

**مشخصات فنی عمومی و اجرایی**  
**پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال**  
**هادی‌های خطوط انتقال نیرو (جلد دوم)**  
نشریه شماره ۲-۴۲۷

وزارت نیرو - شرکت توانیر  
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت برق  
[www.tavanir.org.ir](http://www.tavanir.org.ir)

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس 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  
هادی های خطوط انتقال نیرو  
نشریه شماره ۲-۴۲۷**

وزارت نیرو - شرکت توانیر  
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت برق  
[www.tavanir.ir](http://www.tavanir.ir)

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





بسمه تعالی

ریاست جمهوری  
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی

شماره:	۱۰۰/۲۱۱۱۳
تاریخ:	۱۳۸۷/۳/۷

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران

موضوع:

مشخصات فنی عمومی و اجرایی خطوط فوق توزیع و انتقال - هادی‌های خطوط انتقال نیرو (جلد اول) و (جلد دوم)

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 ۴۲۷ دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، در دو مجلد با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی خطوط فوق توزیع و انتقال - هادی‌های خطوط انتقال نیرو (جلد اول) و (جلد دوم)» 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.

امیرمنصور 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 رییس جمهور (معاونت نظارت راهبردی - دفتر نظام فنی اجرایی) با همکاری وزارت نیرو - شرکت توانیر در قالب طرح «ضوابط و معیارهای فنی صنعت برق» اقدام به تهیه مجموعه کاملی از استانداردهای مورد لزوم نموده است.

نشریه حاضر با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - مشخصات فنی عمومی و اجرایی هادیهای خطوط انتقال نیرو- جلد دوم» می باشد که در شش فصل مشتمل بر کلیات و تعاریف انواع هادی‌های خطوط انتقال نیرو، تنوع زدایی از هادی‌ها، الزامات و آزمون‌ها و بازرسی‌ها و تعمیرات در دوره بهره برداری ارایه شده است.

معاونت امور فنی 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 - هادی های

خطوط انتقال نیرو - نشریه شماره ۲-۴۲۷

### تهیه کننده

این مجموعه به وسیله شرکت مهندسين مشاور نیرو با همکاری آقایان مهندسین حامد نفیسی، حسین جلالی فراهانی، دکتر عارف درودی و دکتر سید حسین حسینیان تهیه و تدوین شده است و توسط آقای اسماعیل زارعی مورد ویراستاری قرار گرفته است.

### کمیته فنی

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

وزارت نیرو - سازمان توانیر - مجری طرح	آقای مهندس جمال بیاتی
معاونت بهره برداری سازمان توانیر	آقای مهندس حسین آخوندی
شرکت مشانیر	آقای مهندس رحمت الله اکرم
سازمان توسعه برق ایران	آقای مهندس بهمن الله مرادی
مهندسین مشاور نیرو	آقای دکتر عارف درودی
شرکت مشانیر	آقای مهندس رضا صائمی
شرکت مشانیر	خانم مهندس زیبا فاخری داریان
مهندسین مشاور نیرو	آقای مهندس پوریا معقولی
مشاور معاون هماهنگی و نظارت بر بهره برداری سازمان توانیر	آقای مهندس اباذر میرزایی
شرکت قدس نیرو	آقای مهندس علی اصغر کسایان
وزارت نیرو - سازمان توانیر - دبیر کمیته فنی	آقای مهندس احسان الله زمانی

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



## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول - اهداف، کلیات و تعاریف

۳	..... ۱-۱- تعاریف
۳	..... ۱-۱-۱- هادی
۳	..... ۲-۱-۱- هادی تکی
۳	..... ۳-۱-۱- هادی چندتائی
۴	..... ۴-۱-۱- هادی فرعی
۴	..... ۶-۱-۱- سیم زمین
۴	..... ۷-۱-۱- سیم راهنما
۴	..... ۸-۱-۱- هادی آلومینیومی با مغزی فولادی
۴	..... ۹-۱-۱- هادی با تلفات کم
۴	..... ۱۰-۱-۱- هادی
۵	..... ۱۱-۱-۱- اسپن
۵	..... ۱۲-۱-۱- رشته
۵	..... ۱۳-۱-۱- هادی رشته‌ای
۵	..... ۱۴-۱-۱- جهت لایه
۵	..... ۱۵-۱-۱- نسبت لایه
۵	..... ۱۶-۱-۱- طول لایه
۵	..... ۲-۱- عوامل مرتبط با هادی‌های استاندارد
۵	..... ۱-۲-۱- عوامل الکتریکی
۶	..... ۲-۲-۱- عوامل مکانیکی
۶	..... ۳-۲-۱- عوامل محیطی
۶	..... ۱-۳-۲-۱- ارتباط هادی و موقعیت خطوط
۷	..... ۲-۳-۲-۱- ارتباط هادی و محیط زیست
۷	..... ۴-۲-۱- عوامل اقتصادی
۷	..... ۱-۴-۲-۱- ارتباط هادی و هزینه‌های بهره‌برداری
۷	..... ۲-۴-۲-۱- ارتباط هادی و سرمایه‌گذاری اولیه
۸	..... ۳-۴-۲-۱- ارتباط هادی و هزینه خاموشی‌ها

۸	..... ۵-۲-۱ عوامل دیگر
۸	..... ۳-۱ هادی‌های پیشنهادی برای استاندارد ملی

### فصل دوم - شناخت و انواع هادی‌های خطوط نیرو

۱۳	..... ۱-۲ کلیات
۱۳	..... ۲-۲ انواع هادی‌ها
۱۳	..... ۱-۲-۲ هادی‌های آلومینیوم- فولاد
۱۴	..... ۲-۲-۲ هادی‌های AAC
۱۴	..... ۳-۲-۲ هادی‌های AAAC
۱۴	..... ۴-۲-۲ هادی‌های ACAR
۱۵	..... ۵-۲-۲ هادی آلیاژ آلومینیوم، آلمک- آلدری
۱۵	..... ۶-۲-۲ هادی با تلفات کم
۱۵	..... ۷-۲-۲ هادی فولادی با روکش آلومینیومی
۱۵	..... ۳-۲-۳ مشخصات هادی ناشی از مواد تشکیل دهنده آن
۱۶	..... ۱-۳-۲ مقاومت الکتریکی
۱۷	..... ۲-۳-۲ جرم ویژه
۱۷	..... ۳-۳-۲ مقاومت کششی
۱۸	..... ۴-۳-۲ ضریب انبساط طولی
۱۸	..... ۵-۳-۲ مدول الاستیسیته
۱۹	..... ۴-۲ خواص کلی هادی‌ها
۱۹	..... ۱-۴-۲ هادی‌های ACSR/GS
۲۰	..... ۲-۴-۲ هادی‌های ACSR/AS
۲۰	..... ۳-۴-۲ هادی‌های AAC
۲۱	..... ۴-۴-۲ هادی‌های AAAC

### فصل سوم - تنوع‌زدایی از هادی‌های خطوط

۲۵	..... ۱-۳ کلیات
۲۵	..... ۲-۳ تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها از دیدگاه‌های مختلف
۲۵	..... ۳-۳ تأثیر مقاومت مکانیکی هادی‌ها در تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها
۲۵	..... ۱-۳-۳ نقش هادی‌ها در محاسبه اسپین
۲۶	..... ۲-۳-۳ نیروهای وارده بر هادی

۲۶	..... ۳-۳-۱- وزن هادی
۲۶	..... ۳-۳-۲- وزن یخ
۲۶	..... ۳-۳-۳- نیروی باد
۲۷	..... ۳-۳-۴- برآیند نیرو
۲۷	..... ۳-۳-۳- معادله تغییر وضعیت
۲۸	..... ۳-۳-۴- فلش هادی
۲۹	..... ۳-۳-۵- تاثیر مقاومت مکانیکی هادی‌ها در ارتفاع برج‌ها
۳۱	..... ۳-۳-۴- نقش جریان‌های اتصال کوتاه در تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها
۳۲	..... ۳-۴-۱- عوامل موثر در تعیین حداقل مقطع از دیدگاه اتصال کوتاه
۳۲	..... ۳-۴-۲- محاسبه حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه اتصال کوتاه
۳۵	..... ۳-۴-۳- حداقل مقطع هادی‌ها در خطوط باندل
۳۶	..... ۳-۴-۴- نتیجه مقدماتی
۳۷	..... ۳-۳-۵- تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها از دیدگاه پدیده کرونا
۳۷	..... ۳-۵-۱- عوامل موثر در شکست هوا
۴۰	..... ۳-۵-۲- گرادیان ولتاژ در سطح هادی‌ها
۴۱	..... ۳-۵-۳- تعیین مقدار گرادیان ولتاژ
۴۳	..... ۳-۵-۴- تعیین حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه کرونا
۴۷	..... ۳-۵-۵- نتیجه مقدماتی
۴۸	..... ۳-۶- انتخاب مقاطع از دیدگاه اقتصادی
۴۸	..... ۳-۶-۱- سرمایه‌گذاری اولیه
۴۹	..... ۳-۶-۱-۱- رابطه تعداد مدارها و هادی‌های هر فاز با سرمایه‌گذاری
۴۹	..... ۳-۶-۱-۲- رابطه هادی‌ها با وزن برجها
۵۰	..... ۳-۶-۱-۳- رابطه هادی‌ها با حجم فونداسیونها
۵۰	..... ۳-۶-۲- سرمایه‌گذاری پستها
۵۱	..... ۳-۶-۳- ارزش حال هزینه‌ها
۵۱	..... ۳-۶-۳-۱- ارزش حال تلفات
۵۲	..... ۳-۶-۳-۲- ارزش حال هزینه‌های تعمیرات و بهره‌برداری
۵۲	..... ۳-۶-۳-۳- ارزش تلفات راکتیبو
۵۳	..... ۳-۶-۴- انتخاب مقاطع مناسب هادی‌ها از دیدگاه اقتصادی
۶۰	..... ۳-۷- مقاطع هادی‌ها برای استاندارد ملی
۶۰	..... ۳-۷-۱- انتخاب جنس هادی‌ها

۶۱	..... مقاومت مکانیکی هادی‌ها ۲-۷-۳
۶۱	..... تحمل جریان اتصال کوتاه ۳-۷-۳
۶۲	..... پدیده کرونا ۴-۷-۳
۶۲	..... حداقل مقطع هادی از دیدگاه فنی ۵-۷-۳
۶۳	..... رعایت دیدگاه‌های اقتصادی ۶-۷-۳
۶۴	..... پیشنهاد مقاطع هادی‌ها برای استاندارد ملی ۷-۷-۳
۶۶	..... پیوست ۱-۳- پارامترهای فنی و اقتصادی

### فصل چهارم - طراحی و انتخاب هادی‌های خطوط نیرو

۶۹	..... کلیات ۱-۴
۷۰	..... مسائل اقتصادی ۲-۴
۷۰	..... مسائل فنی ۳-۴
۷۰	..... جریان مجاز هادی ۱-۳-۴
۷۱	..... اثر ژولی ۱-۱-۳-۴
۷۱	..... بهره جذب انرژی حرارتی خورشید ۲-۱-۳-۴
۷۲	..... تلفات حرارتی ناشی از تشعشع حرارت ۳-۱-۳-۴
۷۲	..... تلفات حرارتی ناشی از انتقال همرفتی حرارت ۴-۱-۳-۴
۷۴	..... جریان اتصال کوتاه ۲-۳-۴
۷۶	..... اختلالات رادیویی و تلویزیونی ۳-۳-۴
۷۸	..... گرادیان ولتاژ ۴-۳-۴
۷۸	..... تلفات ۵-۳-۴
۸۱	..... افت ولتاژ ۶-۳-۴
۸۲	..... محاسبات مکانیکی ۷-۳-۴
۸۲	..... هادی‌های باندل (هادی‌های گروهی) ۸-۳-۴
۸۳	..... آلودگی و خوردگی ۹-۳-۴
۸۳	..... حل یک مثال نمونه ۴-۴
۸۴	..... محاسبات جریان مجاز ۱-۴-۴
۸۴	..... سایر محاسبات فنی ۲-۴-۴
۸۶	..... ملاحظات اقتصادی ۳-۴-۴



## فصل پنجم - نیازمندیهای و آزمون‌ها

۸۹	..... ۱-۵- آزمون‌های هادی‌های رشته‌ای
۹۰	..... ۱-۱-۵- آزمون‌های نوعی
۹۰	..... ۱-۱-۱-۵- آزمون اتصالات در رشته‌های آلومینیومی و فولادی
۹۱	..... ۱-۱-۲- آزمون منحنی‌های تنش - کرنش بر روی رشته‌ها و هادی‌ها
۱۰۰	..... ۱-۱-۳- آزمون نیروی گسیختگی هادی
۱۰۰	..... ۱-۲- آزمون‌های نمونه‌ای
۱۰۰	..... ۱-۲-۱-۵- آزمون کشش بر روی مفتول‌های آلومینیومی و فولادی و فولادی با پوشش آلومینیوم
۱۰۰	..... ۱-۲-۲- آزمون پیچش مفتول‌های آلومینیومی
۱۰۱	..... ۱-۲-۳- آزمون مقاومت الکتریکی مفتول‌های آلومینیومی
	..... ۱-۲-۴- آزمون تنش در یک درصد افزایش طول روی مفتول‌های فولادی و مفتول‌های فولادی
۱۰۴	..... با پوشش آلومینیوم
۱۰۵	..... ۱-۲-۵- آزمون خاصیت لوله‌شدن مفتول‌های فولادی
۱۰۹	..... ۱-۲-۶- آزمون پوشش روی در مفتول‌های فولادی
۱۱۳	..... ۱-۲-۷- اندازه‌گیری سطح مقطع هادی
۱۱۴	..... ۱-۲-۸- اندازه‌گیری قطر نهایی هادی
۱۱۴	..... ۱-۲-۹- اندازه‌گیری جرم گریس و جرم واحد طول هادی (چگالی خطی)
۱۱۶	..... ۱-۲-۱۰- آزمون گسیختگی رشته‌های آلومینیومی و فولادی پس از تاییده شدن
۱۱۷	..... ۱-۲-۱۱- آزمون وضعیت سطح هادی
۱۱۷	..... ۱-۲-۱۲- آزمون نسبت لایه و جهت لایه هادی

## فصل ششم - بهره‌برداری

۱۲۱	..... ۱-۶- موارد عمومی
۱۲۱	..... ۲-۶- بازدید، بازرسی، تعمیرات و آزمون‌ها
۱۲۵	..... منابع و مراجع





\_\_\_\_\_



## مقدمه

هادی‌ها مهمترین بخش خط انتقال را تشکیل داده و وظیفه انتقال انرژی الکتریکی را برعهده دارند. برای اینکه هادی‌ها دارای انعطاف پذیری مناسب در بافت، بسته‌بندی و نصب باشند آنها را بصورت رشته‌ای می‌بافند. معمولاً برای افزایش مقاومت مکانیکی، رشته‌های مرکزی را فولادی انتخاب می‌کنند.

