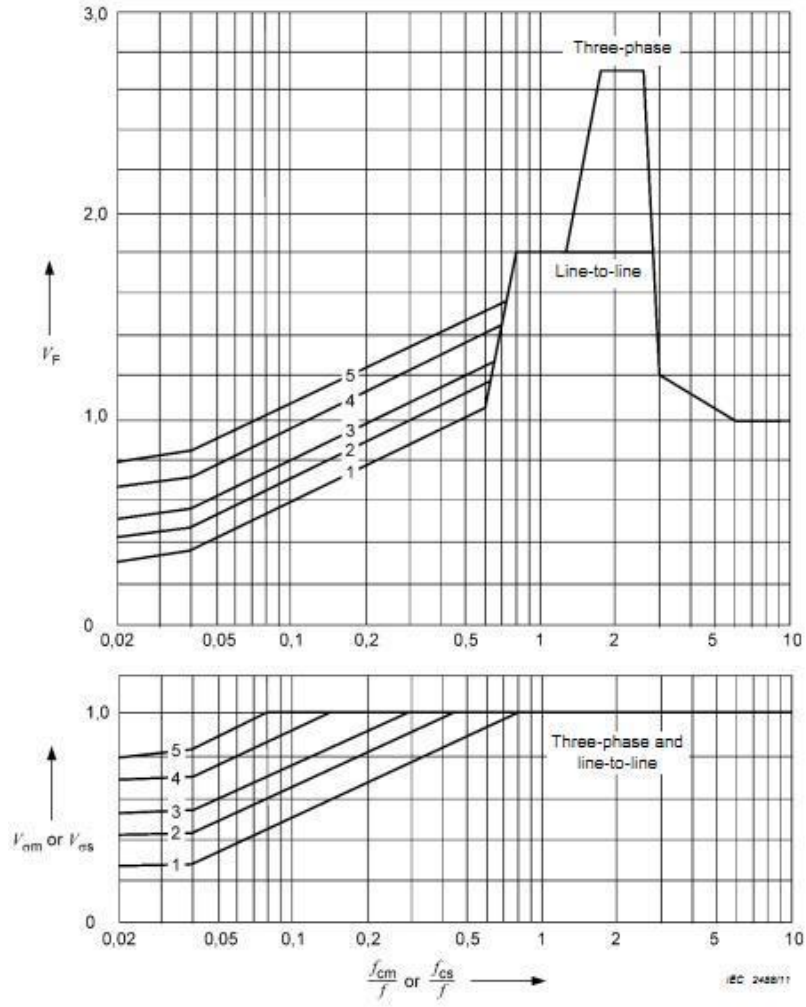
مدول e باید از شکل ۳ ب و پ مطابق آنچه نشان داده شده استخراج شود.

	در بین فاصله وجود دارد	
	تعداد K عناصر مستحکم کننده	تعداد K جدا کننده
جهت نوسانات عمود بر سطح 	مدول e از شکل ۳ ب	مدول e از شکل ۳ پ
جهت نوسانات در راستای سطح 	مدول e از شکل ۳ پ	مدول e از شکل ۳ پ

IEC 2487/11

یادآوری- در پیوست الف-۳ معادله منحنی بالا برای برنامه نویسی، ارائه شده است.

شکل ۳- ضرب e برای تاثیر قطعات اتصال در معادله (۱۷)



حالت

$$\sqrt{3}\kappa = 1.25$$

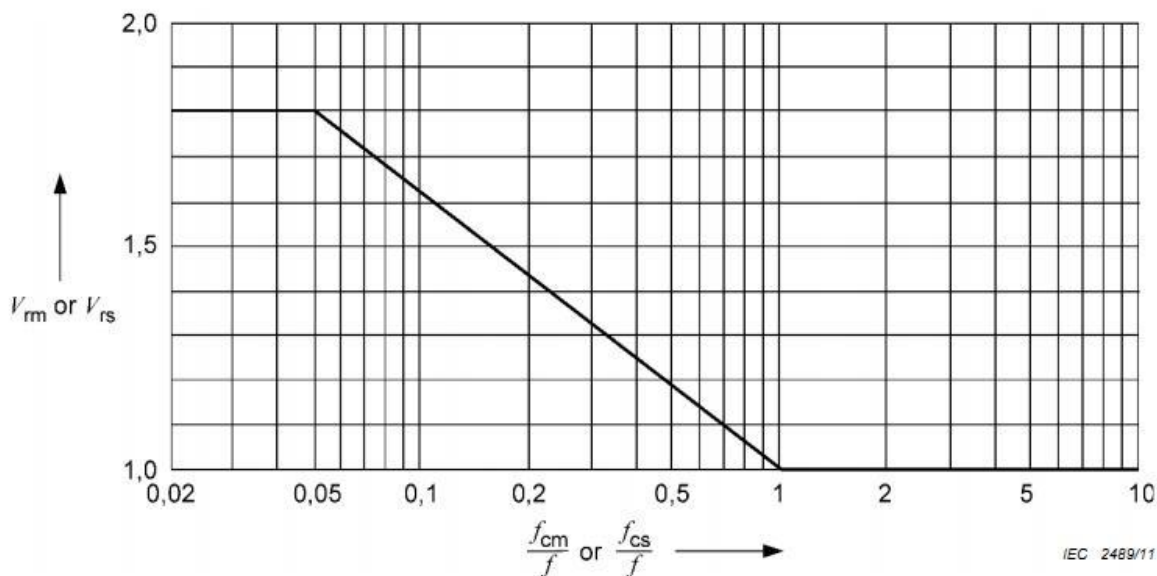
$$\sqrt{2}\kappa = 1.40$$

$$\kappa \geq 1.60$$

$$\Delta\kappa = 1.00$$

$$\kappa = 1.10$$

شکل ۴- ضرایب V_F ، V_{om} و V_{os} استفاده شده در اتصال کوتاه سه فاز و فاز به فاز



شکل ۵- ضرایب V_{rs} و V_{rm} مورد استفاده در وصل مجدد خودکار سه فاز

۶ آرایش‌های هادی انعطاف‌پذیر

۱-۶ کلیات

در اسپن، تفاوت‌هایی بین نیروی کششی $F_{t,d}$ ناشی از نوسانات هادی در مدت اتصال کوتاه، نیروی کششی $F_{f,d}$ بعد از اتصال کوتاه وقتی هادی به حالت اولیه‌اش بازگردد و نیروی $F_{pi,d}$ ناشی از اثرات نیروی جاذب در هادی‌های باندل وجود دارد. اثرات بر روی هادی‌های اصلی افقی در بند ۲-۶ محاسبه شده است. پس از محاسبه پارامترهای مشخصه برای پیکربندی و نوع اتصال کوتاه در زیر بند ۲-۲-۶، نیروی کششی $F_{t,d}$ بدون هادی آویز در اسپن مطابق زیر بند ۳-۲-۶ محاسبه می‌شود. تغییرات دینامیکی شکم هادی ناشی از افزایش طول آن و تغییرات در شکل منحنی هادی در زیر بند ۴-۲-۶ و پس از آن نیروی کششی $F_{t,d}$ با هادی آویز در اسپن در زیر بند ۵-۲-۶ تعیین می‌شود. بررسی نیروی کششی بعد از اتصال کوتاه $F_{f,d}$ در زیر بند ۶-۲-۶ آورده شده است. جابجایی افقی هادی b_h و حداقل فاصله هوایی بین هادی‌ها a_{min} در مدت نوسانات هادی در زیر بند ۷-۲-۶ محاسبه می‌گردند. تاثیرات بر روی هادی‌های اصلی افقی در بند ۳-۶ توضیح داده شده و نیروی کششی $F_{pi,d}$ در بند ۴-۶ محاسبه می‌گردد. بارگذاری طراحی شده در بند ۵-۶ ارائه شده‌اند.

در تاسیساتی که از هادی‌های انعطاف‌پذیر استفاده شده، تنش‌های ناشی از اتصال کوتاه دو فاز و سه فاز متعادل تقریباً برابر است. با این وجود در اتصال کوتاه دو فاز نوسان هادی به طور معمول باعث کاهش حداقل فاصله هوایی می‌شود (بدین معنی است که وقتی هادی‌های مجاور که جریان اتصال کوتاه را عبور دهند بعد از اتصال کوتاه به یکدیگر نزدیک می‌شوند). در حالت اتصال کوتاه سه فاز متعادل، هادی مرکزی بدلیل اینرسی و نیروهای دو جهته متناوبی که به آن اعمال می‌شود تنها به میزان اندکی حرکت می‌کند. در نتیجه $F_{t,d}$ ، $F_{f,d}$ و b_h برای اتصال کوتاه دو فاز محاسبه می‌شوند.

نیروهای کششی $F_{t,d}$ ، $F_{f,d}$ و $F_{pi,d}$ شامل نیروهای کششی ناشی از بار مرده نیز می‌باشند. محاسباتی که در ادامه بیان شده باید بر پایه نیروی کششی استاتیکی F_{st} موجود در حداقل دمای محلی زمستان برای مثال -20°C و همچنین در حداکثر دمای کاری برای مثال 60°C باشد. برای هر نیروی کششی، بدترین حالت باید در طراحی در نظر گرفته شود.