از نظر الکتریکی هادی‌ها در مقابل عبور جریان از خود مقاومت اهمی و اندوکتیو نشان می‌دهند که این مشخصه در طراحی خط بسیار مهم است.

در ایران به طور گسترده از هادی‌های نوع آلومینیوم- فولاد (ACSR)<sup>۱</sup> استفاده می‌گردد و سیستم نامگذاری بر طبق استاندارد (ASTM)<sup>۲</sup> بوده که در آن از اسامی حیوانات برای نامگذاری هادی‌ها بهره برده می‌شود.

## ۱-۱- تعاریف

### ۱-۱-۱- هادی<sup>۳</sup>

هادی جزئی از سیستم انتقال است که وظیفه انتقال انرژی از نقطه‌ای به نقطه دیگر را برعهده دارد و مشخصات آن یکی از عوامل اصلی طراحی و انتخاب سایر اجزا خطوط انتقال نیرو می‌باشد.

### ۱-۱-۲- هادی تکی

در صورتیکه هر فاز خط انتقال فقط از یک هادی تشکیل شده باشد در این صورت هادی خط را تکی گویند.

### ۱-۱-۳- هادی چندتایی

عبارتست از تعدادی هادی که بوسیله فاصله‌ساز<sup>۴</sup> از هم جدا نگه‌داشته شده‌اند ولی بطور موازی با هم ارتباط الکتریکی دارند. هر مجموعه هادی چندتایی به عنوان یکفاز در نظر گرفته می‌شود. مثلاً اگر تعداد هادی‌ها در یک فاز دو یا سه عدد باشد، اصطلاحاً به آن باندل<sup>۵</sup> دوتایی یا باندل سه‌تایی گفته می‌شود.

---

1. Aluminium conductor steel reinforced  
2. American society for testing and materials  
3. Conductor  
4. Spacer  
5. Bundle

### ۱-۱-۴- هادی فرعی<sup>۱</sup>

یکی از هادی‌های یک هادی چندتایی (باندل) را، هادی فرعی می‌گویند.

### ۱-۱-۵- سیم محافظ هوایی

سیم محافظ هوایی که در بالاترین قسمت خطوط انتقال نیرو و به موازات هادی‌های فاز نصب می‌شود، هادی‌های فاز را از اصابت مستقیم صاعقه در امان می‌دارد.

### ۱-۱-۶- سیم زمین

سیم زمین ارتباط الکتریکی بین برج و زمین را برقرار می‌کند. این سیم جهت کاهش مقاومت الکتریکی زمین برج بکار برده می‌شود.

### ۱-۱-۷- سیم راهنما

سیم راهنما سیمی است فولادی و مقاوم با تحمل نیروی مکانیکی زیاد که جهت اجرای عملیات سیم کشی خطوط انتقال نیرو برای کشیدن هادی‌های فاز و سیم‌های محافظ بکار برده می‌شود.

### ۱-۱-۸- هادی آلومینیومی با مغزی فولادی<sup>۲</sup> (ACSR)

قسمت خارجی هادی فوق از جنس آلومینیوم و قسمت مرکزی آن جهت افزایش مقاومت مکانیکی از جنس فولاد می‌باشد. مغزی فولادی با ضخامت‌های مختلف گالوانیزه می‌گردد (ACSR/GS). جهت کاهش اثر خوردگی، این مغزی با روکش آلومینیوم هم ساخته می‌شود که علائم اختصاری آن ACSR/AS، ACSR/AW و یا ACSR/AZ می‌باشد. اگر در مغزی هادی‌ها از فولاد با پوشش آلومینیوم استفاده شود، هادی (ACSR/AZ) بدست می‌آید که مناسب استفاده در مناطق آلوده می‌باشد.

### ۱-۱-۹- هادی با تلفات کم<sup>۳</sup> (SLAC)

این هادی‌ها کاملاً مشابه هادی‌های ACSR بوده و تنها به خاطر دارا بودن ظرفیت انتقال بالاتر و کم بودن تلفات از هادی‌های ACSR متداول متمایز هستند.

### ۱-۱-۱۰- هادی (TACSR)<sup>۴</sup>

تحمل حرارتی هادی‌های ACSR معمولی حدود ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد که همین امر سبب محدودیت عبور جریان در آنها می‌گردد. برای افزایش تحمل حرارتی و در نتیجه امکان عبور جریان بیشتر، در ترکیب رشته‌های آلومینیوم از مقدار کمی زیرکونیوم

---

1. Subconductor  
2. Aluminum conductor steel reinforced  
3. Small loss ACSR  
4. Thermal aluminum conductor steel reinforced

(Zirconium) استفاده می‌شود. این اقدام تحمل حرارتی هادی جدید TACSR را تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد افزایش می‌دهد. کاربرد این هادی عمدتاً در خطوط کوتاه با توان انتقالی بالا می‌باشد.

#### ۱-۱-۱-۱ اسپن<sup>۱</sup>

فاصله بین دو پایه نگهدارنده مجاور را اسپن می‌نامند.

#### ۱-۱-۱-۲ رشته<sup>۲</sup>

یک هادی تک مفتولی با مقطع دایره را رشته می‌نامند.

#### ۱-۱-۱-۳ هادی رشته‌ای<sup>۳</sup>

هادی متشکل از چند رشته که در لایه‌های مختلف به دور یکدیگر پیچیده شده‌اند.

#### ۱-۱-۱-۴ جهت لایه<sup>۴</sup>

جهت پیچش لایه‌ها روی یکدیگر را جهت لایه گویند و به دو حالت راستگرد و چپگرد تقسیم‌بندی می‌شود. در صورتی که هادی به صورت عمودی نگاه داشته شود، در حالت راستگرد، جهت چرخش رشته‌ها در جهت عقربه‌های ساعت و در حالت چپگرد در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌باشد.

#### ۱-۱-۱-۵ نسبت لایه<sup>۵</sup>

نسبت طول محوری یک دور کامل مارپیچی که توسط یک رشته مشخص ایجاد می‌شود، به قطر خارجی مارپیچ مذکور را نسبت لایه گویند.

#### ۱-۱-۱-۶ طول لایه<sup>۶</sup>

به طول محوری یک مفتول که توسط یک دور مارپیچی کامل ایجاد می‌گردد، طول لایه گویند.

### ۱-۲- عوامل مرتبط با هادی‌های استاندارد

#### ۱-۲-۱- عوامل الکتریکی

هادی خطوط نیرو باید بگونه‌ای انتخاب شود که قابلیت‌های لازم را از جهات مختلف بهره‌برداری دارا باشد. مهمترین آنها عبارتند

از :

1. Span
2. Wire
3. Stranded conductor
4. Direction of lay
5. Lay ratio
6. Lay length

- عملکرد هادی از دیدگاه بار متوسط عبوری در طول عمر بهره‌برداری
  - عملکرد هادی از دیدگاه حداکثر بار انتقالی
  - عملکرد هادی در مقابل بارهای اضافی بحرانی و کوتاه‌مدت
  - عملکرد هادی در مقابل جریان اتصال کوتاه
- اثر عوامل فوق به صورت گرما در هادی بروز می‌نماید که در حقیقت هادی خط انتقال بایستی در مقابل افزایش دمای ناشی از هر یک از این عوامل، عملکرد مناسبی از خود نشان دهد. بنابراین هادی انتخابی باید به گونه‌ای باشد که تحت هیچ یک از شرایط فوق ویژگیهای خود را از دست ندهد. عوامل موثر در افزایش دمای هادی در شرایط بهره‌برداری به شرح زیر می‌باشند:

- افزایش دمای محیط
- تشعشع خورشید
- بار عبوری از خط انتقال
- حداکثر بار عبوری از خط انتقال
- اضافه‌بار بحرانی و کوتاه‌مدت
- مقدار جریان اتصال کوتاه و مدت زمان آن

### ۱-۲-۲- عوامل مکانیکی

تحمل مکانیکی هادی در مقابل کشش ایجاد شده در شرایط مختلف آب و هوایی و نیز فلشی که در هادی در بدترین شرایط بارگذاری یا دما به وجود می‌آید در انتخاب نوع هادی خطوط نیرو مؤثر می‌باشد. محاسبات مکانیکی مربوط به خطوط هوایی انتقال نیرو شامل مسائل زیر می‌باشد:

- نیروهای وارد بر هادی
- کشش هادی
- منحنی فلش

هادی باید از لحاظ محاسبات مکانیکی، جوابگوی نیروهای وارده در شرایط مختلف بارگذاری باشد.

### ۱-۲-۳- عوامل محیطی

#### ۱-۳-۲- ارتباط هادی و موقعیت خطوط

باتوجه به اینکه هادی‌های خطوط نیرو در فضای آزاد بر روی برجها نصب می‌شوند، موقعیت جغرافیائی و مکانی این خطوط از نظر شرایط زیر در انتخاب هادی مؤثر خواهد بود:

- شرایط جوی هر منطقه شامل ضخامت یخ روی هادی، سرعت باد و حداکثر و حداقل دما
- موقعیت و مختصات جغرافیائی از نظر ارتفاع منطقه از سطح دریا، میزان بارندگی، برف و باران، رطوبت، فشار هوا و ...
- آلودگیهای محیط



### ۱-۲-۳-۲- ارتباط هادی و محیط زیست

- عواملی همچون قطر هادی‌ها، فاصله فازها و چگونگی استقرار آنها، شکل برجها و تعداد هادی‌ها در هر فاز در اختلالات رادیویی و تلویزیونی مؤثرند.
- مواردی همچون رعایت حریمهای مجاز، فاصله فازها و طرز استقرار آنها، تعداد هادی‌ها در هر فاز و قطر هادی‌ها و شعاع باندل از عوامل مؤثر در میزان الکتریکی و مغناطیسی ناشی از خطوط نیرو می‌باشند.
- مواردی همچون قطر هادی و تعداد هادی‌ها در هر فاز از عوامل مؤثر در میزان صدای مزاحم ناشی از کرونای خطوط انتقال نیرو است.
- عملکرد هادی در مقابل عوامل فرساینده محیطی نیز مورد توجه می‌باشد.

### ۱-۲-۴- عوامل اقتصادی

#### ۱-۲-۴-۱- ارتباط هادی و هزینه‌های بهره‌برداری

نگهداری و بهره‌برداری خطوط نیرو بسته به درجه اهمیت آن و نیز شرایط خط به روشهای گوناگونی صورت می‌پذیرد. هادی‌ها که قسمت حساس و اساسی یک خط را تشکیل می‌دهند مانند هر تأسیساتی، برای دوره بهره‌برداری حجم کاری را بوجود می‌آورند که با توجه به آن نیروی انسانی مورد نیاز برآورد و تأمین می‌گردد. لذا هادی‌ها باید بگونه‌ای انتخاب شوند که ضمن دارا بودن قابلیت‌های مورد نظر کمترین نیروی انسانی را برای نگهداری، تعمیرات و بهره‌برداری لازم داشته باشند. عامل دیگر مرتبط با حجم نیروی انسانی مورد نیاز تعمیرات دوره‌ای هادی بوده که در این مورد نوع هادی، اتصالات و یراق آلات مربوط به هادی، درجه حرارت هادی و شرایط جوی مؤثرند.

#### ۱-۲-۴-۲- ارتباط هادی و سرمایه‌گذاری اولیه

یکی از مهمترین عوامل بهینگی در خطوط انتقال نیرو میزان سرمایه‌گذاری اولیه آن است. معمولاً در مراحل مطالعاتی انتخاب هادی، سعی می‌شود کلیه ملاحظات اقتصادی مورد توجه قرار گیرد ولی بسیار مهم است که در این رابطه به کلیه جوانب امر و بویژه موارد زیر توجه شود:

- حدود رشد بار با ضریب اطمینان کافی و توسعه برنامه‌ریزی شده سیستم
- روند افزایش قیمت‌ها در آینده
- قیمت انواع هادی‌ها
- قیمت یراق آلات هادی‌ها
- قیمت انرژی
- قیمت توان
- امکانات ساخت داخل کشور
- اثرات نوع هادی بر برجها

### ۱-۲-۳-۴- ارتباط هادی و هزینه خاموشی‌ها

یکی از عواملی که به هنگام طراحی خطوط نیرو و نیز انتخاب تجهیزات این خطوط از اهمیت فراوانی برخوردار است، هزینه ناشی از خاموشی‌ها شامل خروجی‌های اضطراری و اجباری و همچنین خروجی‌های با برنامه می‌باشد که می‌تواند باعث خاموشی گردند. خروج از سرویس یک خط ممکن است به دلایل مختلفی پیش آید که یکی از آنها ازدیاد دامنه هادی در اسپن‌ها و نزدیکی هادی با زمین و یا درختان زیر خط و یا بروز عیب در هادی‌ها مانند پاره شدن رشته‌های آلومینیومی تا گسیختگی کامل آن باشد. بروز عیب در هادی متناسب با زمان لازم برای انجام تعمیرات، خاموشی خط و خسارات ناشی از آن را به بهره‌بردار تحمیل می‌نماید. بنابراین انتخاب هادی با توجه به مجموع شرایط کاری، می‌تواند خاموشی‌ها را کاهش داده و بدین ترتیب خسارات ناشی از آن را نیز کمتر نماید.