۲-۶ اثرات بر روی هادی‌های اصلی افقی

۱-۲-۶ کلیات

زیر بندهای بعدی برای هادی‌های تک و باندل کاربرد دارند. علاوه بر تنش‌هایی که در اینجا محاسبه شده، تنش‌های ناشی از هادی‌های فرعی مطابق در بند ۴-۶ نیز محاسبه می‌شود. آرایش با و بدون هادی آویز در داخل اسپن نیز مورد توجه قرار گرفته است. بخش‌های زیر برای هادی‌های افقی موازی معتبر است. در دیگر آرایش‌ها، نیروهای کششی کوچکتری اتفاق می‌افتد. با توجه به دستیابی به چنین معادلاتی، توصیه می‌شود که در این حالات نیز از معادلات داده شده استفاده شود. همچنین اگر اختلاف ارتفاع بین نقاط ثابت بیشتر از ۲۵٪ اسپن باشد، محاسبات باید براساس بند ۳-۶ صورت گیرد.

معادلات زیر برای اسپن‌هایی که طول آنها کمتر از ۱۲۰ m بوده و نسبت شکم به طول اسپن تقریباً ۸٪ می‌باشد، بکار برده می‌شود. برای اسپن‌های طولانی‌تر حرکت هادی می‌تواند باعث تنش کمتری نسبت به مقادیر محاسبه شده از معادلات گردد. اگر این موضوع با استفاده از محاسبات و اندازه‌گیری اثبات شود، نیروهای کمتری در نظر گرفته می‌شود.

یادآوری- هادی‌های آویزی که نزدیک نقاط ثابت هادی اصلی قرار دارند تاثیر ناچیزی بر نیروهای کششی و حرکت هادی اصلی دارند. در این حالت، پیشنهاد می‌شود محاسبات با توجه به بند ۲-۶ بدون توجه به هادی‌های آویز صورت پذیرد.

اثر جرم‌های متمرکز در اسپن، برای مثال کلمپ‌ها، هادی‌های آویز یا اتصال دهنده‌ها هنگام محاسبه نیروی کششی استاتیکی F_{st} و نیروی شکم استاتیکی f_{st} ، باید مورد توجه قرار گیرد. در این حالت برای هادی‌های آویز بهتر است نصف جرم آن لحاظ شود.

در هنگام محاسبه نیروهای کششی $F_{t,d}$ و $F_{f,d}$ ، باید مجموع جرم‌های متمرکز موجود به عنوان جرم اضافی برحسب واحد طول در سرتاسر اسپن‌اعمال شوند. اما جرم هادی آویز در وسط اسپن و کلمپ آن نباید در نظر گرفته شود.

۲-۲-۶ مشخصه ابعاد و پارامتر

در سامانه‌های سه فاز نیرو الکترومغناطیسی مشخصه هادی‌های اصلی انعطاف‌پذیر واحد طول به شرح زیر می‌باشد.

- اگر جریان در تمامی طول اسپن در هادی اصلی جاری شود چه در صورت وجود و یا عدم وجود هادی آویز:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0.75 \frac{(I_k'')^2 l_c}{a l} \quad (19a)$$

- اگر جریان در نیمی از طول اسپن در هادی اصلی و در طول هادی آویز جاری شود:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0.75 \frac{(I_k'')^2 \frac{l_c/2 + l_v/2}{l}}{a} \quad (19b)$$

که در آن:

I_k''	جریان اولیه اتصال کوتاه متقارن سه فاز (موثر)
a	فاصله مرکز به مرکز نقاط میانی در هادی اصلی
l_c	طول سیم یا کابل هادی اصلی در اسپن
l_v	طول هادی آویز

در هادی‌های کشیده نشده^۱ که نیروی خمشی بر روی مقره‌های اتکایی اعمال می‌شود $l_c = l$. برای اسپن-هایی با هادی‌های کشیده شده $l_c = l - 2l_i$ که l_i طول یک زنجیره مقره می‌باشد. در سیستم‌های تک‌فاز دوخطه در معادله (۱۹) عبارت $0.75(I_k'')^2$ با $(I_k'')^2$ جایگزین می‌شود.

یادآوری ۱- در روش محاسبه ذکر شده، نقش مولفه‌های غیر متناوب جریان اتصال کوتاه در نظر گرفته نشده است. این موضوع در صورتی در نتایج تأثیری قابل ملاحظه‌ای دارند که، مدت زمان عبور جریان اتصال کوتاه کمتر از ۰/۱ ثانیه باشد. در این حالت به منبع [2] مراجعه شود.

نسبت نیروی الکترومغناطیسی تحت شرایط اتصال کوتاه به نیروی گرانشی بر روی هادی، پارامتر مهمی است که در معادله زیر ارائه می‌شود:

$$r = \frac{F'}{nm'_s g} \quad (20)$$

و امتداد برآیند بارهای سازه‌ای بر روی هادی به صورت زیر می‌باشد:

$$\delta_1 = \arctan r \quad (21)$$

شکم استاتیکی معادل هادی در وسط فاصله به صورت زیر می‌باشد:

$$f_{es} = \frac{nm'_s gl^2}{8F_{st}} \quad (22)$$

دوره تناوب T نوسانات هادی عبارت است از:

$$T = 2\pi \sqrt{0.8 \frac{f_{es}}{g}} \quad (23)$$

این معادله برای نوسانات کوچک هادی و بدون عبور جریان در آن نیز بکار می‌رود. دوره تناوب T_{res} نوسانات هادی در مدت عبور جریان اتصال کوتاه عبارت است از:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2[1-\frac{\pi^2}{64}(\frac{\delta_1}{90^\circ})^2]}} \quad (24)$$

که δ_1 باید برحسب درجه ذکر شود. شاخص استحکام بصورت زیر می‌باشد:

$$N = \frac{1}{sl} + \frac{1}{nE_{eff}A_s} \quad (25)$$

یادآوری ۲- اگر مقدار دقیق S در معادله (۲۵) مشخص نباشد، می‌توان مقدار $S=100 \times 10^3$ N/m را برای هادی-های کشیده نشده که باعث اعمال نیروی خمشی بر روی مقره‌های اتکایی می‌شوند، استفاده نمود.

یادآوری ۳- اگر مقدار دقیق S برای اسپن‌هایی با هادی کشیده شده مشخص نباشد، یکی از مقادیر در محدوده‌های زیر استفاده می‌شود:

$$150 \times 10^3 \frac{N}{m} \text{ تا } 1300 \times 10^3 \frac{N}{m} \text{ ، در ولتاژ اسمی } 123 \text{ kV}$$

$$400 \times 10^3 \frac{N}{m} \text{ تا } 2000 \times 10^3 \frac{N}{m} \text{ ، در ولتاژ اسمی } 245 \text{ kV}$$

$$600 \times 10^3 \frac{N}{m} \text{ تا } 3000 \times 10^3 \frac{N}{m} \text{ ، در ولتاژ اسمی } 420 \text{ kV}$$

در معادله (۲۵) S عبارت است برآیند ثابت کشسانی هر دو نقطه ثابت. E_{eff} ، مدول یانگ حقیقی می‌باشد.

$$E_{eff} = \begin{cases} E \left[0.3 + 0.7 \sin \left(\frac{F_{st}}{nA_s \sigma_{fin}} 90 \right) \right] & \text{for } \frac{F_{st}}{nA_s} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{for } \frac{F_{st}}{nA_s} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad (26)$$

که در آن:

$$\sigma_{fin} = 50.10^6 \frac{N}{m^2} \quad (27)$$

پارامتر σ_{fin} ، عبارت است از حداقل مقدار تنش کابل، هنگامی که مدول ینگ مقدار ثابتی را دارا باشد، دارد. برای هادی‌های رشته‌ای مدول ینگ نهایی E ، باید استفاده شود. مدول تنش ζ هادی اصلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\zeta = \frac{(ngm'_s l)^2}{24F_{st}^3 N} \quad (28)$$

در مدت عبور جریان اتصال کوتاه، در پایان اسپین تحت زاویه زیر نسبت به حالت ثابت خود نوسان می‌نماید:

$$\delta_{end} = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{res}} \right) \right] & 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0.5 \\ 2\delta_1 & \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0.5 \end{cases} \quad (29)$$

زمانی که مدت زمان اولین جریان اتصال کوتاه T_{kl} که در زیر بند ۱۲-۱-۳ تعریف شده، مشخص باشد، حداکثر زاویه نوسان δ_{max} ممکن است از شکل ۶ استخراج و یا بصورت زیر محاسبه شود. در غیر اینصورت اگر T_{kl} بزرگتر از مقدار $0.4 T$ باشد، برای T_{kl} در معادلات (۲۹)، (۳۲) و (۳۵) مقدار $0.4 T$ در نظر گرفته می‌شود.