### ۱-۲-۵- عوامل دیگر

انتخاب یک هادی نامناسب و نامرغوب می‌تواند از راه‌های مختلف، ایمنی پرسنل بهره‌برداری و نیز افرادی را که در مجاورت آن حضور می‌یابند به مخاطره اندازد (مانند مواردی از قبیل افزایش طول زیاد و غیر معمول هادی‌ها در اثر بالا رفتن دمای کار هادی بویژه در فصل گرما و همچنین خطر گسیختگی هادی در فصل سرما و یخبندان). بدین ترتیب انتخاب هادی مناسب از هر جهت می‌تواند ایمنی در حد لزوم را تأمین نماید.

به علت رشد مصرف، مراکز تولید جدید احداث می‌گردد و یا مراکز موجود توسعه می‌یابند. هرگونه توسعه در مراکز تولید ناشی از ایجاد رشد مصرف، اقتضا می‌کند که سیستم انتقال نیز متناسباً توسعه یابد. با توجه به این مسأله لازم است که در طراحی خطوط و انتخاب هادی عامل توسعه پذیری در آینده نیز مورد توجه قرار گیرد. عواملی همچون نوع هادی، سطح مقطع، تعداد هادی در هر فاز و فاصله فازها از یکدیگر با توسعه پذیری مرتبط هستند.

### ۱-۳- هادی‌های پیشنهادی برای استاندارد ملی

با توجه به مطالعات انجام شده جهت تنوع‌زدایی از هادی‌های خطوط، هادی‌های جدول (۱-۱) بعنوان هادی‌های استاندارد در سطح کشور پیشنهاد می‌گردد [۱۰]. سطح مقطع و سایر مشخصات هادی نیز در این جدول آمده است.

جدول ۱-۱: هادی‌های پیشنهادی برای استاندارد ملی

مقاومت هادی در ۲۰ درجه و جریان DC (ohm/km)	کشش قابل تحمل هادی (کیلوگرم)	وزن هادی (kg/km)	قطر هادی (میلیمتر)	مقطع هادی (قسمت آلومینیوم) (میلیمتر مربع)	مقاطع پیشنهادی
۰/۱۵۷۶۰	۸۱۴۰	۸۴۲	۱۹/۵۳	۱۸۳/۴	Lynx 362kCM
۰/۱۱۹۶۰	۸۸۵۰	۹۷۶/۵	۲۱/۷۸	۲۴۱/۷	Hawk 477kCM
۰/۰۹۴۲۲	۱۱۰۰۰	۱۲۳۹	۲۴/۵۳	۳۰۶/۶	Squab 605kCM
۰/۰۷۹۶۳	۱۲۹۰۰	۱۳۶۶	۲۶/۶۹	۳۶۲/۵	Starling 715kCM
۰/۰۶۳۳۲	۱۴۵۰۰	۱۷۲۵	۲۹/۵۱	۴۵۶/۰	Canary 900kCM
۰/۰۵۵۱۸	۱۶۶۰۰	۱۹۸۰	۳۱/۶۲	۵۲۳/۷	Curlew 1033kCM
۰/۰۴۸۰۳	۱۹۰۰۰	۲۲۸۲	۳۳/۹۷	۶۰۴/۲	Grackle 1192kCM







## ۱-۲- کلیات

وجود شرایط آب و هوایی متنوع و متفاوت، لزوم به کارگیری هادی‌های مختلف را در شبکه‌های انتقال و فوق توزیع نیرو ضروری می‌سازد. هادی‌های مورد استفاده در خطوط انتقال یا فوق توزیع نیرو را بصورت رشته‌ای می‌بافند و برحسب مورد ممکن است جنس رشته‌ها از فولاد، آلومینیوم خالص، آلیاژ آلومینیوم و یا ترکیبی از این رشته‌ها باشد. برای اینکه هادی‌ها دارای انعطاف‌پذیری مناسب در بافت، بسته‌بندی و نصب باشند آنها را به صورت رشته‌ای می‌بافند که این اقدام سبب می‌شود علاوه بر ایجاد مزایایی شامل: انعطاف‌پذیری، امکان بافت هادی‌ها از فلزات مختلف و تنظیم مقاومت الکتریکی و مکانیکی هادی‌ها از طریق انتخاب قطر و تعداد لایه‌های مناسب معیابی از جمله افزایش قطر هادی، افزایش ضخامت یخ و مقطع بادخور و نفوذ ذرات آلوده به داخل هادی‌ها، را در برداشته باشد.

## ۲-۲- انواع هادی‌ها

### ۱-۲-۲- هادی‌های آلومینیوم - فولاد (ACSR)

این هادی‌ها با ترکیبی از رشته‌های آلومینیوم با درجه خلوص بالا و رشته‌های فولاد گالوانیزه بافته می‌شوند که رشته‌های فولادی در لایه‌های مرکزی و رشته‌های آلومینیومی در لایه‌های بیرونی قرار دارند. سیم‌های فولاد گالوانیزه (GS) در کلاس‌های مختلفی از پوشش گالوانیزه تولید می‌شوند. این هادی‌ها معمولاً به تنهایی به عنوان رسانا مورد استفاده قرار نمی‌گیرند اما به عنوان سیم‌گارد کاربرد گسترده‌ای دارند. با توجه به اینکه در مناطق آلوده، مقاومت فولاد گالوانیزه در مقابل خوردگی کم است می‌توان از مغزی فولاد با روکش آلومینیومی (نوع AW یا AS) استفاده نمود. در نوع AS، آلومینیوم جامد بدون اینکه ذوب گردد با یک فرآیند حرارتی مناسب به صورت روکش روی سطح رشته‌های فولادی قرار می‌گیرد. در نوع AW پودر مخصوصی از آلومینیوم روی سطح رشته‌های فولادی فشرده شده و با فرآیند حرارتی ویژه‌ای بدون اینکه آلومینیوم ذوب شود رشته‌های فولادی پوشش داده می‌شود. هادی نوع AZ مشابه هادی‌های AS و AW بوده با این تفاوت که به جای رشته‌های فولادی روکش آلومینیوم AS یا AW در هسته مرکزی، از نوع رشته‌های فولادی روکش آلومینیوم AZ استفاده می‌گردد. کد یا خلاصه عناوین هادی‌های ACSR برگرفته از واژه‌های زیر می‌باشد.

#### Aluminum Conductor Steel Reinforced

برای مغزی فولادی هادی‌ها نیز عناوین GS و AS و AW و AZ در نظر گرفته شده است که این کدها برگرفته از عبارات زیر می‌باشند:

Galvanized Steel Core = GS

Aluminum Steel Core = AS

Aluminum Clad Steel Core = AW

Aluminum Coated Steel Core = AZ

بنابراین هادی‌های ACSR می‌توانند از انواع مختلف تشکیل شوند. در مواردی که شدت آلودگی در مسیر خطوط نیرو بالا نیست می‌توان از هادی‌های با مغزی فولاد گالوانیزه یا ACSR/GS که ارزانتر از دیگر انواع هادی‌ها یعنی ACSR/AS یا ACSR/AW

می‌باشد، استفاده نمود. به هر حال استفاده از دو نوع هادی اخیر، میزان خوردگی هادی‌ها را در مناطق آلوده کاهش می‌دهد. هادی AZ نیز در مقابل خوردگی دارای مقاومت مناسبی است اما در مقایسه با AS و AW مقاومت آن در مقابل خوردگی کمتر است به همین دلیل در مقایسه با رشته‌های فولادی روکش آلومینیوم AW و AS کاربرد کمتری دارد.

### ۲-۲-۲-۲ هادی‌های AAC

این هادی‌ها تنها از بافت رشته‌های آلومینیوم با درجه خلوص بالاتر از ۹۹/۵ درصد ساخته می‌شوند. بکارگیری آلومینیوم خالص در تمام رشته‌ها سبب پدیدار شدن ویژگیهای مثبت و منفی می‌گردد که از جمله آنها می‌توان به کاهش مقاومت کششی، کاهش وزن، افزایش عمر هادی در مناطق آلوده و هدایت الکتریکی مناسب‌تر آنها اشاره نمود. خلاصه نام این نوع هادی‌ها از واژه‌های زیر گرفته شده است:

#### All Aluminum Conductor

این نوع هادی‌ها در برابر آلودگی، مقاومت بیشتری از هادی‌های آلومینیوم - فولاد ارائه می‌دهند و لذا استفاده از آنها بیشتر در مناطق آلوده انجام می‌گیرد.

### ۲-۲-۲-۳ هادی‌های AAAC

این نوع هادی‌ها تنها از آلیاژ مقاوم آلومینیوم ساخته می‌شوند. به عبارت دیگر برخلاف هادی‌های ACSR در بافت کلیه لایه‌ها اعم از درونی یا بیرونی از یک نوع آلیاژ استفاده می‌گردد و طبیعتاً دارای ویژگیهای متفاوتی نسبت به هادی ACSR می‌باشند. عنوان این هادی‌ها نیز از عبارت زیر گرفته شده است.

#### All Aluminum Alloy Conductor

مقاومت این نوع هادی‌ها در مقابل خوردگی بیش از هادی‌های ACSR می‌باشد به همین دلیل اگر چه قیمت این نوع هادی‌ها بیشتر است ولیکن به لحاظ عمر بیشتر، عمدتاً در مناطق آلوده می‌توان از آنها استفاده نمود.

### ۲-۲-۲-۴ هادی‌های ACAR

هادی‌های ACAR با ترکیبی از رشته‌های آلیاژ مقاوم آلومینیوم در لایه‌های مرکزی و رشته‌های آلومینیوم با درجه خلوص بالا در لایه‌های بیرونی بافته می‌شوند. در حقیقت این هادی دارای مشخصه‌ای در حد فاصل دو هادی AAAC و AAC می‌باشد. عنوان این هادی‌ها از واژه‌های زیر گرفته شده است :

#### Aluminum Conductor Aluminum Alloy Reinforced

این نوع هادی‌ها نیز دارای مقاومت مناسبی در مقابل خوردگی می‌باشند، اما مقاومت مکانیکی آنها نسبت به هادی‌های AAAC کمتر است. به همین دلیل از این نوع هادی‌ها در مناطق آلوده و گرم که دارای زمستان سخت نیستند، استفاده می‌گردد. در دیگر مناطق از این نوع هادی‌ها می‌توان در اسپن‌های کوتاه استفاده نمود.



### ۲-۲-۵- هادی آلیاژ آلومینیوم، آلمک - آلدری

این نوع هادی دارای درجه خلوصی حدود ۹۸/۳ درصد بوده و تقریباً ۶۵ تا ۷۵ درصد از وزن آنرا منیزیم تشکیل می‌دهد و بقیه آن یعنی حدود ۵ تا ۶ درصد از سیلیسیم می‌باشد. این هادی معمولاً در خطوط ۶۳ کیلوولت با اسپن‌های کوتاه (۱۵۰ تا ۲۰۰ متر) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۲-۲-۶- هادی با تلفات کم (SLAC)

بررسی‌ها نشان داده است که با تغییر شکل رشته‌ها در هادی‌های ACSR می‌توان ظرفیت انتقالی آنرا به میزان قابل توجهی افزایش داد. هادی SLAC طوری ساخته شده است که نسبت به هادی ACSR با قطر و وزن مشابه، حدود ۱۱ تا ۱۳ درصد مقاومت الکتریکی کمتری دارد. در هادی‌های ACSR معمولی کلیه رشته‌های آلومینیومی و فولادی دارای مقاطع دایره‌ای شکل می‌باشند در حالیکه در هادی‌های SLAC با انتخاب مقاطع غیر دایره‌ای، فاصله هوایی بین رشته‌ها کمتر می‌شود. این هادی‌ها کاملاً مشابه هادی‌های ACSR بوده و تنها به خاطر دارا بودن ظرفیت انتقال بالاتر و کم‌بودن تلفات به نام SMALL LOSS ACSR شناخته شده‌اند.

### ۲-۲-۷- هادی فولادی با روکش آلومینیومی (Aluminum Clad Steel)

در این هادی از آلومینیوم به عنوان روکش هادی‌های فولادی استفاده شده است. نوع فولاد مورد استفاده می‌تواند از نوع معمولی دارای مقاومت مکانیکی بین  $120-140 \text{ kg/mm}^2$  و یا فولاد نوع سخت دارای مقاومت مکانیکی بین  $150-180 \text{ kg/mm}^2$  باشد. کاربرد این هادی‌ها در خطوط هوایی به عنوان سیم محافظ می‌باشد.

### ۲-۳- مشخصات هادی ناشی از مواد تشکیل‌دهنده آن

تنوع جنس و آلیاژ هادی‌های مورد استفاده در خطوط سبب می‌شود که برای انتخاب مناسب هادی‌ها، ویژگی‌های مختلف آنها مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند. به عنوان مثال ممکن است در انتخاب هادی مشخصه‌هایی چون مقاومت در مقابل خوردگی، مقاومت الکتریکی، مقاومت کششی و یا قیمت مدنظر باشد. طبیعی است که در پاسخ به این نیازها همواره نمی‌توان از یک نوع هادی استفاده نمود.

در طراحی خطوط نیرو و انتخاب مقاطع هادی‌ها، لازم است موارد زیر که از مشخصه‌های مهم هادی‌ها می‌باشند مورد بررسی قرار گیرند.

- مقاومت الکتریکی
- جرم ویژه
- مقاومت کششی
- ضریب انبساط طولی<sup>۱</sup>

1. Coefficient of liner expansion

- مدول الاستیسیته<sup>۱</sup>

## ۲-۳-۱- مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی هادی‌ها از پارامترهای بسیار مهمی است که در میزان تلفات الکتریکی و انتقال قدرت دخالت دارد، به همین دلیل نقش بسیار مهمی را در انتخاب نوع و مقاطع هادی‌ها ایفا می‌کند. جدول (۱-۲) مقاومت الکتریکی چند نمونه از هادی‌های متداول در خطوط را نشان می‌دهد. ارقام مندرج در این جدول مقادیر مقاومت ویژه را در شرایط نرمال نشان می‌دهند و طبیعی است با تغییر درجه خلوص فلزات، ترکیب آلیاژها، ضخامت روکش گالوانیزه یا آلومینیوم، مقادیر آنها تغییر خواهد کرد. چون مقدار مقاومت هادی‌های آلومینیوم - فولاد با توجه به ترکیب رشته‌های فولاد و آلومینیوم تغییر می‌کند، به همین دلیل در این جدول درج نگردیده است.