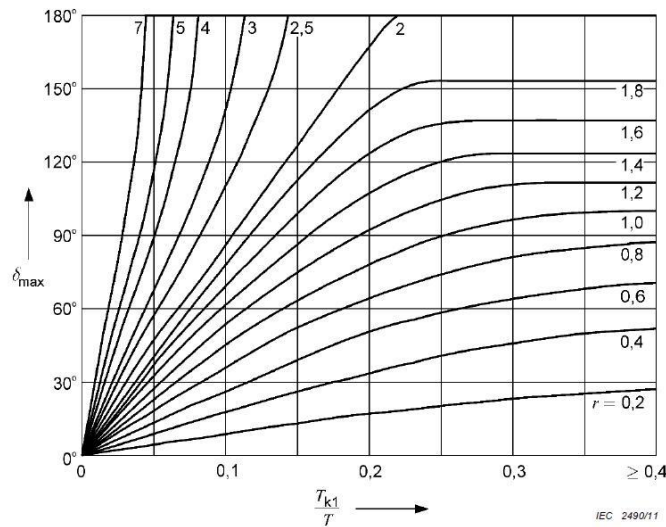
در مدت عبور جریان اتصال کوتاه و یا پس از آن، اسپینی که هادی آویز در وسط آن نصب نشده باشد، تحت حداکثر زاویه انحراف δ_{max} نوسان خواهد نمود که مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{end} & 0 \leq \delta_{end} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \delta_{end} > 90^\circ \end{cases} \quad (30)$$

و از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\delta_{max} = \begin{cases} 1.25 \arccos \chi & 0.766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & -0.985 \leq \chi \leq 0.766 \\ 180^\circ & \chi \leq -0.985 \end{cases} \quad (31)$$

یادآوری ۴- زاویه نوسان محاسبه شده δ_{max} حداکثر مقداری است که در بدترین حالت اتفاق می‌افتد، که در آن مدت زمان اتصال کوتاه برابر یا کمتر از مدت زمان اتصال کوتاه ذکر شده T_{k1} می‌باشد.



شکل ۶- حداکثر زاویه نوسان δ_{max} در حداکثر زمان اتصال کوتاه T_{k1}

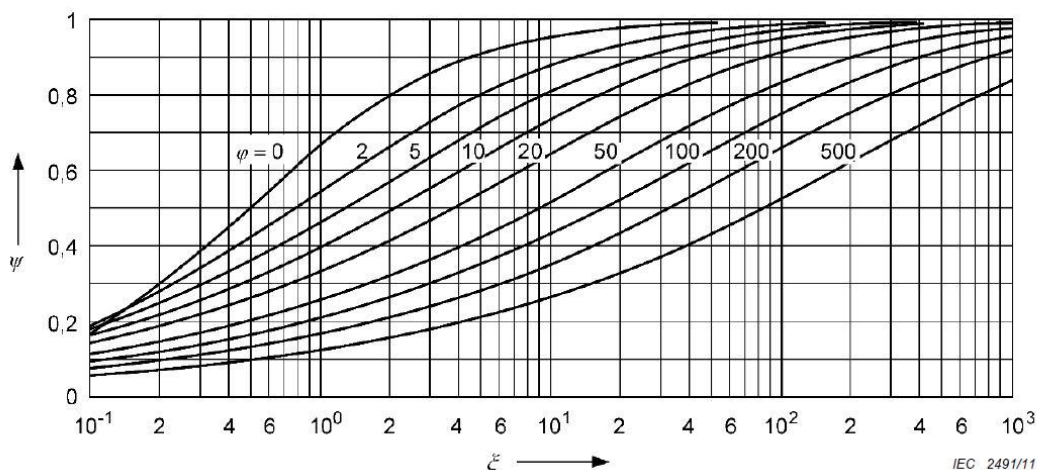
برای برنامه‌نویسی، به معادلات (۳۱) و (۱۹) تا (۳۰) مراجعه شود.

۶-۲-۳ نیروی کششی $F_{t,d}$ ناشی از نوسانات (نیروی کششی اتصال کوتاه) اسپن بدون هادی آویز در وسط آن در مدت اتصال کوتاه پارامتر نیروی φ از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\varphi = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2} - 1) & T_{k1} \geq T_{res}/4 \\ 3(r \sin \delta_{end} + \cos \delta_{end} - 1) & T_{k1} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (32)$$

مدول ψ بصورت تابعی از δ و φ و با استفاده از شکل ۷ تعیین می‌شود. نیروی کششی $F_{t,d}$ به صورت زیر می‌باشد:

$$F_{t,d} = F_{st}(1 + \varphi\psi) \quad (33)$$



یادآوری- در پیوست الف-۶ معادله منحنی بالا برای برنامه‌نویسی، ارائه شده است.

شکل ۷- مدول ψ برای نیروی کششی در هادی‌های انعطاف‌پذیر

۶-۲-۴ تغییرات دینامیکی شکم هادی ناشی از ازدیاد طول و تغییر شکل منحنی سیم هادی انبساط الاستیکی به صورت زیر می‌باشد:

$$\varepsilon_{ela} = N(F_{t,d} - F_{st}) \quad (34)$$

نیروی کششی اتصال کوتاه $F_{t,d}$ برای اسپن‌هایی که هادی آویز در وسط آن نمی‌باشد باید مطابق معادله (۳۳) محاسبه شود. در آرایش‌هایی که در وسط اسپن هادی آویز وجود دارد، زاویه نوسان حقیقی δ با استفاده از زیر بند ۵-۲-۶ تعیین می‌شود. برای این منظور، انبساط الاستیک برای اسپن‌هایی که در وسط آن هادی آویز وجود ندارد باید براساس $F_{t,d}$ بدست آمده از معادله (۳۳) محاسبه گردد. انبساط حرارتی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left(\frac{I_k''}{nA_s} \right)^2 T_{res}/4 & T_{k1} \geq T_{res}/4 \\ c_{th} \left(\frac{I_k''}{nA_s} \right)^2 T_{k1} & T_{k1} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (35)$$

برای c_{th} از مقادیر زیر استفاده شود:

برای هادی‌های آلومینیومی، آلیاژ آلومینیومی و آلومینیوم- فولادی که دارای نسبت سطح مقطع $Al/St > 6$ می‌باشند. $0.27 * 10^{-18} m^4/(A^2s)$

برای هادی‌های آلومینیوم- فولادی که دارای نسبت سطح مقطع $Al/St \leq 6$. $0.17 * 10^{-18} m^4/(A^2s)$

برای مس $0.088 * 10^{-18} m^4/(A^2s)$

در سیستم تک‌فاز دو خطه، عبارت I_k'' در معادله (۳۵) با I_{k2}'' جایگزین می‌شود. مدول افزایش شکم هادی را که ناشی از ازدیاد طول الاستیکی و انبساط حرارتی آن است، نشان می‌دهد. نحوه محاسبه آن به صورت زیر است:

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[\frac{1}{f_{es}} \right]^2 (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th})} \quad (36)$$

مدول C_F امکان افزایش شکم دینامیکی هادی ناشی از تغییر شکل منحنی مشخصه سیم را به صورت زیر تعیین می‌کند:

$$C_F = \begin{cases} 1.05 & r \leq 0.8 \\ 0.97 + 0.1r & 0.8 \leq r \leq 1.8 \\ 1.15 & r \geq 1.8 \end{cases} \quad (37)$$

شکم دینامیکی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_{ed} = C_F C_D f_{es} \quad (38)$$

۶-۲-۵ نیروی کششی $F_{t,d}$ ناشی از نوسانات (نیروی کششی اتصال کوتاه) با حضور هادی آویز در وسط اسپن در مدت اتصال کوتاه

حضور هادی آویز در وسط اسپن بر حرکت هادی اصلی تاثیرگذار است. تعداد کافی هادی‌های آویز کوتاه از نوسانات هادی اصلی جلوگیری می‌کنند بطوریکه حداکثر زاویه نوسان δ_{max} همان هادی اصلی در شرایط بدون هادی آویز بدست نخواهد آمد.

یادآوری ۱- در صورتی که نقطه اتصال بالایی هادی آویز از وسط هادی اصلی دور بوده ولی در بازه‌ای تا ۱۰٪ طول هادی اصلی نصب شده باشد، می‌توان از معادلات زیر استفاده نمود:

یادآوری ۲- به عنوان یک جایگزین برای معادلات زیر، امکان محاسبه آن بوسیله توضیحات زیر بند ۳-۲-۶ وجود دارد.

صفحه هادی آویز در شکل ۸ می‌تواند موازی یا عمود بر هادی اصلی باشد. زاویه نوسان حقیقی ناشی از محدودیت حرکت نوسانی که بوسیله هادی آویز ایجاد می‌شود به صورت زیر می‌باشد:

$$\delta = \begin{cases} \arccos \frac{(h + f_{es})^2 + f_{ed}^2 - (l_v^2 - w^2)}{2f_{ed}(h + f_{es})} & \text{صفحه موازی باشد} \\ \arccos \frac{(h + f_{es})^2 + f_{ed}^2 - (l_v^2 - w^2)}{2f_{ed} \sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2}} + \arccos \frac{h + f_{es}}{\sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2}} & \text{صفحه عمود باشد} \end{cases} \quad (39)$$

که در آن :

h, w ارتفاع و عرض هادی آویز براساس شکل ۸.