جدول ۱-۲: مقادیر مقاومت الکتریکی چند نمونه از هادی‌ها

مقادیر نسبی به درصد	مقاومت ویژه در $20^{\circ}\text{C}$ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	نوع هادی
۱۰۰	۰/۰۲۷	آلومینیوم
۱۰۴-۱۲۲	۰/۰۲۸ - ۰/۰۳۳	آلیاژ آلومینیوم
۵۹۳-۷۰۴	۰/۱۶ - ۰/۱۹	فولاد گالوانیزه
۱۶۷-۴۶۳	۰/۰۴۵ - ۰/۱۲۵	فولاد با روکش آلومینیوم

مقدار مقاومت dc در یک هادی مقتولی (غیر رشته‌ای) را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (1-2)$$

در این رابطه R مقاومت dc هادی،  $\rho$  مقاومت ویژه، L طول هادی و S سطح مقطع هادی می‌باشد.

مقاومت هادی تحت تأثیر درجه حرارت تغییر می‌یابد. در شرایط کلی مقاومت هادی‌ها از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$R_c = R_0 \times [1 + \alpha(t_c - t_0)] \quad (2-2)$$

در این رابطه :

$t_c$ : درجه حرارت هادی برحسب سانتیگراد

$t_0$ : درجه حرارت اولیه هادی برحسب سانتیگراد

$\alpha$ : ضریب حرارتی ویژه هادی که برحسب نوع هادی متفاوت است (جدول ۲-۲).

$R_c$ : مقاومت dc هادی در درجه حرارت هادی ( $t_c$ ) برحسب اهم

$R_0$ : مقاومت dc هادی در درجه حرارت اولیه ( $t_0$ ) برحسب اهم

جدول ۲-۲: مقادیر  $\alpha$  برای چند نوع فلز یا آلیاژ

$\alpha$	نوع فلز یا آلیاژ
۲۲۸/۱	آلومینیوم سخت با هدایت نسبی ۶۱ درصد
۱۸۰	آهن با هدایت نسبی ۱۷/۲ درصد
۱۸۰-۹۸۰	فولاد با هدایت نسبی ۲ تا ۱۴ درصد

مقاومت هادی‌ها تحت تأثیر جریان متناوب قدری (حدود ۳ تا ۵ درصد) بیشتر از حالت dc خواهد بود.

### ۲-۳-۲- جرم ویژه

عامل دیگری که در بررسی و انتخاب هادی‌ها دخالت دارد، وزن هادی‌ها می‌باشد. وزن هادی علاوه بر اینکه بطور مستقیم در میزان قیمت آن مؤثر است در محاسبات مکانیکی نیز نقش مهمی را ایفا می‌نماید. بر این مبنا هادی‌هایی که دارای جرم ویژه کمتری هستند، در مقایسه با هادی‌های سنگین‌تر دارای مزیت نسبی می‌باشند. جدول (۲-۳) مقادیر جرم ویژه چند نمونه از هادی‌های متداول را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳: جرم ویژه چند نمونه از هادی‌ها

مقادیر نسبی به درصد	جرم ویژه (kg/dm <sup>3</sup> )	نوع هادی
۱۰۰	۲/۷	آلومینیوم
۱۰۰	۲/۷	آلیاژ آلومینیوم
۲۸۹	۷/۸	فولاد گالوانیزه
۲۴۵	۶/۶	فولاد با روکش آلومینیوم

### ۲-۳-۳- مقاومت کششی

گرچه نقش اصلی هادی‌ها، انتقال انرژی الکتریکی مورد نیاز است اما باید در مقابل اضافه بارهای ناشی از وزن هادی، باد و یخ نیز تحمل کافی داشته باشند. با توجه به اینکه با افزایش فواصل برج‌ها، نیروهای مکانیکی تحمیلی بر هادی‌ها افزایش می‌یابد، لذا لازم است مقاومت کششی هادی‌ها نیز متناسب با شرایط منطقه انتخاب شوند. جدول (۲-۴) حد مقاومت کششی<sup>۱</sup> چند نمونه از هادی‌های متداول را نشان می‌دهد. همانطور که از این می‌توان ملاحظه نمود، مقادیر این پارامترها در دامنه وسیعی تغییر می‌کند.

1. Ultimate tensile stress

جدول ۲-۴: مقاومت کششی چند نمونه از هادی‌ها

مقادیر نسبی به درصد	حد مقاومت کششی (kg/mm <sup>2</sup> )	نوع هادی
۱۰۰-۱۲۰	۱۶-۱۹	آلومینیوم
۱۵۵-۲۲۰	۲۵-۳۵	آلیاژ آلومینیوم
۶۸۵-۱۰۰۰	۱۱۰-۱۶۰	فولاد گالوانیزه
۴۳۵-۱۰۰۰	۷۰-۱۶۰	فولاد با روکش آلومینیوم

### ۲-۳-۴- ضریب انبساط طولی

در یک شرایط محیطی مشخص و برای یک طراحی معین، ازدیاد درجه حرارت هادی‌ها سبب افزایش فلش هادی‌ها و در نتیجه ارتفاع برج‌ها می‌گردد. جدول (۲-۵) ضریب انبساط طولی ( $\lambda$ ) چند نمونه از هادی‌های متداول را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵: ضریب انبساط طولی چند نمونه از هادی‌ها

مقادیر نسبی به درصد	$\lambda \times 10^{-6}$ (1/°c)	نوع هادی
۱۰۰	۲۳	آلومینیوم
۹۱-۱۰۰	۲۱-۲۳	آلیاژ آلومینیوم
۴۸-۵۲	۱۱-۱۲	فولاد گالوانیزه
۵۲-۶۵	۱۲-۱۵	فولاد با روکش آلومینیوم

البته ذکر این نکته ضروری است که برای حفظ مشخصه اولیه هادی‌ها، درجه حرارت هادی نباید از مقدار معینی فراتر رود، چون در این شرایط، اضافه طول هادی‌ها به حالت اول بر نخواهد گشت.

### ۲-۳-۵- مدول الاستیسیته

علاوه بر عامل درجه حرارت، هادی‌ها در اثر نیروهای مکانیکی نیز کشیده می‌شوند که این امر باعث افزایش طول آنها می‌گردد. در این حالت نیز برای اینکه هادی‌ها به حالت اول خود برگردند لازم است تا نیروهای کششی اعمالی بر هادی‌ها از مقدار معینی بیشتر نباشند، چون در غیر این صورت سبب افزایش طول دائمی هادی‌ها شده که این امر باعث افزایش فلش و مشکلاتی در زمان بهره‌برداری می‌گردد و می‌تواند مشکل‌ساز باشد.

جدول (۲-۶) مدول الاستیسیته (E) چند نمونه هادی را نشان می‌دهد. همانطور که از این جدول مشهود است، مدول الاستیسیته برای هادی‌های سخت مانند فولاد به مراتب بیشتر از آلومینیوم یا آلیاژهای آن می‌باشد. لذا در مواردی که هدف، کنترل فلش هادی‌ها است، استفاده از هادی‌هایی که مدول الاستیسیته آنها بیشتر است مناسب‌تر می‌باشد. در واقع کاهش این پارامتر سبب کم شدن اضافه طول هادی‌ها در اثر وزن هادی، وزن یخ و نیروی باد می‌گردد.

جدول ۲-۶: مدول الاستیسیته چند نمونه از هادی‌ها در اثر اعمال نیروهای مکانیکی

مقادیر نسبی به درصد	E (kg/mm <sup>2</sup> )	نوع هادی
۱۰۰	۷۰۰۰	آلمینیوم
۱۰۰-۱۱۴	۷۰۰۰-۸۰۰۰	آلیاژ آلومینیوم
۲۷۱-۲۸۶	۱۹۰۰۰-۲۰۰۰۰	فولاد گالوانیزه
۱۵۷-۲۷۱	۱۱۰۰۰-۱۹۰۰۰	فولاد با روکش آلومینیوم

### ۲-۴- خواص کلی هادی‌ها

از آنجایی که پارامترهایی نظیر مقاومت الکتریکی و مقاومت کششی بر حسب تعداد لایه‌ها و رشته‌ها تغییر می‌کنند و مقادیر آنها در اکثر استانداردها از جمله ASTM, DIN, IEC, BS موجود است لذا در ادامه تنها دو پارامتر ضریب انبساط طولی هادی‌ها (λ) و مدول الاستیسیته (E) که در محاسبات مکانیکی و تعیین فلش کاربرد دارند مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

### ۲-۴-۱- هادی‌های ACSR/GS

از آنجا که هادی‌های ACSR با ترکیبی از رشته‌های آلومینیومی و فولادی بافته می‌شوند، لذا خواص کلی آنها با توجه به خواص رشته‌های فلزی مورد استفاده در بافت آنها و همچنین تعداد لایه‌ها و یا نسبت تعداد رشته‌های آلومینیومی و فولادی تعیین و محاسبه می‌گردد. جدول (۲-۷) مقادیر مربوط به ضریب انبساط طولی (λ) و مدول الاستیسیته (E) این نوع هادی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۷: ضرایب λ و E برای هادی‌های ACSR/GS

E (kg/mm <sup>2</sup> )	$\lambda \times 10^{-6}$ (1/°C)	تعداد رشته‌های هادی ACSR (فولاد/آلمینیوم)
۸۴۰۰	۱۸/۹	۶/۱
۹۲۸۰	۱۷/۷	۷/۱
۷۰۷۰	۲۱/۲	۱۸/۱
۷۹۹۰	۱۹/۵	۶/۷
۷۹۹۰	۱۹/۵	۲۴/۷
۸۳۶۰	۱۹/۰	۲۶/۷
۹۰۸۰	۱۸/۰	۳۰/۷
۷۲۵۰	۲۰/۸	۴۵/۷
۷۹۹۰	۱۹/۵	۵۴/۷
۷۴۳۰	۲۰/۵	۸۴/۷
۹۰۳۰	۱۸/۰	۳۰/۱۹
۷۹۵۰	۱۹/۶	۵۴/۱۹
۸۱۵۰	۱۹/۳۵	متوسط

## ۲-۴-۲- هادی های ACSR/AS

در این نوع هادی ها به جای استفاده از فولاد گالوانیزه از فولاد با روکش آلومینیوم استفاده می شود. با توجه به اینکه نقش پوشش آلومینیومی برای افزایش مقاومت هادی ها در مقابل خوردگی است، لذا بر حسب مورد، ضخامت پوشش ممکن است کم یا زیاد گردد که این امر به نوبه خود سبب تغییر مقاومت الکتریکی، مقاومت مکانیکی و دیگر مشخصه هادی ها خواهد شد. در جدول (۲-۸) ضریب انبساط طولی ( $\lambda$ ) و مدول الاستیسیته (E) این نوع هادی ها نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود با تغییر تعداد رشته ها و لایه ها این دو ضریب نیز دچار تغییر شده و نتیجتاً باعث تفاوت در تغییرات طول هادی ها در شرایط بهره برداری خواهند شد.

جدول ۲-۸: ضرایب  $\lambda$  و E برای هادی های ACSR/AS

E (kg/mm <sup>2</sup> )	$\lambda \times 10^{-6}$ (1/°C)	تعداد رشته های هادی ACSR (فولاد/آلومینیوم)
۷۷۶۰	۲۰/۰	۶/۱
۸۳۷۰	۱۹/۰	۷/۱
۶۸۴۰	۲۱/۷	۱۸/۱
۷۴۶۰	۲۰/۵	۶/۷
۷۴۷۰	۲۰/۵	۲۴/۷
۷۷۳۰	۲۰/۰	۲۶/۷
۸۲۳۰	۱۹/۲	۳۰/۷
۶۹۶۰	۲۱/۵	۴۵/۷
۷۴۷۰	۲۰/۵	۵۴/۷
۷۰۹۰	۲۱/۲	۸۴/۷
۸۲۰۰	۱۹/۳	۳۰/۱۹
۷۴۵۰	۲۰/۵	۵۴/۱۹
۷۵۸۰	۲۰/۳	متوسط

## ۲-۴-۳- هادی های AAC

این نوع هادی ها از رشته های آلومینیومی خالص بافته می شوند و بر حسب اینکه تعداد لایه های آنها چه مقدار باشد، مقادیر ضریب انبساط طولی و مدول الاستیسیته ارقام مختلفی را به خود اختصاص می دهند. جدول (۲-۹) مقادیر این ضرایب را در چند نمونه از هادی های AAC نشان می دهد. همانطور که از این جدول مشهود است با افزایش تعداد رشته ها که طبیعتاً ازدیاد تعداد لایه ها را نیز به همراه دارد، مقادیر ضریب انبساط طولی تقریباً ثابت باقی می ماند اما مدول الاستیسیته هادی تا حدود پنج درصد کاهش می یابد.

جدول ۲-۹: مقادیر  $\lambda$  و E در چند نمونه از هادی‌های AAC

E (kg/mm <sup>2</sup> )	$\lambda \times 10^{-6}$ (1/°C)	تعداد رشته‌های هادی
۶۰۰۰	۲۳/۰	۷
۵۷۰۰	۲۳/۰	۱۹
۵۷۰۰	۲۳/۰	۳۷

## ۲-۴-۴- هادی‌های AAAC

در بافت این نوع هادی‌ها تنها از رشته‌های آلیاژ مقاوم آلومینیوم استفاده می‌شود که بر حسب مورد نوع آلیاژ ممکن است متفاوت باشد. جدول (۲-۱۰) مقادیر  $\lambda$  و E را در چند نمونه از هادی‌های AAAC نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱۰: مقادیر  $\lambda$  و E در چند نمونه از هادی‌های AAAC

E (kg/mm <sup>2</sup> )	$\lambda \times 10^{-6}$ (1/°C)	تعداد رشته‌های هادی
۶۰۰۰	۲۳/۰	۷
۵۷۰۰	۲۳/۰	۱۹
۵۷۰۰	۲۳/۰	۳۷
۵۷۰۰	۲۳/۰	۶۱









### ۳-۱- کلیات

در این قسمت از استاندارد، هدف نهایی انتخاب تعداد محدودی هادی از میان هادی‌های موجود برای خطوط انتقال و فوق‌توزیع کشور است. ابتدا هادی‌های مختلف از جهات مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و سپس از میان آنها مناسب‌ترین هادی‌ها از جنبه فنی و اقتصادی برای خطوط انتقال و فوق‌توزیع پیشنهاد خواهند شد.