در حالتی که صفحه موازی است، اگر $l_v \geq \sqrt{(h + f_{es} + f_{ed})^2 + w^2}$ و در حالت صفحه عمود اگر $l_v \geq \sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2} + f_{ed}$ باشد، محاسبات بر مبنای زیر بند ۲-۲-۶ انجام می‌شود. در محاسبه پارامتر نیرو φ باید بین حالات زیر تمایز قائل گردد:

$$\delta \geq \delta_1$$

در این حالت نوسانات هادی اصلی، در محدوده $T_{res}/4$ ، و تحت تاثیر هادی آویز نمی‌باشد. در این صورت پارامتر نیرو φ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2}-1) & T_{k1} \geq T_{res}/4 \\ 3(r\sin\delta_{end} + \cos\delta_{end} - 1) & T_{k1} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (40)$$

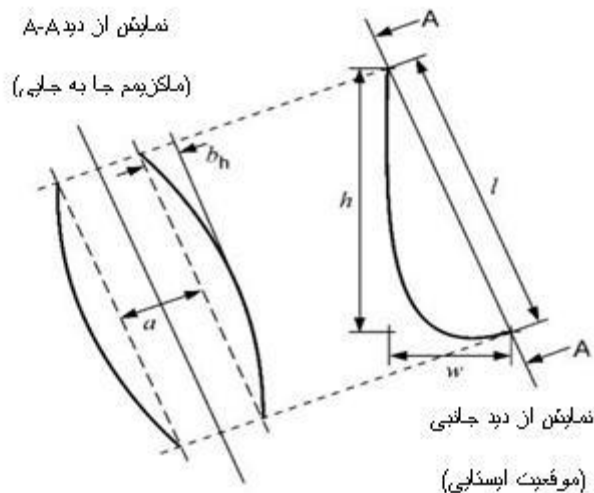
$$\delta < \delta_1$$

در این حالت نوسانات هادی اصلی، در محدوده $T_{res}/4$ ، تحت تاثیر هادی آویز می‌باشد. در این صورت پارامتر نیرو φ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi = \begin{cases} 3(r\sin\delta + \cos\delta - 1) & \delta_{end} \geq \delta \\ 3(r\sin\delta_{end} + \cos\delta_{end} - 1) & \delta_{end} < \delta \end{cases} \quad (41)$$

مدول ψ بصورت تابعی از δ ، φ و شکل γ می‌باشد. نیروی کششی اتصال کوتاه $F_{t,d}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{t,d} = F_{st}(1 + \varphi\psi) \quad (42)$$



شکل ۸- شکل هندسی هادی آویز

۶-۲-۶ نیروی کششی $F_{f,d}$ بعد از اتصال کوتاه ناشی از افتادگی هادی اصلی (نیروی سقوط^۱) در پایان اتصال کوتاه اسپن دارای نوسان بوده یا هادی به حالت اولیه خود بر می‌گردد. برای یک اسپن و در انتهای مسیر بازگشتش به حالت اولیه، تنها زمانی قابل توجه است که $\alpha > 0.6$ بوده و زاویه انحراف $\delta_{max} \geq 70^\circ$ یا در صورت وجود هادی آویز در وسط اسپن $\delta \geq 60^\circ$ باشد. در این حالت نیروی سقوط به صورت زیر می‌باشد:

$$F_{f,d} = 1.2F_{st} \sqrt{1 + 8\zeta \frac{\delta_{max}}{180^\circ}} \quad (43)$$

یادآوری- در اسپن‌های کوتاه، سختی خمشی اسپن باعث کاهش افتادن هادی می‌شود به بیان دیگر اگر طول اسپن تقریباً کمتر از ۱۰۰ برابر قطر تک هادی باشد، میزان افتادن محاسبه شده برای سیم خیلی زیاد می‌باشد.

۶-۲-۷ جابه‌جایی افقی اسپن b_h و حداقل فاصله هوایی a_{min} حداکثر جابه‌جایی افقی در وسط اسپن b_h ، ناشی از اتصال کوتاه برای اسپن‌هایی با هادی‌های کشیده نشده که به هادی آویز و تجهیزات متصل هستند، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} & \delta_{max} \geq 90^\circ \\ f_{ed} \sin \delta_{max} & \delta_{max} < 90^\circ \end{cases} \quad l_c = l \quad (44)$$

حداکثر جابه‌جایی افقی در وسط اسپن، b_h ، ناشی از اتصال کوتاه برای اسپن‌هایی که دارای هادی کشیده شده بوده و توسط مقره‌های کششی متصل شده‌اند، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \delta_{max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta_{max} & \delta_{max} < \delta_1 \end{cases} \quad l_c = l - 2l_i \quad (45)$$

δ_1 و δ_{max} مطابق با زیر بند ۲-۲-۶ و f_{ed} در زیر بند ۴-۲-۶ بیان شده است. حداکثر جابه‌جایی افقی در وسط اسپن، b_h ، برای اسپن‌هایی که دارای هادی کشیده شده بوده و توسط زنجیره کششی متصل شده‌اند و در وسط آن هادی آویز متصل است بستگی به طول هادی آویز دارد. که در زیر برای دو حالت محاسبه شده است:

$$\delta \geq \delta_{max}$$

در این حالت هادی آویز تأثیری در حرکت کابل نداشته و حداکثر جابه‌جایی افقی با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \delta_{max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta_{max} & \delta_{max} < \delta_1 \end{cases} \quad l_c = l - 2l_i \quad (46)$$

$$\delta < \delta_{max}$$

در این حالت هادی آویز در حرکت کابل تأثیر داشته و حداکثر جابه‌جایی افقی با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \delta_{max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta & \delta_{max} < \delta_1 \end{cases} \quad l_c = l - 2l_i \quad (47)$$

δ_1 ، f_{ed} و δ به ترتیب براساس زیر بندهای ۶-۲-۲، ۶-۲-۴ و ۶-۲-۵ تعیین می‌شوند. یادآوری - روش جایگزین برای معادلات (۴۶) و (۴۷)، انجام محاسبات با استفاده از معادله (۴۵) است. هادی‌هایی که در یک سطح قرار گرفته، بدلیل اتصال کوتاه و در بدترین حالت در نقطه وسط اسپن در دایره‌ای به شعاع b_h و حول خط ارتباط مستقیم بین دو نقطه مهار شده مجاور جابه‌جا می‌شوند. اسپن بین نقاط وسط دو هادی اصلی در مدت اتصال کوتاه دو فاز در بدترین حالت به صورت زیر می‌باشد:

$$a_{min} = a - 2b_h \quad (48)$$

۳-۶ اثرات بر هادی‌های اصلی عمودی (هادی‌های آویز)

هادی‌های آویز براساس این بند به عنوان اتصالات اصلی تلقی شده که به صورت عمودی قرار می‌گیرد و معمولاً بین تجهیزات و مقره‌هایی با ارتفاع متفاوت نصب می‌شوند. پیش شرط برای استفاده از این بند این

است که برآیند مدول کشسانی نقاط اتصال بالایی و پایینی اساساً کمتر از مقدار $S = 100 * 10^3 N/m$ که در بند ۲-۲-۶ پیشنهاد شده، نباشد.

در آرایش باندل، علاوه بر موارد بالا، بند ۴-۶ نیز باید در نظر گرفته شود.

برخلاف محاسبات مربوط به هادی‌های افقی ارائه شده در بند ۲-۶، دامنه حداکثر نیروی اتصال کوتاه در نقطه اتصال پایینی و میزان انحراف کابل بستگی به جرم کابل، کشش ایستایی کابل و مدت اتصال کوتاه ندارد. رفتار کابل در مدت اتصال کوتاه، تنها به وضعیت هندسی کابل شامل عرض و ارتفاع اتصال، همچنین طول کابل l_V مرتبط می‌باشد.

نیروی خمشی در نقطه ثابت پایینی علاوه بر شرایط هندسی به جریان اتصال کوتاه و فاصله بین مراکز هادی‌ها نیز وابسته بوده و برای کابل‌هایی که طول آنها در محدوده $1.4w \leq l_V \leq 3.3w$ باشد، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$F_{t,a} = \frac{5}{3} l_V \frac{\mu_0 (I_K'')^2 l_V}{2\pi a w} \quad (49)$$

با توجه به ابعاد موجود در شکل ۸.

که در آن:

l_V	طول کابل؛
a	فاصله مرکز به مرکز هادی‌ها؛
w	عرض آویز.

جابه‌جایی تنها به شرایط هندسی وابسته است و برای هادی با طول $l_V \leq 2l$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$b_h = [0.60 \sqrt{\frac{l_V}{l} - 1} + 0.44 \left(\frac{l_V}{l} - 1\right) - 0.32 \ln \frac{l_V}{l}] \frac{l^2}{l_V} \quad (50)$$

که در آن l عبارت است از فاصله مستقیم بین نقاط اتصال مطابق با آنچه در شکل ۸ نشان داده شده است.

۴-۶ اثرات بر روی هادی‌های باندل

۱-۴-۶ پارامتر و ابعاد مشخصه

موارد زیر برای آرایش معمول باندل در نظر گرفته می‌شود که در آن نقاط میانی هادی‌های فرعی بر روی دایره‌ای با فواصل مساوی a_s بین هادی‌های فرعی مجاور قرار داده شده است.