### ۳-۲- تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها از دیدگاه‌های مختلف

برای تعیین مقطع مناسب هادی‌ها تأثیر کمیت‌هایی مانند مقاومت مکانیکی هادی‌ها، جریان اتصال کوتاه، پدیده کرونا و همچنین پارامترهای اختصاصی و شرایط محیطی نصب مدنظر قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که چون این فصل مربوط به تنوع‌زدایی از هادی‌ها است و هدف طراحی یک خط خاص با طول معین نیست، لذا کمیت افت ولتاژ برای تعیین سطح مقطع هادی‌ها در نظر گرفته نشده است.

### ۳-۳- تأثیر مقاومت مکانیکی هادی‌ها در تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها

مقاومت مکانیکی هادی‌ها به شکل مستقیم در فاصله بین دو برج یا اسپن تأثیر می‌گذارد. در صورتی که هادی انتخابی دارای مقاومت مکانیکی مناسبی نباشد کاهش فاصله دو پایه را موجب شده و در نتیجه افزایش سرمایه‌گذاری احداث خطوط نیرو را به دنبال خواهد داشت.

### ۳-۳-۱- نقش هادی‌ها در محاسبه اسپن

به طور طبیعی فاصله دو برج بستگی به نوع هادی‌ها و شرایط آب و هوایی مسیر منطقه عبور خطوط نیرو دارد. معمولاً در طراحی خطوط نیرو دو رژیم سخت از نظر مکانیکی مورد توجه قرار گرفته که با توجه به اضافه بارهای ناشی از آنها محاسبات لازم انجام می‌گیرند. این دو رژیم عبارتند از:

- رژیم زمستان
- رژیم طوفان

ویژگی‌های این دو رژیم، قطر یخ، درجه حرارت کم و وزش بادهای تند بوده که بر حسب مورد رژیم زمستان یا طوفان می‌توانند ملاک طراحی‌های مکانیکی باشند. مستقل از اینکه چه رژیمی برای طراحی مناسب است اگر طول اسپن افزایش یابد، از یک طرف تعداد برج‌ها کم می‌شود و از طرف دیگر بر وزن برج‌ها افزوده می‌گردد و در صورتی که فواصل برج‌ها خیلی کم انتخاب شود، وزن و ارتفاع آنها کم ولی بر تعداد آنها افزوده می‌گردد. در چنین حالتی باید در جستجوی اقتصادی‌ترین اسپن بود. برای انتخاب اسپن اقتصادی معمولاً به کمک برنامه‌های کامپیوتری مجموع وزن برج‌ها و حجم فونداسیون‌ها و در نتیجه قیمت خط انتقال برای اسپن‌های مختلف محاسبه می‌گردد و طبیعتاً اسپنی که کمترین هزینه را برای خط به همراه داشته باشد، اسپن اقتصادی است. اما

تحت هر شرایط، هادی انتخابی باید مناسب برای اسپن انتخابی باشد. به عبارت دیگر اگر از هادی‌های با مقاومت مکانیکی پایین استفاده شود، فاصله دو پایه با توجه به شرایط منطقه محدود می‌گردد.

در برخی موارد که منطقه مسیر دارای بادهای تند یا یخ سنگین است به منظور کنترل نوسانات هادی‌ها و یا محدود کردن اضافه بارهای تحمیلی بر هادی‌ها و برجها لازم است طول اسپن کوتاه‌تر انتخاب شود. ضمناً در مناطقی که مسیر دارای پیچ و خم‌های متعدد باشد نیز انتخاب اسپن کوتاه‌تر ضروری است. بنابراین در طول مسیر خطوط نیرو ممکن است به دلایل مختلفی فواصل برجها در دامنه وسیعی تغییر نمایند.

### ۳-۳-۲- نیروهای وارده بر هادی

نیروهای ناشی از باد و یخ عوامل مهمی هستند که در محاسبات مکانیکی بخصوص طراحی برج‌ها، تعیین طول اسپن و انتخاب نوع و قطر هادی نقش مهمی را دارا می‌باشند. نظر به اینکه این نیروها در فصول مختلف سال متفاوت هستند، لذا لازم است با توجه به شرایط آب و هوایی هر منطقه نسبت به برآورد و محاسبه نیروها در بدترین شرایط اقدام نمود. نیروهای وارده بر هادی‌های خطوط نیرو از طرق مختلفی تحمیل می‌شوند که مهمترین آنها نیروهای ناشی از وزن هادی‌ها و اضافه بارهای ناشی از باد و یخ می‌باشند.

### ۳-۳-۲-۱- وزن هادی

این نیرو تابعی از طول اسپن است. مسلماً هر چه اسپن بلندتر باشد، به دلیل افزایش طول هادی، این نیرو نیز بیشتر شده که در مجموع می‌توان مقدار آن را از رابطه زیر بدست آورد:

$$W_c = S \cdot W' \quad (۱-۳)$$

در این رابطه  $W_c$  وزن هادی به کیلوگرم،  $S$  فاصله بین دو برج (اسپن) به متر و  $W'$  وزن یک متر از طول هادی بر حسب کیلوگرم است.

### ۳-۳-۲-۲- وزن یخ

وقتی یخ دور هادی‌ها را احاطه می‌نماید، مسلماً وزن مجموع هادی را در یک اسپن افزایش می‌دهد. در چنین حالتی وزن یخ برابر است با:

$$W_i = \pi \cdot g \left[ (d_i + \frac{d}{2})^2 - \frac{d^2}{4} \right] = \pi \cdot g \cdot d_i \cdot (d + d_i) \quad (۲-۳)$$

در این رابطه  $d_i$  و  $d$  به ترتیب ضخامت یخ و قطر هادی به متر،  $g$  وزن مخصوص یخ (که مقدار آن معمولاً ۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود) و  $W_i$  وزن یخ در یک متر از طول هادی بر حسب نیوتن می‌باشند.

### ۳-۳-۲-۳- نیروی باد

در صورتی که باد به هادی برخورد کند نیرویی معادل  $W_w$  بر آن وارد می‌کند که مقدار آن ضمن اینکه به سرعت و زاویه وزش باد بستگی دارد به سطح بادخور هادی نیز وابسته است. در حالت کلی نیروی وارده بر هادی در اثر وزش باد از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W_w = \frac{\rho \cdot c \cdot d \cdot V^2}{2} \quad (3-3)$$

در این رابطه:

$W_w$ : نیروی باد بر یک متر از طول هادی بر حسب کیلوگرم

$c$ : ضریب سطحی هادی در مقابل باد که برای هادی‌های رشته‌ای مقدار آن برابر یک است.

$\rho$ : دانسیته هوا، بر حسب  $\text{kg-sec}^2/\text{m}^4$  که مقدار آن در شرایط متعارف برابر با  $\frac{1}{3}$  است.

$d$ : قطر هادی بر حسب متر

$V$ : سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه

با جایگذاری مقادیر  $\rho$  و  $c$  در رابطه فوق مقدار  $W_w$  بصورت زیر در می‌آید:

$$W_w = 0.0625d \cdot V^2 \quad (4-3)$$

در صورتی که یخی به ضخامت  $d_i$  دور هادی را احاطه کند، در رابطه بالا بجای قطر هادی ( $d$ ) باید از قطر مجموع هادی و یخ یعنی  $(d+2d_i)$  استفاده نمود. در این رابطه زاویه وزش باد بر روی هادی  $90^\circ$  درجه در نظر گرفته شده است، اما در صورتی که باد با زاویه  $\varphi$  بر هادی بوزد، مقدار  $W_w$  به صورت زیر محاسبه می‌شود (که طبیعتاً کمتر از حالتی است که باد به طور قائم بوزد):

$$W_w = 0.0625(d + 2d_i) \cdot V^2 \cdot \sin^2 \varphi \quad (5-3)$$

معمولاً برای محاسبه مقدار ماکزیمم نیروی باد بر هادی‌ها مقدار  $\varphi$  برابر با  $90^\circ$  درجه منظور می‌گردد.

### ۳-۳-۳-۴- برآیند نیرو

با توجه به اینکه نیروی باد افقی و نیروهای ناشی از وزن هادی و یخ عمودی است، برآیند این دو نیرو را می‌توان از رابطه زیر

بدست آورد:

$$W = \sqrt{W_w^2 + (W_c + W_i)^2} \quad (6-3)$$

در این رابطه  $W_i$  و  $W_c$  و  $W_w$  و  $W$  به ترتیب وزن یخ، وزن هادی، نیروی باد و برآیند نیروهای وارده بر هادی‌ها می‌باشند.

### ۳-۳-۳- معادله تغییر وضعیت

معادله تغییر وضعیت در حقیقت تنظیم فلش و کشش در شرایط آب و هوایی زمان نصب است. به عبارت دیگر مهندس طراح باید بداند که در هنگام نصب خط در روزهای مختلف سال، فلش و کشش هادی‌ها برای چه حد تنظیم شوند تا در بدترین شرایط محیطی (بر حسب مورد زمستان یا طوفان) کشش هادی‌ها از حد مجاز تجاوز ننماید. برای دسترسی به ارقام مناسب جهت تنظیم کشش و فلش در هنگام سیم‌کشی خطوط نیرو تحت یک شرایط محیطی مشخص و معین، لازم است از رابطه (۳-۷) که به معادله تغییر وضعیت هادی‌ها نامگذاری شده است، استفاده نمود. به کمک این رابطه می‌توان مقادیر کشش و فلش هادی‌ها را در شرایط آب و هوایی مختلف محاسبه و با توجه به نتایج بدست آمده، سیم‌کشی خطوط نیرو را در شرایط زمان اجرا انجام داد.

$$H_2^3 + H_2^2 \left[ \frac{A.E.S^2.(W_1)^2}{24(H_1)^2} + A.E.\alpha.(T_2 - T_1) - H_1 \right] - \frac{A.E.S^2.(W_2)^2}{24} = 0 \quad (۷-۳)$$

در این رابطه:

$T_1$ : درجه حرارت محیط در حالت اول بر حسب سانتیگراد

$T_2$ : درجه حرارت محیط در حالت دوم بر حسب سانتیگراد

A: مقطع هادی بر حسب میلیمتر مربع

$\alpha$ : ضریب انبساطی طولی که برای هادیهای ACSR برابر است با  $10^{-6} \times 8$

E: مدل الاستیسیته بر حسب کیلوگرم بر میلیمتر مربع

$W_1$ : وزن معادل یک متر از طول با احتساب اضافه بارهای ناشی از باد و یخ در حالت اول به کیلوگرم

$W_2$ : وزن معادل یک متر از طول با احتساب اضافه بارهای ناشی از باد و یخ در حالت دوم به کیلوگرم

$H_1$ : کشش هادی در حالت اول به کیلوگرم

$H_2$ : کشش هادی در حالت دوم به کیلوگرم

S: اسپن و یا فاصله بین دو برج به متر

همانطور که قبلاً اشاره شد، به کمک رابطه فوق می‌توان میزان کشش را در شرایط مختلف محیطی زمان سیم‌کشی بدست آورد.

برای این منظور می‌توان فرض نمود که  $H_1$  و  $T_1$  مربوط به شرایط اولیه و  $H_2$  و  $T_2$  مربوط به شرایط جدید (زمان سیم‌کشی)

می‌باشند، که با آگاهی از اطلاعات اولیه می‌توان نسبت به محاسبه  $H_2$  اقدام نمود.

### ۳-۳-۴- فلش هادی

شکم یا فلش هادی و یا میزان افت پایین‌ترین نقطه هادی نسبت به وضعیت افقی هادی از رابطه زیر و با توجه به معادله منحنی

سیم بدست می‌آید:

$$F = \alpha \times \left[ \cosh \frac{S}{2a} - 1 \right] \quad (۸-۳)$$

که در آن:

$$a = \frac{H}{W} \quad (۹-۳)$$

در این روابط:

F: فلش به متر

S: طول اسپن به متر

H: کشش افقی به کیلوگرم

W: وزن واحد طول بر حسب کیلوگرم بر متر

a: پارامتر هادی بر حسب متر

باتوجه به این که در اسپن‌های معمولی معادله منحنی سیم کاتاناری با معادله سهمی یکسان می‌باشد می‌توان فلش سیم را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$F = \frac{S^2}{8a} \quad (۱۰-۳)$$

مقدار H با توجه به درجه حرارت محیط و شرایط بارگذاری در درصد معینی از حد نهایی تحمل هادی (UTS) محدود می‌گردد، تا ضریب اطمینان کافی در زمان سیم‌کشی و همچنین در طول بهره‌برداری لحاظ گردد.

### ۳-۳-۵- تأثیر مقاومت مکانیکی هادی‌ها در ارتفاع برج‌ها

از آنجا که یکی از اهداف تنوع‌زدایی و استاندارد هادی‌ها محدود کردن تعداد آنها می‌باشد، لذا در انتخاب هادی‌ها باید دقت شود که امکان استفاده از آنها در اسپن‌های مختلف عملی باشد. برای رعایت این نکته لازم است مقاومت مکانیکی و در نتیجه مقطع آنها از یک میزان حداقلی کمتر نباشند. لذا بر این مبنا، هادی‌های انتخابی استاندارد ASTM مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها از دیدگاه مکانیکی لازم است شرایط محیطی مشخصی برای طراحی در نظر گرفته شود تا هادی‌های مختلف در آن شرایط مورد بررسی و مقایسه قرار گیرند. البته در عمل ممکن است شرایط محیطی متفاوتی در سطح کشور وجود داشته باشد، اما در این محاسبات چون هدف کنترل کلی هادی‌ها می‌باشد، لذا حساسیتی جهت انتخاب شرایط محیطی دقیق وجود ندارد. ضمن اینکه در موقع طراحی واقعی می‌توان نسبت به محاسبات دقیق‌تر و به کارگیری شرایط محیطی مناسب اقدام نمود. بنابر توضیحات فوق شرایط محیطی انتخابی (شرایط‌سخت) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

قطر یخ: ۲۵ میلی‌متر، سرعت‌باد: ۲۰ متر بر ثانیه، حداقل درجه حرارت: ۲۰- درجه سانتیگراد.