در تعداد بیشتر از برای l باندل متقارن

برای آرایش‌های باندلی منظم، دارای حداکثر چهار عدد هادی فرعی، نیروی کششی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{pi,d} = 1.1F_{t,d} \quad (51)$$

اگر فاصله بین هادی‌های فرعی و آرایش جداکننده‌ها بطوری باشد که هادی‌های فرعی موجود در باندل در مدت اتصال کوتاه به طور موثری با یکدیگر برخورد کنند آنگاه $F_{t,d}$ مطابق بند ۲-۶ محاسبه می‌شود. هادی‌های فرعی زمانی به طور موثر با یکدیگر برخورد دارند که فاصله a_s بین نقاط میانی هادی‌های فرعی مجاور و همچنین فاصله l_s بین دو جدا کننده مجاور، شرایط معادلات (۲۵) یا (۲۶) را دارا باشند.

$$\frac{a_s}{d} \leq 2.0 \quad \text{و} \quad l_s \geq 50a_s \quad (52)$$

$$\frac{a_s}{d} \leq 2.5 \quad \text{و} \quad l_s \geq 70a_s \quad (53)$$

در صورتی که آرایش باندلی منظم با شرایط اشاره شده فوق را دارا نباشد، معادلات زیر برای محاسبه $F_{pi,d}$ استفاده می‌شود. نیروی جریان اتصال کوتاه در معادله زیر ارائه شده است:

$$F_v = (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_K''}{n}\right)^2 \frac{l_s v_2}{a_s v_3} \quad (54)$$

در سامانه‌های تک فاز جریان متناوب عبارت I_K'' بکار رفته در معادله‌های (۵۴)، (۵۵)، (۶۰) و (۶۳) باید با I_{K2}'' جایگزین شوند. اگر جریان اولیه اتصال کوتاه خط به زمین I_{K1}'' بیشتر از جریان اولیه اتصال کوتاه سه فاز متقارن I_K'' باشد، عبارت اخیر باید با I_{K1}'' در معادله‌های (۵۴)، (۵۵)، (۶۰) و (۶۳) جایگزین شود. مدول v_2 ارائه شده در شکل ۹، به عنوان تابعی از:

$$v_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d)m'_s}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_K''}{n}\right)^2 \frac{n-1}{a_s}}} \quad (55)$$

و در آن f بسامد سامانه می‌باشد. مدول v_3 نیز در شکل ۱۰ ارائه شده است. فاکتورهای کششی که هم کنش باندلی را توصیف می‌کند که باید به صورت زیر محاسبه شود:

$$\varepsilon_{st} = 1.5 \frac{F_{st} l_s^2 N}{(a_s - d)^2} \left(\sin \frac{180^\circ}{n}\right)^2 \quad (56)$$

$$\varepsilon_{pi} = 0.375 \frac{F_v l_s^2 N}{(a_s - d)^3} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (57)$$

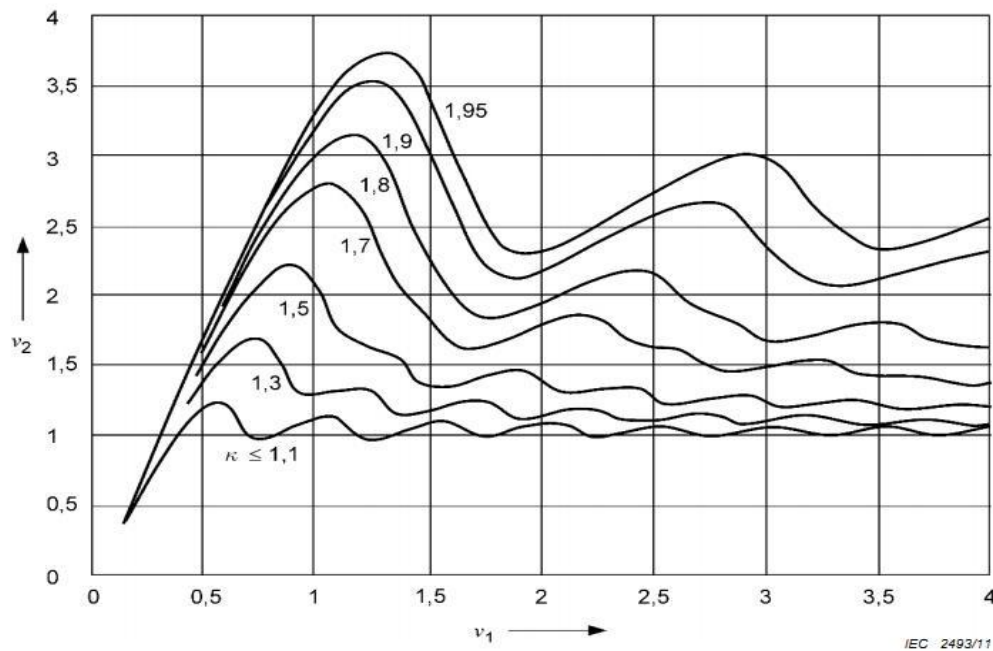
پارامتر j عبارت است از:

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} \quad (58)$$

که آرایش باندل را در مدت عبور جریان اتصال کوتاه به شرح زیر تعیین می کند:

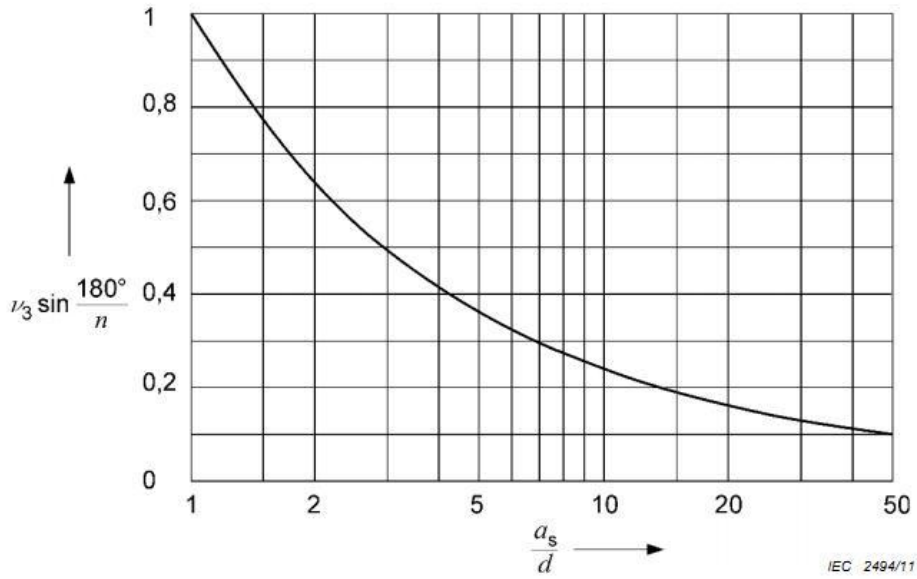
$j \geq 1$ هادی های فرعی با یکدیگر برخورد داشته و نیروی کششی $F_{pi,d}$ از زیر بند ۶-۴-۲ محاسبه می شود.

$j < 1$ فاصله هادی های فرعی کاهش یافته ولی برخوردی ندارند. نیروی کششی $F_{pi,d}$ با توجه به زیر بند ۶-۴-۳ محاسبه می شود.



یادآوری - در پیوست الف-۷ معادله منحنی بالا برای برنامه نویسی، ارائه شده است.

شکل ۹- v_2 به عنوان تابعی از v_1



یادآوری - در پیوست الف-۸ معادله منحنی بالا برای برنامه‌نویسی، ارائه شده است.

شکل ۱۰- $\frac{1}{3} \sin \frac{180^\circ}{n} \times v_3$ به عنوان تابعی از $\frac{a_s}{d}$

۶-۴-۲ نیروی کششی $F_{pi,d}$ در حالت برخورد هادی‌های فرعی

اگر $j \geq 1$ باشد، نیروی کششی $F_{pi,d}$ ، از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$F_{pi,d} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \xi \right) \quad (59)$$

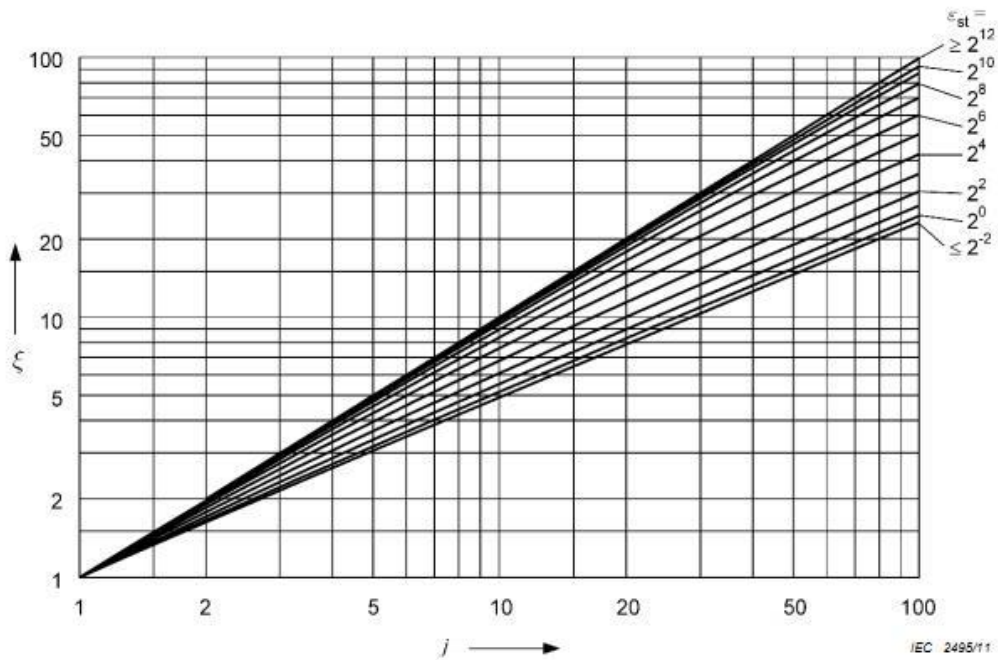
ξ در شکل ۱۱ مشخص شده است.

v_e به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_K''}{n} \right)^2 N v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{(\sin \frac{180^\circ}{n})^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (60)$$

با این فرض که:

$$v_4 = \frac{a_s - d}{d} \quad (61)$$



یادآوری- در پیوست الف-۹ معادله منحنی بالا برای برنامه‌نویسی، ارائه شده است.