بر این مبنا فلش هادی‌ها محاسبه و در جدول (۳-۱) درج گردید. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود اگر انتخاب هادی برای پاسخگویی در اسپن‌های حدود ۳۰۰ متر با حداکثر فلش ۱۰ متر باشد، حداقل مقطع هادی باید Dove باشد، اما وقتی مقطع هادی از مقطع هادی Curlew فراتر می‌رود در عمل افزایش قطر هادی‌ها تاثیری در کاهش فلش ندارد. به عبارت دیگر انتخاب هادی قطورتر ضمن اینکه فلش را کم نمی‌کند بلکه باعث افزایش وزن برج و حجم فونداسیون می‌گردد که ممکن است در تمام موارد اقتصادی نباشد.

جدول ۳-۱: فلش هادی بر مبنای کشش ماکزیمم ۵۰ درصد تحمل نهایی هادی‌ها

نوع هادی	اسپن به متر						
	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰
Partridge	۱/۸۷	۴/۲۱	۷/۴۹	۱۱/۷۰	۱۶/۸۴	۲۲/۹۳	۲۹/۹۵
Oriole	۱/۳۴	۳/۰۱	۵/۳۵	۸/۳۶	۱۲/۰۴	۱۶/۳۹	۲۱/۴۰
Ibis	۱/۴۸	۳/۳۲	۵/۹۰	۹/۲۳	۱۳/۲۸	۱۸/۰۸	۲۳/۶۲
Hawk	۱/۳۱	۲/۹۵	۵/۲۵	۸/۲۰	۱۱/۸۱	۱۶/۰۷	۲۰/۹۹
Dove	۱/۲۰	۲/۶۹	۴/۷۸	۷/۴۹	۱۰/۷۶	۱۴/۶۵	۱۹/۱۳
Squab	۱/۱۶	۲/۶۰	۴/۶۳	۷/۲۳	۱۰/۴۲	۱۴/۱۸	۱۸/۵۲
Drake	۱/۲۰	۲/۶۹	۴/۷۸	۷/۴۹	۱۰/۷۶	۱۴/۶۵	۱۹/۱۳
Canary	۱/۰۲	۲/۳۰	۴/۰۸	۶/۳۸	۹/۱۹	۱۲/۵۱	۱۶/۳۴
Cardinal	۰/۹۹	۲/۲۲	۳/۹۵	۶/۱۷	۸/۸۹	۱۲/۱۰	۱۵/۸۰
Curlew	۰/۹۵	۲/۱۴	۳/۸۱	۵/۹۵	۸/۵۷	۱۱/۶	۱۵/۲۳
Finch	۰/۹۲	۲/۰۷	۳/۶۸	۵/۷۵	۸/۲۸	۱۱/۲۸	۱۴/۷۳
Martin	۰/۸۶	۱/۹۴	۳/۴۵	۵/۳۸	۷/۶۷۵	۱۰/۵۵	۱۳/۷۸
Parrot	۰/۸۵	۱/۹۲	۳/۴۱	۵/۳۳	۷/۸	۱۰/۴۵	۱۳/۶۵
Chukar	۰/۸۷	۱/۹۵	۳/۴۷	۵/۴۳	۷/۸۱	۱۰/۶۳	۱۳/۸۹
Thrasher	۰/۹۶	۲/۱۵	۳/۸۲	۵/۹۷	۸/۶۰	۱۱/۷۰	۱۵/۲۹

بنابراین گرچه با انتخاب خطوط نیرو به صورت باندل، امکان تقلیل قطر هادی‌ها میسر است، اما از سایر دیدگاهها به خصوص استفاده از برج‌های استاندارد و مسائل اقتصادی، تقلیل فواصل پایه‌ها برای ولتاژ بالا موجه نمی‌باشد. به عنوان مثال همانطور که جدول (۳-۱) نشان می‌دهد، اگر از هادی مثلاً Partridge در خطوط انتقال ۴۰۰ کیلوولت باندل استفاده شود، چون مقاومت مکانیکی این هادی محدود است لذا امکان استفاده آن در اسپن‌های طولانی موجه نمی‌باشد. بر این اساس بهتر است در هر سطحی از ولتاژ مقاطع هادی‌ها از حداقلی که در جدول (۳-۲) نشان داده شده است، کمتر نباشد. گرچه در عمل ممکن است توجه به دیدگاههای فنی و اقتصادی و همچنین شرایط آب و هوایی مسیر، هادی‌های دیگری را موجه سازد، اما در استاندارد و تنوع‌زایی هادی‌ها لازم است این مقادیر حداقل در محاسبات منظور گردد.

جدول ۳-۲: حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه تحمل مکانیکی

مقطع مناسب هادی‌ها	سطوح ولتاژ (کیلوولت)
Partridge-266KCM	۶۳
Oriole – 336 KCM	۱۳۲
Hawk – 477 KCM	۲۳۰
Squab-605 KCM	۴۰۰



### ۳-۴- نقش جریانهای اتصال کوتاه در تعیین حداقل مقطع هادی‌ها

وقوع اتصال کوتاه سبب می‌شود تا دهها برابر جریان مجاز هادی‌ها از آنها عبور نماید. بنابراین در استاندارد و تنوع‌زدایی هادی‌ها باید به این نکته مهم توجه گردد که حتی اگر سایر عوامل محدودیت‌ساز، حداقل مقطع مشخصی را برای هادی‌ها مجاز بدانند، این مقطع حداقل باید قادر باشد جریانهای بالا را از خود عبور دهد، در غیر این صورت مقطع حداقل باید تا حدی که جریانهای اتصال کوتاه معین می‌کنند، افزایش یابند.

در خطوط نیرو عبور جریان الکتریکی سبب ایجاد تلفات الکتریکی و در نتیجه گرما می‌گردد. این گرما ممکن است در اثر عبور جریانهای عادی، جریانهای اتصال کوتاه و یا عبور جریانهای ناشی از برخورد صاعقه به هادی‌ها ایجاد گردد.

اگر درجه حرارت هادی‌ها از میزان معینی که سازندگان تعیین می‌کنند افزایش یابد، باعث می‌شود تا هادی‌ها مشخصات اولیه خود را از دست بدهند و هر چه این اختلاف درجه حرارت بیشتر باشد میزان تخریب هادی‌ها نیز افزایش می‌یابد. درجه حرارت مجاز هادی‌ها تابعی از زمان تداوم عبور جریان از آنها است. به عنوان مثال، حداکثر درجه حرارت هادی‌های ACSR/GS در برابر بارهای پیوسته حدود ۹۰ درجه سانتیگراد است، اما درجه حرارت مجاز همین نوع هادی در کوتاه مدت می‌تواند ارقام دیگری را به خود اختصاص دهد. جدول (۳-۳) تحمل حرارت هادی‌های متداول در خطوط نیرو را بر حسب اینکه بار عبوری از هادی‌ها مداوم، اضطراری یا اتصال کوتاه باشد را نشان می‌دهد.

همانطور که جدول (۳-۳) نشان می‌دهد، در شرایطی که تحمل حرارتی هادی‌های ACSR/GS در بار پیوسته یا مداوم حدود ۹۰ درجه سانتیگراد است، در شرایط اضطراری اگر جریان عبوری از هادی‌ها به بیش از حد جریان مجاز هادی‌ها افزایش یابد، هادی‌ها می‌توانند تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد را به مدت ۳۰ دقیقه تحمل نمایند بدون اینکه تغییری در مشخصه آنها بوجود آید و همچنین در مقابل جریانهای اتصال کوتاه به مدت ۲ ثانیه می‌توانند تا ۱۸۰ درجه را تحمل نمایند. بنابراین در تعیین حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه عبور جریانهای اتصال کوتاه باید به این نکات مهم توجه شود.

جدول ۳-۳: حداکثر درجه حرارت مجاز هادی‌ها در شرایط مختلف بهره‌برداری به درجه سانتیگراد

نوع هادی	درجه حرارت عبور مداوم جریان	درجه حرارت اضطراری ۳۰ دقیقه	درجه حرارت در اتصال کوتاه ۲ ثانیه	درجه حرارت طراحی خطوط
ACSR	۹۰	۱۲۰	۱۸۰	۶۰-۹۰
AAC	۹۰	۱۲۰	۱۸۰	۶۰-۹۰
AAAC	۹۰	۱۰۰	۱۵۰	۶۰-۹۰
TRCSR*	۱۵۰	۱۸۰	۲۶۰	۹۰-۱۵۰
AS**	۱۰۰-۱۵۰	۱۵۰-۲۰۰	۲۰۰-۴۰۰	۴۰-۵۵
GS**	۱۰۰	۱۲۰	۲۰۰	۴۰-۵۵

\* آلیاژ آلومینیوم مقاوم در مقابل حرارت (THERMAL RESISTANCE ALUMINUM ALLOY)

\*\* معمولاً به عنوان سیم محافظ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۴-۱- عوامل موثر در تعیین حداقل مقطع از دیدگاه اتصال کوتاه

برای محاسبه حداقل مقطع مناسب هادی‌ها لازم است مقادیر جریانهای اتصال کوتاه و زمان تداوم عبور آنها در دست باشد. اما در عمل مقدار جریان اتصال کوتاه با توجه به محل وقوع عیب و موقعیت مکانی آن در شبکه می‌تواند ارقام مختلفی را دارا باشد.

#### - جریان اتصال کوتاه

تجارب بهره‌برداری از شبکه‌های برقرسانی در کشور نشان می‌دهد که مقادیر جریان اتصال کوتاه ضمن اینکه به موقعیت مکانی خط نیرو در شبکه بستگی دارند، به سطوح ولتاژ نیز وابسته می‌باشند. بطور متعارف حداکثر جریان اتصال کوتاه در خطوط ۴۰۰ کیلوولت بیشتر از خطوط ۶۳ کیلوولت است. جدول (۳-۴) مقادیر قابل انتظار جریان اتصال کوتاه را در سطوح مختلف ولتاژ نشان می‌دهد، البته ممکن است سطح اتصال کوتاه بسیاری از خطوط نیرو حتی در دراز مدت هم به ارقام فوق نرسد.

جدول ۳-۴: محدوده جریانهای اتصال کوتاه و زمان قطع سیستمهای حفاظتی شبکه کشور

زمان رفع عیب (ثانیه)	جریان اتصال کوتاه (کیلوآمپر)	سطح ولتاژ (کیلوولت)
۰/۱۰-۰/۲۰	۵۰	۴۰۰
۰/۲۰-۰/۳۰	۴۰	۲۳۰
۰/۲۵-۰/۳۵	۳۱/۵	۱۳۲
۰/۳۰-۰/۴۰	۲۰	۶۳

#### - زمان رفع عیب

عامل دیگری که در تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها دخالت دارد، زمان رفع عیب از خطوط است. زمان تداوم جریان اتصال کوتاه به عملکرد رله‌های حفاظتی و کلیدهای قطع بار بستگی دارند. گرچه عملکرد بعضی از رله‌های جدید قابل استفاده در سیستم ۴۰۰ کیلوولت به حدود یک سیکل و کلیدهای قطع بار به حدود دو سیکل (جمعاً سه سیکل) رسیده است اما در شبکه موجود کشور، کلیدهایی با زمان عملکرد قطع بیشتر نیز وجود دارند، که تفکیک آنها در سطوح مختلف ولتاژ (برای اکثر سیستمهای حفاظتی) در جدول (۳-۴) نشان داده شده است. ارقام مندرج در این جدول بر مبنای حداکثر زمان قطع تنظیم گردیده است.

### ۳-۴-۲- محاسبه حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه اتصال کوتاه

در خطوط انتقال نیرو حتی اگر بار الکتریکی عبوری از آنها بسیار پایین باشد، مقاطع هادی‌ها نباید از یک میزان حداقلی که از رابطه زیر بدست می‌آید کمتر انتخاب گردد، چون در غیر اینصورت جریانهای اتصال کوتاه باعث تخریب هادی‌ها می‌شوند.

$$S = \frac{I_{sc} \cdot \sqrt{t}}{K} \quad (۳-۱۱)$$

در این رابطه S حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه جریان اتصال کوتاه برحسب میلیمتر مربع و  $I_{sc}$  حداکثر جریان اتصال کوتاه برحسب آمپر و t زمان تداوم عبور جریان اتصال کوتاه برحسب ثانیه می‌باشد و K ضریبی است که به جنس هادی وابسته است.

مقادیر این پارامتر برای هادی‌های مختلف در جدول (۳-۵) درج گردیده است. همانطور که از این جدول مشهود است مقدار K برحسب اینکه جنس فلز و آلیاژ آن چه باشد در دامنه وسیعی تغییر می‌کند.