شکل ۱۱- ξ به عنوان تابعی از ε_{st}

۳-۴-۶ نیروی کششی $F_{pi,d}$ در حالت عدم برخورد هادی‌های فرعی

اگر $j < 1$ باشد، نیروی کششی $F_{pi,d}$ ، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$F_{pi,d} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \eta^2 \right) \quad (۶۲)$$

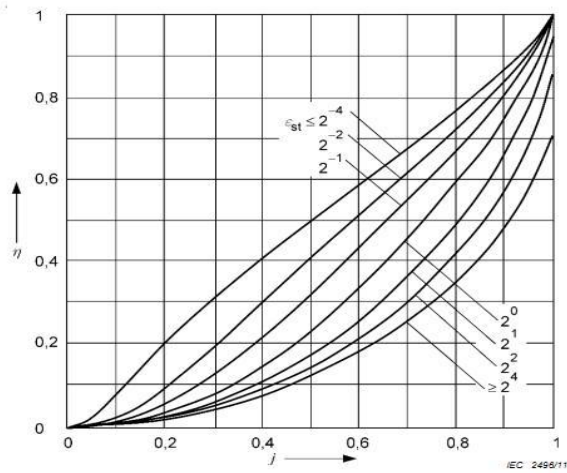
η با استفاده از یکی از خطوط شکل ۱۲ با توجه به پارامتر a_s/d تعیین می‌شود.

v_e به صورت زیر تعریف می‌شود:

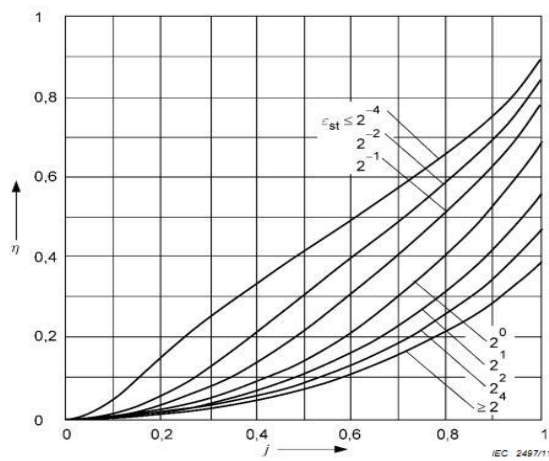
$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_K''}{n} \right)^2 N v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{(\sin \frac{180^\circ}{n})^4}{\eta^4} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۶۳)$$

که در آن:

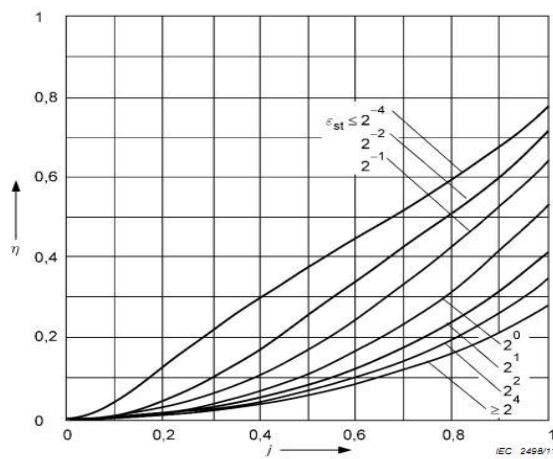
$$v_4 = \eta \frac{a_s - d}{a_s - \eta(a_s - d)} \quad (۶۴)$$



شکل ۱۲ الف - $2.5 < a_s/d \leq 0.5$



شکل ۱۲ ب - $5.0 < a_s/d \leq 10.0$



شکل ۱۲ ج - $10.0 < a_s/d \leq 15.0$

یادآوری - در پیوست الف-۱۰ معادله منحنی بالا برای برنامه‌نویسی، ارائه شده است.

شکل ۱۲-η به عنوان تابعی از ε_{st} و j

۵-۶ نیروهای بارهای سازه ناشی از هادی‌های انعطاف‌پذیر

۱-۵-۶ بارگذاری طراحی شده برای مقره‌های اتکایی، نگهدارنده‌ها و اتصال‌دهنده‌های مربوطه حداکثر مقدار نیروی $F_{f,d}$ ، $F_{t,d}$ یا $F_{pi,d}$ برای هادی انعطاف‌پذیر نباید از مقدار استحکام اسمی ارائه شده توسط سازنده نگهدارنده‌ها و مقره‌ها بیشتر باشد. برای مقره تحت تنش ناشی از نیروی خمش، مقدار استحکام اسمی، به عنوان نیروی اعمالی در نوک مقره داده می‌شود.

یادآوری ۱- برای نیرویی که در نقطه‌ای بالاتر از نوک مقره اعمال می‌شود، باید از عددی کمتر از مقدار استحکام اسمی استفاده شود که این مقدار براساس استحکام ممان خمشی در سطح مقطع بحرانی مقره می‌باشد. اتصال‌دهنده‌های مورد استفاده برای هادی‌های انعطاف‌پذیر باید براساس حداکثر مقدار $1.0F_{f,d}$ ، $1.5F_{t,d}$ یا $1.0F_{pi,d}$ رده‌بندی شود.

یادآوری ۲- مدول $1/5$ به این دلیل در نظر گرفته شده که انرژی نوسانات توسط جرم مقره‌ها جذب می‌شود.

۲-۵-۶ نیروی طراحی برای سازه‌ها، مقره‌ها و اتصال‌دهنده‌ها با نیروی کششی انتقال داده شده بوسیله زنجیره مقره

حداکثر مقدار نیروی $F_{f,d}$ ، $F_{t,d}$ یا $F_{pi,d}$ برای اسپن‌هایی با هادی‌های انعطاف‌پذیر باید به عنوان نیروی ایستایی اعمالی برای سازه‌ها، مقره‌ها و اتصال‌دهنده‌ها بکار برده شود.

یادآوری ۱- در طراحی سازه‌های سه‌فاز برای اتصال کوتاه سه فاز یادآوری می‌شود که حداکثر مقدار $F_{f,d}$ یا $F_{t,d}$ در دو فاز ظاهر شده و فاز سوم تنها دارای کشش ایستایی می‌باشد.

یادآوری ۲- در طراحی سازه‌های سه‌فاز برای اتصال کوتاه سه فاز مقادیر متفاوتی برای حداکثر $F_{pi,d}$ در هر سه فاز و در زمان‌های مختلف می‌تواند ایجاد شوند. این اثر تقریباً با اعمال مقدار محاسبه شده $F_{pi,d}$ برای دو فاز سازه دیده می‌شود.

۳-۵-۶ بارگذاری طراحی شده فونداسیون‌ها

برای طراحی فونداسیون‌ها و متناسب با نوع آرایش از زیر بندهای ۱-۵-۶ و ۲-۵-۶ استفاده می‌شود. یادآوری- بدلیل اینرسی و مشخصه دینامیکی اتصال کوتاه، نیازی به در نظر گرفتن اثرات ناپایداری در مرحله طراحی تک پایه‌های یکپارچه نمی‌باشد (پایه‌های یک تکه). در این حالت می‌توان فرض کرد در صورتی که طراحی براساس نیروهای سایر حالات و نیروهایی مانند نیروی کششی ایستایی یا نیروی باد صورت پذیرد، پایداری تامین می‌شود.

۷ اثرات حرارتی بر روی هادی‌های بدون روکش

۱-۷ کلیات

گرم شدن هادی‌ها در اثر جریان اتصال کوتاه در برگیرنده چندین پدیده با مشخصه غیرخطی می‌شود و از بقیه عوامل یا صرف‌نظر شده یا به منظور دستیابی به یک تقریب ریاضی ممکن، تخمین زده می‌شوند. در این بند فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

- اثر پوستی (اثر مغناطیسی هادی بر خود) و اثر هم‌جواری (اثر مغناطیسی در مجاورت هادی‌های موازی) نادیده گرفته می‌شوند.

- مشخصه دما-مقاومت بصورت خطی فرض شود.

- گرمای ویژه هادی ثابت در نظر گرفته شود.

- گرمایش بصورت بی‌دررو (بدون انتقال گرما) در نظر گرفته شود.

وقتی عبور جریان اتصال کوتاه به صورت مکرر و در فاصله‌های زمانی کوتاه اتفاق می‌افتد (برای مثال وصل مجدد خودکار سریع) سرد شدن هادی در آن زمان‌های مرده کوتاه اهمیت نسبتاً کمی داشته و هنوز می‌تواند گرمایش را بصورت بی‌دررو در نظر گرفت. هنگامی که زمان مرده مذکور دارای مدت طولانی‌تری باشد (برای مثال وصل مجدد خودکار تاخیری) تلفات حرارتی نیز باید در نظر گرفته شود.

در محاسبات، اثرات پوستی و یا اثر هم‌جواری در نظر گرفته نشده است. این یعنی جریان به طور یکنواخت در تمام سطح مقطع هادی توزیع شده است. برای سطح مقطع‌های بزرگتر از ۶۰۰ میلی‌متر مربع اثر پوستی نیز باید در نظر گرفته شود. برای این‌گونه محاسبات، مرجع باید در متن ذکر شود.

یادآوری- اگر هادی اصلی متشکل از هادی‌های فرعی باشد، توزیع نامساوی جریان در بین هادی‌های فرعی بر افزایش دما در هادی‌های فرعی تاثیر می‌گذارد.

۲-۷ محاسبه جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی

جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی باید بر اساس استاندارد ایران-آی‌ای‌سی ۰-۶۰۹۰۹، با استفاده از مقدار موثر جریان اتصال کوتاه و ضرایب مرتبط با اثرات حرارتی وابسته به زمان بخش‌های A.C و D.C جریان اتصال کوتاه محاسبه شود. اگر بوسیله وصل مجدد خودکار تعدادی اتصال کوتاه اتفاق بیفتد، جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی نیز باید محاسبه شود.

برای محاسبه جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی I_{th} در یک سامانه سه فاز، معمولاً اتصال کوتاه سه فاز متعادل تعیین کننده است. در سامانه‌های تک فاز جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی باید بر اساس استاندارد ایران-آی‌ای‌سی ۰-۶۰۹۰۹ به روش مشابه با قبل محاسبه شود.

برای تجهیزات محدود کننده جریان، جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی I_{th} و مدت زمان جریان اتصال کوتاه T_K توسط سازنده ارائه می‌شود.

۳-۷ محاسبه افزایش دما و چگالی جریان قابل تحمل کوتاه مدت اسمی برای هادی‌ها

افزایش دما ناشی از عبور اتصال کوتاه در هادی، تابعی از مدت زمان جریان اتصال کوتاه، جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی و جنس هادی می‌باشد.

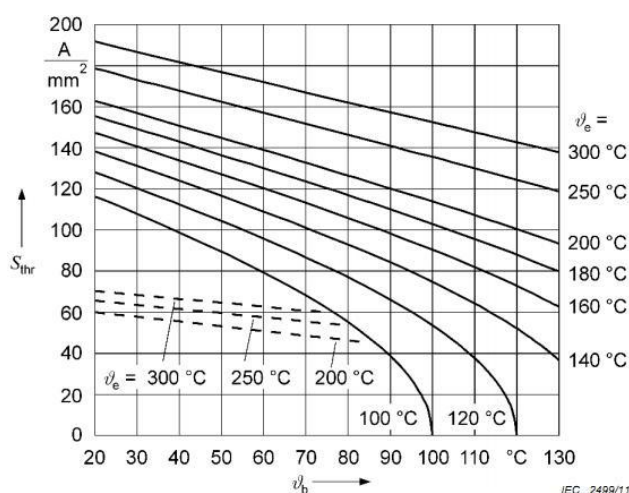
با استفاده از نمودارهای شکل ۱۳، امکان محاسبه افزایش دمای هادی در صورت معلوم بودن چگالی جریان قابل تحمل کوتاه مدت اسمی و/یا بالعکس وجود دارد.

بالاترین دماهای پیشنهاد شده در مدت اتصال کوتاه برای هادی‌های مختلف در جدول ۶ ارائه شده است. در صورت رسیدن به این دماها کاهش ناچیزی در استقامت مکانیکی بوجود می‌آید که بطور تجربی برای امنیت

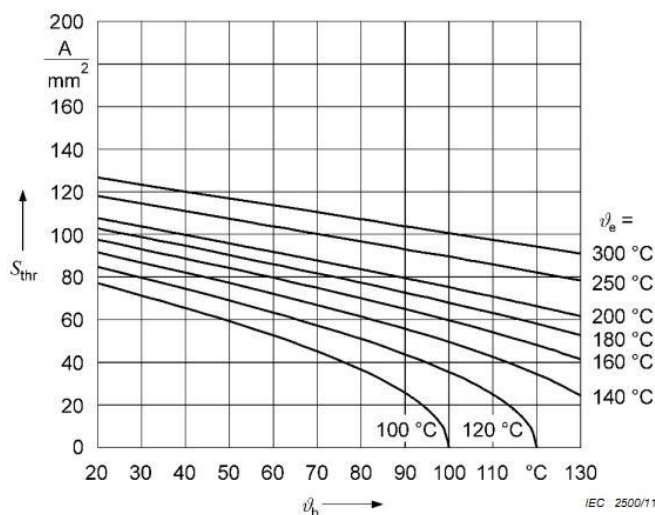
عملکرد سیستم خطری ایجاد نمی‌کند. همچنین ضروری است که حداکثر دمای مجاز نگهدارنده‌ها در نظر گرفته شود.

جدول ۶- بالاترین دمای پیشنهاد شده برای هادی تحت تنش‌های مکانیکی در طول مدت اتصال کوتاه

نوع هادی	حداکثر دمای پیشنهاد شده هادی در طول مدت اتصال کوتاه بر حسب °C
هادی‌های بدون پوشش، صلب یا رشته‌ای: مس، آلومینیوم یا آلیاژ آلومینیوم	۲۰۰
هادی‌های بدون پوشش، صلب یا رشته‌ای: فولاد	۳۰۰



شکل ۱۳ الف - خطوط پر: مس، خطوط نقطه چین: فولاد آلیاژی کم



شکل ۱۳ ب - آلومینیوم، آلیاژی از آلومینیوم، هادی آلومینیوم با مغزی فولاد (ASCR)

یادآوری - در پیوست الف - ۱۱ معادله منحنی بالا برای برنامه نویسی، ارائه شده است.

شکل ۱۳ - رابط بین چگالی جریان قابل تحمل کوتاه مدت اسمی ($T_{kr} = 1 s$) و دمای هادی

۴-۷ محاسبه استقامت حرارتی کوتاه مدت برای مدت زمان های مختلف اتصال کوتاه

تا هنگامی که روابط زیر برای چگالی جریان اتصال کوتاه معادل حرارتی S_{th} برای تمام مقادیر T_k صادق باشد، هادی های بدون روکش دارای استقامت حرارتی کافی برای جریان اتصال کوتاه می باشند.

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{Kr}}{T_K}} \quad (۶۵)$$

مقدار اسمی چگالی جریان قابل تحمل کوتاه مدت اسمی S_{thr} برای $T_{kr} = 1 s$ در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

هنگام محاسبه سطح مقطع مناسب برای برآورد چگالی جریان نباید هسته فولادی مربوط به هادی آلومینیومی تقویت شده با فولاد (ACSR)، در نظر گرفته شود. هنگامی که تعدادی اتصال کوتاه با فاصله زمانی کوتاه بین آنها رخ دهد، مجموع مدت زمان اتصال کوتاه به شرح زیر می‌باشد:

$$T_K = \sum_{i=1}^n T_{Ki} \quad (۶۶)$$

پیوست الف

(اطلاعاتی)

معادلاتی مربوط به محاسبه نمودارها

الف-۱ نمادها

علاوه بر بند ۲-۳ نمادهای زیر نیز استفاده می‌شود:

M	فاصله موثر بین هادی‌های فرعی در یک بانند	a_{sw}
J/(Kg k)	ظرفیت حرارتی ویژه	c
1	مدول سختی قطعات اتصال	c_c
1	مدولی برای توصیف نزدیکی هادی‌های فرعی در بانند	f_n
S	زمان آغاز اتصال کوتاه تا زمان رسیدن به $F_{pi,d}$	T_{pi}
m	فاصله بین هادی‌ها در بانندهایی که احتمال برخورد در مدت اتصال کوتاه برای آنها وجود ندارد.	y_a
1/K	مدول دما	a_{20}
1	مدول تاثیر جرم قطعات اتصال بر روی بسامد طبیعی مرتبط	ξ_m
1/(Ωm)	هدایت ویژه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس	k_{20}
Kg/m ³	جرم ویژه	ρ

الف-۲ محاسبات مربوط به شکل ۱

مدول k_{1s} از معادله زیر بدست آمده است:

$$k_{1s} = \left\{ - \left(\frac{a_{1s}/c_s + 1}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{[(a_{1s}/c_s + 1)^2 + (b_s/c_s)^2]}{[(a_{1s}/c_s + 1)]^2} + 2 \left(\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2}{(a_{1s}/c_s)^2} - \right. \\ \left. \left(\frac{a_{1s}/c_s - 1}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{[(a_{1s}/c_s - 1)^2 + (b_s/c_s)^2]}{[(a_{1s}/c_s - 1)]^2} + \right. \\ \left. 3 \left[\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \ln \frac{[(a_{1s}/c_s + 1)^2 + (b_s/c_s)^2]}{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2} + \frac{1}{b_s/c_s} \ln \frac{[(a_{1s}/c_s + 1)^2 + (b_s/c_s)^2]}{[(a_{1s}/c_s - 1)^2 + (b_s/c_s)^2]} - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \ln \frac{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s - 1)^2 + (b_s/c_s)^2]} \right] + \right. \\ \left. 6 \left[\left(\frac{a_{1s}/c_s + 1}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{(a_{1s}/c_s + 1)} - 2 \left(\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{a_{1s}/c_s} + \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{a_{1s}/c_s - 1}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{(a_{1s}/c_s - 1)} \right] + 2 \left[\arctan \frac{(a_{1s}/c_s + 1)}{b_s/c_s} - 2 \arctan \frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} + \right. \right. \\ \left. \left. \arctan \frac{(a_{1s}/c_s - 1)}{b_s/c_s} \right] \right\} \frac{a_{1s}/c_s \cdot b_s/c_s}{6}$$