جدول ۳-۵: مقادیر K برای هادی‌های مختلف

مقدار K	نوع هادی
۸۵	ACSR
۱۱۱	AAC
۹۳	AAAC
۲۲	AS
۴۹	GS

برای تعیین حداقل مقطع مناسب از دیدگاه جریان اتصال کوتاه و همچنین افزایش ضریب اطمینان و حفظ مشخصه مکانیکی هادی‌ها، بهتر است زمان رفع عیب از خطوط نیرو با توجه به عملکرد تاخیری رله‌ها در نظر گرفته شود. گرچه با گسترش شبکه‌های برقرسانی از یک طرف سطوح اتصال کوتاه افزایش می‌یابد، اما از طرف دیگر با پیشرفت تکنولوژی ساخت، زمان عملکرد رله‌ها و کلیدهای قطع نیز کاهش می‌یابند. این عمل باعث می‌شود که حداقل مقطع مناسب از این دیدگاه افزایش نیابد. با توجه به اینکه میزان جریان اتصال کوتاه و زمان تداوم آن ممکن است ارقام متفاوتی را به خود اختصاص دهند، لذا به کمک رابطه (۳-۱۱) حداقل مقاطع هادی‌ها برای چند سطح مختلف ولتاژ محاسبه و سپس با توجه به هادی‌های استاندارد نزدیکترین مقاطع تعیین و هر دو مقدار در جداول (۳-۶)، (۳-۷)، (۳-۸) و (۳-۹) درج گردیده است. همانطور که نتایج محاسبات مندرج نشان می‌دهند، عملاً جریان اتصال کوتاه عامل محدودکننده‌ای برای تعیین مقطع هادی‌ها در سطوح ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت نیست. گرچه جریانهای زیاد، مقطع هادی را افزایش می‌دهند اما باز هم کوچکتر از مقاطعی است که با توجه به سایر دیدگاهها بدست می‌آید. ضمناً در صورتی که مقطع هادی‌ها برای عبور جریانهای اتصال کوتاه طراحی شوند، معمولاً در برابر عبور جریان صاعقه که از نظر مقدار ۲ تا ۳ برابر ولی از نظر زمان تداوم بسیار کمتر می‌باشد، نیز جوابگو می‌باشند.

جدول ۳-۶: حداقل مقطع هادی از دیدگاه جریان اتصال کوتاه در خطوط انتقال ۶۳ کیلوولت

کد هادی	مقطع استاندارد (kCM)	مقطع محاسباتی (میلیمترمربع)	زمان تداوم جریان (ثانیه)	جریان اتصال کوتاه (کیلوآمپر)
Penguin	۲۱۱/۶	۹۶/۶	۰/۳۰	۱۵
Waxwing	۲۶۶/۸	۱۲۸/۹	۰/۳۰	۲۰
Partridge	۲۶۶/۸	۱۶۱/۱	۰/۳۰	۲۵
Patridge	۲۱۱/۶	۱۰۴/۴	۰/۳۵	۱۵
Waxwing	۲۶۶/۸	۱۳۹/۲	۰/۳۵	۲۰
Ostrich	۳۰۰/۰	۱۷۴/۰	۰/۳۵	۲۵
Waxwing	۲۶۶/۸	۱۱۱/۶	۰/۴۰	۱۵
Partridge	۲۶۶/۸	۱۴۸/۸	۰/۴۰	۲۰
Linnet	۳۶۶/۴	۱۸۶/۰	۰/۴۰	۲۵

جدول ۳-۷: حداقل مقطع هادی از دیدگاه جریان اتصال کوتاه در خطوط انتقال ۱۳۲ کیلوولت

کد هادی	مقطع استاندارد (kCM)	مقطع محاسباتی (میلیمترمربع)	زمان تداوم جریان (ثانیه)	جریان اتصال کوتاه (کیلوآمپر)
Waxwing	۲۶۶/۸	۱۳۷/۷	۰/۱۵	۳۰
Partridge	۲۶۶/۸	۱۵۹/۵	۰/۱۵	۳۵
Linnet	۳۳۶/۴	۱۸۲/۲	۰/۱۵	۴۰
Patridge	۲۶۶/۸	۱۵۷/۸	۰/۲۰	۳۰
Linnet	۳۳۶/۴	۱۸۴/۱	۰/۲۰	۳۵
Oriole	۳۳۶/۴	۲۱۰/۴	۰/۲۰	۴۰
Ostrich	۳۰۰/۰	۱۷۶/۵	۰/۲۵	۳۰
Oriole	۳۳۶/۴	۲۰۵/۹	۰/۲۵	۳۵
Ibis	۳۹۷/۵	۲۳۵/۳	۰/۲۵	۴۰

جدول ۳-۸: حداقل مقطع هادی از دیدگاه جریان اتصال کوتاه در خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت

کد هادی	مقطع استاندارد (kCM)	مقطع محاسباتی (میلی‌متر مربع)	زمان تداوم جریان (ثانیه)	جریان اتصال کوتاه (کیلوآمپر)
Waxwing	۲۶۶/۸	۱۱۷/۶	۰/۲۵	۲۰
Partridge	۲۶۶/۸	۱۴۷/۰	۰/۲۵	۲۵
Ostrich	۳۰۰/۰	۱۷۶/۵	۰/۲۵	۳۰
Waxwing	۲۶۶/۸	۱۲۸/۹	۰/۳۰	۲۰
Ostrich	۳۰۰/۰	۱۶۱/۱	۰/۳۰	۲۵
Linnet	۳۳۶/۴	۱۹۳/۳	۰/۳۰	۳۰
Waxwing	۲۶۶/۸	۱۳۹/۲	۰/۳۵	۲۰
Ostrich	۳۰۰/۰	۱۷۴/۰	۰/۳۵	۲۵
Oriole	۳۳۶/۴	۲۰۸/۸	۰/۳۵	۳۰

جدول ۳-۹: حداقل مقطع هادی از دیدگاه جریان اتصال کوتاه در خطوط انتقال ۴۰۰ کیلوولت

کد هادی	مقطع استاندارد (kCM)	مقطع محاسباتی (میلی‌متر مربع)	زمان تداوم جریان (ثانیه)	جریان اتصال کوتاه (کیلوآمپر)
Partridge	۲۶۶/۸	۱۴۸/۸	۰/۱۰	۴۰
Oriole	۳۰۰/۰	۱۶۷/۴	۰/۱۰	۴۵
Linnet	۳۳۶/۴	۱۸۶/۰	۰/۱۰	۵۰
Linnet	۳۳۶/۴	۱۸۲/۲	۰/۱۵	۴۰
Oriole	۳۳۶/۴	۲۰۵/۰	۰/۱۵	۴۵
Brant	۳۹۷/۵	۲۲۷/۸	۰/۱۵	۵۰
Oriole	۳۳۶/۴	۲۱۰/۴	۰/۲۰	۴۰
Ibis	۳۹۷/۵	۲۳۶/۷	۰/۲۰	۴۵
Flicker	۴۷۷/۰	۲۶۲/۰	۰/۲۰	۵۰

### ۳-۴-۳- حداقل مقطع هادی‌ها در خطوط باندل

در خطوط انتقال باندل، تصور اولیه این است که جریان اتصال کوتاه به نسبت تعداد هادی‌ها تقسیم شود، به عنوان مثال اگر جریان اتصال کوتاه در یک خط انتقال تک سیمه ۴۰ کیلوآمپر است، وقتی این خط به صورت باندل چهارتایی ساخته شود جریان عبوری از هر هادی تقریباً به ۱۰ کیلوآمپر تقلیل می‌یابد. اما در عمل چون امیدانس خط انتقال به یک چهارم کاهش نمی‌یابد دلیلی وجود ندارد که جریان عبوری به حدود یک چهارم مقدار اولیه برسد ضمن اینکه در برخی موارد ممکن است با توجه به نوع جریان اتصال کوتاه جریان عبوری از هادی‌ها بسیار بالاتر از یک چهارم جریان اتصال کوتاه باشد.

در خطوط نیرو جریان اتصال کوتاه ممکن است به دلایل مختلفی به وجود آیند که از جمله می‌توان به برخورد دو فاز با هم یا فاز با زمین یا سیم محافظ را نام برد. در صورت وقوع چنین حوادثی در خطوط باندل، جریان اتصال کوتاه تا محل فاصله نگهدارها ممکن

است تنها از یک هادی عبور کند لذا در خطوط بانددل برای حفظ سلامت هادی‌ها و رعایت قابلیت اطمینان کافی بهتر است جریان اتصال کوتاه عبوری از هادی‌ها در خطوط ساده و بانددل تقریباً یکسان در نظر گرفته شوند. ضمناً با توجه به اینکه در خطوط بانددل با افزایش تعداد هادی‌های فرعی می‌توان از هادی‌های با سطح مقطع کوچکتری نیز استفاده نمود لذا در چنین مواردی باید به تحمل هادی‌ها در مقابل جریانهای اتصال کوتاه نیز توجه نمود.

### ۳-۴-۴- نتیجه مقدماتی

همانطور که جداول (۳-۶) و (۳-۷) و (۳-۸) و (۳-۹) نشان می‌دهند در سطوح ولتاژ ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت حداقل مقاطع هادی‌ها که از دیدگاه تحمل اتصال کوتاه به دست می‌آیند نزدیک به مقاطع متداول در شبکه‌های برقرسانی موردنظر می‌باشند، اما در سطوح ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت دیدگاههای دیگر مقاطع قطورتری را دیکته می‌کنند. به عبارت دیگر در مقایسه با سایر عوامل محدودکننده، جریان اتصال کوتاه تأثیری در انتخاب هادی برای سطوح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت و بالاتر ندارد. اما اگر قرار باشد از هادی‌های با قطر کم در خطوط نیرو به صورت بانددل استفاده شود لازم است قطر هادی از ارقام مندرج در جدول (۳-۱۰) که در حقیقت بالاترین مقاطع جدول (۳-۶) می‌باشند، کمتر نباشد.

همانطور که در بالا اشاره گردید گرچه در خطوط بانددل، احتمال عبور جریان اتصال کوتاه بالا در هر هادی میسر می‌باشد، اما بهرحال مقدار آن کمتر از حدی است که در خطوط ساده (یک هادی در هر فاز) عبور می‌کند. بنابر این اگر هدف انتخاب حداقل یک هادی برای سطوح ولتاژ ۶۳ و ۱۳۲ و ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت باشد، می‌توان هادی Partridge با کد 266.8 KCM را انتخاب نمود. در هر حال در حالت کلی هادی‌های مناسب در جدول (۳-۱۰) نشان داده شده است.

جدول ۳-۱۰: مقاطع مناسب از دیدگاه جریان اتصال کوتاه در سطوح مختلف ولتاژ

کد هادی	مقطع هادی‌ها (kCM)	سطوح ولتاژ (کیلوولت)
Partridge	۲۶۶/۸	۶۳
Oriole	۳۳۶/۴	۱۳۲
Ibis	۳۹۷/۵	۲۳۰
Hawk	۴۷۷/۵	۴۰۰

چون هدف از تهیه این بخش ارائه حداقل مقاطع هادی‌ها از دیدگاههای مختلف می‌باشند، لذا انتخاب چند هادی مشخص از دیدگاه جریان اتصال کوتاه به مفهوم مناسب بودن آنها از سایر دیدگاهها نیست، بلکه این اقدام کمکی در محدودسازی تعداد هادی‌های استاندارد در جهت کاهش جایگزین‌ها در مطالعات بعدی می‌باشد.

جدول ۳-۱۱: مقاطع مناسب از دیدگاه جریان اتصال کوتاه و مقاومت مکانیکی هادی‌ها

کد	مقطع هادی‌ها (kCM)	سطوح ولتاژ (کیلوولت)
Partridge	۲۶۶/۸	۶۳
Oriole	۳۳۶/۴	۱۳۲
Hawk	۴۷۷/۵	۲۳۰
Squab	۶۰۵/۰	۴۰۰

### ۳-۵- تعیین حداقل مقاطع هادی‌ها از دیدگاه پدیده کرونا

پدیده کرونا یکی از عوامل مؤثر در تعیین هادی‌های مورد استفاده در خطوط نیرو است. برای کنترل پدیده کرونا لازم است مقاطع هادی‌ها طوری انتخاب شوند که میدان الکتریکی و یا گرادیان ولتاژ در اطراف آنها باعث شکست هوا نگردد. در صورت وقوع چنین حالتی پدیده کرونا ظاهر شده که می‌تواند باعث تولید حرارت، نور و صدا گردد. علاوه بر موارد فوق این پدیده سبب ایجاد اغتشاشات در امواج رادیویی، تلویزیونی و مخابراتی نیز می‌گردد.

#### ۳-۵-۱- عوامل مؤثر در شکست هوا

آزمون‌های انجام شده نشان می‌دهد وقتی گرادیان ولتاژ در اطراف هادی‌ها در شرایط استاندارد از مقدار ۲۱/۲۱ کیلوولت بر سانتیمتر تجاوز نماید پدیده کرونا آغاز می‌شود و هر چه فاصله این رقم از عدد ۲۱/۲۱ بیشتر باشد، بر میزان تلفات کرونا و اغتشاشات ناشی از آن افزوده می‌گردد.

در شرایط استاندارد برای درجه حرارت محیط، فشار هوا، درجه خلوص و میزان رطوبت هوا مقادیر مشخصی تعیین گردیده است و طبیعی است در صورت تغییر هر یک از عوامل فوق‌الذکر حد شکست هوا در اطراف هادی تغییر می‌کند که در ذیل به طور اختصار به چند عامل مهم از آن اشاره می‌گردد.