الف-۳ محاسبات مربوط به شکل ۳

مدول e با در نظر گرفتن پارامترهای مندرج در جدول الف-۱ از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$e = \frac{c_c}{\sqrt{1 + \xi_m \frac{mz}{nm_s l}}}$$

جدول الف ۱- پارامترهای مربوطه برای تعیین مدول

c_c		ξ_m	l_s/l	k
شکل ۳-ج	شکل ۳-ب			
۱	۱	۰	-	۰
۱	۱	۲/۵	۰/۵	۱
۱	۱/۴۸	۳	۰/۳۳	۲
۱	۱/۷۵	۱/۵	۰/۵	۲
۱	۱/۷۵	۴	۰/۲۵	۳
۱	۲/۱۴	۵	۰/۲	۴
۱	۲/۴۶	۶	۰/۱۷	۵
۱	۲/۷۷	۷	۰/۱۴	۶

الف-۴ محاسبات مربوط به شکل ۴

مدول V_F به صورت زیر تعیین می شود:

مدول V_F		f_{cm}/f
اتصال کوتاه دو فاز	اتصال کوتاه سه فاز	
$0.232 + 3.52e^{-1.45\kappa} + 0.166\lg(f_{cm}/f)$ الف		< ۰/۰۴
حداکثر مقدار V_{F1} یا V_{F2} $V_{F1} = 0.839 + 3.52e^{-1.45\kappa} + 0.6\lg(f_{cm}/f)$ الف $V_{F2} = 2.38 + 6\lg(f_{cm}/f)$...۰/۰۴ ۰/۸
۱/۸		...۰/۸ ۱/۲
۱/۸	$1.23 + 7.2\lg(f_{cm}/f)$...۱/۲ ۱/۶
۱/۸	۲/۷	...۱/۶ ۲/۴
۱/۸	$8.59 - 15.5\lg(f_{cm}/f)$...۲/۴ ۲/۷۴
$8.59 - 15.5\lg(f_{cm}/f)$...۲/۷۴ ۳/۰
$1.50 - 0.646\lg(f_{cm}/f)$...۳/۰ ۶/۰
۱		> ۶/۰

الف اگر $\kappa < 1.6$ باشد سپس $\kappa = 1.6$ باید در نظر گرفته شود.

مدول $V_{\sigma m}$ به صورت زیر تعیین می شود:

مدول $V_{\sigma m}$	f_{cm}/f
$0.0929 + 4.49e^{-1.68\kappa} + 0.066\lg(f_{cm}/f)$ الف	< 0.04
حداقل مقدار $V_{\sigma 1}$ یا $V_{\sigma 2}$ $V_{\sigma 1} = 0.756 + 4.49e^{-1.68\kappa} + 0.54\lg(f_{cm}/f)$ الف $V_{\sigma 2} = 1$	$0.04 \dots 0.8$
۱	> 0.8
الف اگر $\kappa < 1.6$ باشد سپس باید $\kappa = 1.6$ لحاظ شود.	

در حالت $V_{\sigma s}$ ، معادلاتی مشابه با $V_{\sigma m}$ باید استفاده شود، اما f_{cm}/f باید با f_{cs}/f جایگزین شود.
الف-۵ محاسبات مربوط به شکل ۵
مدول V_{rm} و V_{rs} به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$V_{rm} = \begin{cases} 1.8 & f_{cm}/f \leq 0.05 \\ 1.0 - 0.615 \lg\left(f_{cm}/f\right) & 0.05 < f_{cm}/f \leq 1 \\ 1 & f_{cm}/f \geq 1 \end{cases}$$

$$V_{rm} = \begin{cases} 1.8 & f_{cs}/f \leq 0.05 \\ 1.0 - 0.615 \lg\left(f_{cs}/f\right) & 0.05 < f_{cs}/f \leq 1 \\ 1 & f_{cs}/f \geq 1 \end{cases}$$

الف-۶ محاسبات مربوط به شکل ۶

مدول ψ به صورت تابعی از ζ و φ می‌باشد. این مدول از پاسخ‌های حقیقی معادله زیر تعیین می‌شود:
 $\varphi^2 \psi^3 + \varphi(2 + \zeta)\psi^2 + (1 + 2\zeta)\psi - \zeta(2 + \varphi) = 0$

با $0 < \psi \leq 1$

الف-۷ محاسبات مربوط به شکل ۹

مدول v_2 به صورت زیر می‌باشد:

$$v_2 = 1 - \frac{\sin(4\pi f T_{pi} - 2\gamma) + \sin 2\gamma}{4\pi f T_{pi}} + \frac{f\tau}{f T_{pi}} \left(1 - e^{-\frac{2f T_{pi}}{f\tau}}\right) \sin^2 \gamma$$

$$- \frac{8\pi f \tau \sin \gamma}{1 + (2\pi f \tau)^2} \left\{ \left(2\pi f \tau \frac{\cos(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} + \frac{\sin(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}}\right) e^{-\frac{f T_{pi}}{f\tau}} \right.$$

$$\left. + \frac{\sin \gamma - 2\pi f \tau \cos \gamma}{2\pi f T_{pi}} \right\}$$

که τ ثابت زمانی شبکه است و براساس استاندارد ISIRI 60909-0 محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2\pi f}{3} \ln \frac{\kappa - 1.02}{0.98} \quad \text{که } \kappa \geq 1.1 \quad \text{و} \quad \gamma = \arctan(2\pi f \tau)$$

اگر $\kappa < 1.1$ سپس $\kappa = 1.1$ باید استفاده شود.

$f T_{pi}$ ، پاسخ معادله زیر است:

$$v_1 = f T_{pi} \sqrt{v_2}$$

الف-۸ محاسبات مربوط به شکل ۱۰

مدول v_3 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$v_3 = \frac{d/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n} \arctan \sqrt{(a_s/d) - 1}} \sqrt{(a_s/d) - 1}$$

الف-۹ محاسبات مربوط به شکل ۱۱

پاسخ حقیقی معادله زیر می‌باشد:

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \xi^2 - j^2(1 + \varepsilon_{st}) = 0$$

که در آن $z \leq \xi \leq z^{2/3}$

الف-۱۰ محاسبات مربوط به شکل ۱۲

تابع η در شکل ۱۲ را می‌توان به صورت عددی و با معادله مکعب با ضرایب غیر خطی محاسبه نمود:

$$\eta^3 + \varepsilon_{st} \eta^2 - j^2(1 + \varepsilon_{st}) f_\eta = 0$$

که $0 < \eta < 1$ و

$$f_\eta = \frac{v_3}{a_{sw}/a_s}$$

$$a_{sw}/a_s = \frac{2y_a/a_s \sqrt{\frac{1-2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}}{\sin \frac{180^\circ}{n} \arctan \sqrt{\frac{1-2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}}$$

$$2y_a/a_s = 1 - \eta(1 - d/a_s)$$

الف-۱۱ محاسبات مربوط به شکل ۱۳

مقدار اسمی چگالی جریان قابل تحمل اتصال کوتاه S_{thr} به صورت زیر می‌باشد:

$$S_{thr} = \frac{1}{\sqrt{T_{kr}}} \sqrt{\frac{\kappa_{20} c \rho}{a_{20}} \ln \frac{1 + a_{20}(\vartheta_e - 20^{\circ}C)}{1 + a_{20}(\vartheta_b - 20^{\circ}C)}}$$

که برای هر کدام از موارد زیر داده‌های مربوطه استفاده می‌شود.

نماد	یکای SI	مس	آلیاژ آلومینیوم، هادی آلومینیوم تقویت شده با فولاد	فولاد
c	J(kg k)	۳۹۰	۹۱۰	۴۸۰
ρ	Kg/m ³	۸۹۰۰	۲۷۰۰	۷۸۵۰
κ_{20}	1/(Ω m)	۵۶×۱۰^{-۶}	$۳۴/۸ \times ۱۰^{-۶}$	$۷/۲۵ \times ۱۰^{-۶}$
a_{20}	1/k	$۰/۰۰۳۹$	$۰/۰۰۴$	$۰/۰۰۴۵$

در صورت استفاده از دماهای مبنا دیگر به جز ۲۰ درجه سلسیوس، معادله S_{thr} باید تغییر کند.

کتابنامه

- [1] IEC 61935-1, Power installations exceeding 1 kV a.c. - part 1: Common rules.
- [2] CIGRE, The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Rigid and felexible conductors). Vol. 105. Paris: CIGRE SC 23, WG11, 1996.
- [3] CIGRE, The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (partII). Vol. 214. Paris: CIGRE SC 23, WG 03, 2002.