#### - درجه حرارت محیط

در صورتی که درجه حرارت محیط افزایش یابد، حد یونیزه شدن هوا از رقم ۲۱/۲۱ به عدد کمتری کاهش می‌یابد. در حالت کلی اگر مقدار گرادیان ولتاژ بحرانی را در شرایط استاندارد را با  $g_c$  نشان دهیم گرادیان ولتاژ بحرانی در شرایط منطقه از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$g_c = \delta \cdot g_s \quad (۳-۱۲)$$

در این رابطه  $g_c$  گرادیان ولتاژ بحرانی در شرایط منطقه و  $\delta$  چگالی هوا می‌باشد که در شرایط دلخواه مقدار آن از رابطه (۳-۱۳) بدست می‌آید.

$$\delta = \frac{3.92p}{273 + t_a} \quad (۳-۱۳)$$

در این روابط:

$\delta$ : چگالی هوا در درجه حرارت  $t_a$

$t_a$ : درجه حرارت محیط بر حسب درجه سانتیگراد

$P$ : فشار هوا بر حسب سانتیمتر جیوه

با توجه به رابطه (۳-۱۳) می‌توان تاثیر درجه حرارت محیط را در حد شکست هوا بدست آورد. جدول (۳-۱۲) چگالی نسبی هوا و حد شکست هوا را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱۲: تاثیر تغییرات درجه حرارت محیط در شکست هوا (در ارتفاع سطح دریا)

حد شکست هوا (کیلوولت بر سانتیمتر)	چگالی نسبی هوا	درجه حرارت محیط (سانتیگراد)
۲۳/۱۴	۱/۰۹۲	۰
۲۲/۷۲	۱/۰۷۲	۵
۲۲/۳۲	۱/۰۵۳	۱۰
۲۱/۹۴	۱/۰۳۵	۱۵
۲۱/۵۶	۱/۰۱۷	۲۰
۲۱/۲۱	۱/۰۰۰	۲۵
۲۰/۸۵	۰/۹۸۳	۳۰
۲۰/۵۱	۰/۹۶۸	۳۵
۲۰/۱۸	۰/۹۵۲	۴۰
۱۹/۸۷	۰/۹۳۷	۴۵
۱۹/۵۶	۰/۹۲۳	۵۰
۱۹/۲۶	۰/۹۰۹	۵۵

#### – ارتفاع منطقه

علاوه بر درجه حرارت محیط، ارتفاع محل نصب خطوط نیرو نیز عامل موثری در تغییر حد شکست هوا می‌باشد. دلیل این تأثیرگذاری تقلیل فشار هوا و در نتیجه کاهش چگالی نسبی هوا در ارتفاعات بالا می‌باشد. رابطه (۳-۱۳) نشان می‌دهد با کاهش مقدار  $p$  مقدار  $\delta$  نیز تقلیل می‌یابد که نتیجتاً در شکست هوا تأثیر می‌گذارد. برای محاسبه فشار هوا بر حسب ارتفاع محل نصب می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$p = p_0 \cdot \left(1 - \frac{h}{44300}\right)^{5.25} \quad (۳-۱۴)$$

در این رابطه:

$h$ : ارتفاع محل نصب بر حسب متر

$p_0$ : فشار هوا در شرایط سطح دریا برابر با ۷۶ سانتیمتر جیوه

$p$ : فشار هوا در ارتفاع  $h$  بر حسب سانتیمتر جیوه



## - ارتفاع و درجه حرارت منطقه

با توجه به اینکه معمولاً در طول مسیر خطوط نیرو ضمن اینکه درجه حرارت هوا تغییر می‌کند، ارتفاع محل نصب نیز متغیر خواهد بود، به همین دلیل باید چگالی نسبی و حد شکست هوا با توجه به تغییرات هر دو عامل فوق‌الذکر محاسبه گردد. جداول (۱۳-۳) و (۱۴-۳) تاثیر تغییرات دو عامل درجه حرارت و فشار هوا را در چگالی نسبی هوا و حد شکست هوا نشان می‌دهند. همانطور که این جداول نشان می‌دهند با تغییر دو عامل فوق‌الذکر حد شکست هوا بسیار کمتر از رقم  $21/2$  کیلوولت بر سانتیمتر خواهد شد. بعنوان مثال برای منطقه‌ای با ارتفاع ۱۰۰۰ متر و درجه حرارت ۴۰ درجه سانتیگراد (تقریباً شرایط شهر تهران) چگالی نسبی هوا به عدد  $0/845$  و حد شکست هوا از رقم  $21/2$  به عدد  $17/92$  تقلیل می‌یابد.

جدول ۳-۱۳: تاثیر تغییرات درجه حرارت محیط و ارتفاع محل نصب در ولتاژ شکست هوا

ارتفاع محل نصب خطوط انتقال نیرو نسبت به سطح دریا بر حسب متر							درجه حرارت محیط
۳۰۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	سطح دریا	
۱۶/۰۲	۱۷/۰۸	۱۸/۱۶	۱۹/۳۲	۲۰/۳۸	۲۱/۸۱	۲۳/۱۶	۰
۱۵/۷۴	۱۶/۷۶	۱۷/۸۴	۱۸/۹۸	۲۰/۱۷	۲۱/۴۲	۲۲/۷۴	۵
۱۵/۴۶	۱۶/۴۶	۱۷/۵۲	۱۸/۶۵	۱۹/۸۱	۲۱/۰۴	۲۲/۳۳	۱۰
۱۵/۱۹	۱۶/۱۸	۱۷/۲۲	۱۸/۳	۱۹/۴۷	۲۰/۶۸	۲۱/۹۶	۱۵
۱۴/۹۳	۱۵/۹۱	۱۶/۹۳	۱۸/۰۱	۱۹/۱۳	۲۰/۲۸	۲۱/۵۷	۲۰
۱۴/۶۸	۱۵/۶۳	۱۶/۶۵	۱۷/۷۱	۱۸/۸۱	۱۹/۹۸	۲۱/۲۱	۲۵
۱۴/۴۵	۱۵/۳۸	۱۶/۱۰	۱۷/۴۲	۱۸/۴۹	۱۹/۶۶	۲۰/۸۵	۳۰
۱۴/۲۱	۱۵/۱۲	۱۵/۸۵	۱۷/۱۲	۱۸/۲۰	۱۹/۳۵	۲۰/۵۳	۳۵
۱۳/۹۸	۱۴/۸۹	۱۵/۵۹	۱۶/۸۶	۱۷/۹۲	۱۹/۰۳	۲۰/۱۹	۴۰
۱۳/۷۵	۱۴/۶۶	۱۵/۳۶	۱۶/۵۹	۱۷/۶۲	۱۸/۷۳	۱۹/۸۸	۴۵
۱۳/۵۳	۱۴/۴۲	۱۵/۱۲	۱۶/۳۳	۱۷/۳۵	۱۸/۴۳	۱۹/۵۸	۵۰
۱۳/۳۴	۱۴/۲۱	۱۴/۲۸	۱۶/۰۸	۱۷/۰۹	۱۸/۱۶	۱۹/۲۸	۵۵

جدول ۳-۱۴: تاثیر تغییرات درجه حرارت محیط و ارتفاع محل نصب در چگالی نسبی هوا

ارتفاع محل نصب خطوط انتقال نیرو نسبت به سطح دریا بر حسب متر							درجه حرارت محیط
۳۰۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	سطح دریا	
۰/۷۵۵	۰/۸۰۵	۰/۸۵۶	۰/۹۱۱	۰/۹۶۸	۱/۰۲۸	۱/۰۹۲	۰
۰/۷۴۲	۰/۷۹۰	۰/۸۴۱	۰/۸۹۵	۰/۹۵۱	۱/۰۱۰	۱/۰۷۲	۵
۰/۷۳۹	۰/۷۷۶	۰/۸۲۶	۰/۸۷۹	۰/۹۳۴	۰/۹۹۲	۱/۰۵۳	۱۰
۰/۷۱۶	۰/۷۶۳	۰/۸۱۲	۰/۸۶۴	۰/۹۱۸	۰/۹۷۵	۱/۰۳۵	۱۵
۰/۷۰۴	۰/۷۵۰	۰/۷۹۸	۰/۸۴۹	۰/۹۰۲	۰/۹۵۶	۱/۰۱۷	۲۰
۰/۶۹۲	۰/۷۳۷	۰/۷۸۵	۰/۸۳۵	۰/۸۸۷	۰/۹۴۲	۱/۰۰۰	۲۵
۰/۶۸۱	۰/۷۲۵	۰/۷۵۹	۰/۸۲۱	۰/۸۷۲	۰/۹۲۷	۰/۹۸۳	۳۰
۰/۶۷۰	۰/۷۱۳	۰/۷۴۷	۰/۸۰۷	۰/۸۵۸	۰/۹۱۲	۰/۹۶۸	۳۵
۰/۶۵۹	۰/۷۰۲	۰/۷۳۵	۰/۷۹۵	۰/۸۴۵	۰/۸۹۷	۰/۹۵۲	۴۰
۰/۶۴۸	۰/۶۹۱	۰/۷۲۴	۰/۷۸۲	۰/۸۳۱	۰/۸۸۳	۰/۹۳۷	۴۵
۰/۶۳۸	۰/۶۸۰	۰/۷۱۳	۰/۷۷۰	۰/۸۱۸	۰/۸۶۹	۰/۹۲۳	۵۰
۰/۶۲۹	۰/۶۷۰	۰/۷۰۹	۰/۷۵۸	۰/۸۰۶	۰/۸۵۶	۰/۹۰۹	۵۵

### – سایر عوامل

علاوه بر درجه حرارت محیط و ارتفاع منطقه که در یونیزه شدن هوا موثر است، پارامترهای متعدد دیگری نیز در این زمینه دخالت دارند که از آن جمله می‌توان به رطوبت هوا و میزان آلودگی هوا نیز اشاره نمود. به عنوان مثال در روزهای بارانی، شرجی، برفی یا روزهای مه آلوده، ولتاژ شکست هوا کاهش و در نتیجه تلفات کرونا شدیداً افزایش می‌یابند. گرچه در روزهای بارانی گرادیان ولتاژ شدیداً افزایش می‌یابد، اما در انتخاب مقاطع هادی‌ها به دلایل اقتصادی سعی بر کنترل گرادیان ولتاژ در چنین روزهایی نخواهد بود. اما در مناطقی که تعداد روزهای بارانی یا درصد رطوبت هوا بالا باشد، باید مقاطع هادی‌ها قدری بزرگتر از دیگر مناطق انتخاب شوند، تا در ساعات بیشتری از سال بتوان پدیده کرونا را کنترل نمود. برای ایجاد چنین شرایطی لازم است مقدار گرادیان ولتاژ در سطح هادی‌ها کمتر از ۲۱/۲۱ کیلوولت بر سانتیمتر در نظر گرفته شود.

### ۳-۵-۲- گرادیان ولتاژ در سطح هادی‌ها

همانطور که قبلاً اشاره گردید برای کنترل پدیده کرونا لازم است مقدار گرادیان ولتاژ در سطح هادی‌ها از رقم مشخصی که وابسته به شرایط محیط می‌باشد، بیشتر نباشد. بطور کلی مقدار گرادیان ولتاژ در سطح هادی‌های رشته‌ای را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$g = \frac{V}{r \cdot \ln(GMD/r)} \quad (۱۵-۳)$$

در این رابطه:

g: گرادیان ولتاژ در سطح هادی بر حسب کیلوولت بر سانتیمتر

V: ولتاژ فاز به زمین بر حسب کیلوولت

GMD: فاصله متوسط هندسی فازها به سانتیمتر

r: شعاع هادی به سانتیمتر

برای محاسبه گرادیان ولتاژ در خطوط انتقال باندل، رابطه بالا باید به صورت زیر اصلاح گردد:

$$g = \frac{K.V}{ns.r.\ln(GMD/r_b)} \quad (۱۶-۳)$$

در این رابطه g و V و GMD مطابق تعاریف قبلی می‌باشند و ns تعداد هادی‌های هر فاز و مقادیر K و r<sub>b</sub> را می‌توان از

روابط زیر بدست آورد:

$$K = 1 + \frac{2r}{ds} \cdot (ns - 1) \cdot \sin(\pi/ns) \quad (۱۷-۳)$$

$$r_b = \left[ ns.r. \left( \frac{ds}{2\sin(\pi/ns)} \right)^{ns-1} \right]^{1/ns} \quad (۱۸-۳)$$

که در این رابطه ds فاصله هادی‌های فرعی در خطوط انتقال باندل و بر حسب سانتیمتر می‌باشد.

### ۳-۵-۳- تعیین مقدار گرادیان ولتاژ

برای اینکه پدیده کرونا و اغتشاشات رادیویی ناشی از آن در محیط اطراف تقلیل یابند لازم است در هر سطحی از ولتاژ مقدار گرادیان ولتاژ از حد معینی تجاوز ننماید. اما همانطور که قبلاً اشاره گردید، گرادیان بحرانی ولتاژ یا حد یونیزاسیون هوا به عوامل متعددی از جمله درجه حرارت محیط، ارتفاع منطقه، درجه آلودگی و رطوبت هوا بستگی دارد و بر حسب اینکه هوا بارانی، برفی، مه‌آلود، شرجی یا آفتابی باشد تلفات کرونا و گرادیان ولتاژ در دامنه وسیعی تغییر می‌کنند. بنابراین در انتخاب حداقل مقاطع هادی‌ها لازم است شرایط مشخصی برای محاسبه گرادیان بحرانی ولتاژ تعیین گردد.

اگر شرایط استاندارد یعنی ارتفاع در سطح دریا و درجه حرارت ۲۵ درجه سانتیگراد ملاک محاسبه گرادیان ولتاژ قرار گیرد، مسلماً در تمامی ساعاتی که درجه حرارت بالای ۲۵ درجه سانتیگراد است و یا در مناطقی که ارتفاع بیش از سطح دریا باشد، پدیده کرونا و اغتشاشات ناشی از آن ظاهر می‌گردد که نمی‌تواند معقول و منطقی باشد. اما اگر ماکزیمم درجه حرارت و ارتفاع منطقه برای محاسبه گرادیان ولتاژ لحاظ گردد، مسلماً در کلیه روزهایی که هوا آفتابی و تمیز باشد گرادیان ولتاژ از حد مجاز تجاوز نمی‌کند، اما در این حالت این سؤال مطرح می‌شود که آیا انتخاب مقاطع هادی‌ها تنها بر مبنای ساعات محدودی از سال که درجه حرارت به حد ماکزیمم می‌رسد می‌تواند معقول و منطقی باشد؟ مسلماً اگر عوامل محدودکننده تنها درجه حرارت محیط بود شاید منطقی نمی‌بود، اما در عمل حتی اگر طراحی بر همین مبنا هم انجام گیرد در ساعات قابل توجهی از سال که هوا بارانی، برفی یا مه‌آلود باشد این معیار نمی‌تواند کافی برای کنترل پدیده کرونا باشد. در عمل اگر قرار باشد کنترل پدیده کرونا بر مبنای روزهای بارانی انجام گیرد، قطعاً اقتصادی

نخواهد بود، به همین دلیل سعی می‌شود مقدار گرادیان ولتاژ که برای طراحی خطوط انتقال نیرو در نظر گرفته می‌شود با توجه به ارتفاع و درجه حرارت منطقه صورت گیرد.

برای آگاهی از تاثیر شرایط محیطی بر چگالی نسبی هوا و حد شکست هوا، مقادیر آنها بر مبنای شرایط متوسط مراکز استانهای کشور محاسبه شده است که نتیجه در جدول (۳-۱۵) نشان داده شده است. همانطور که از این جدول مشهود است درجه حرارت محیط و ارتفاع منطقه شدیداً در حد شکست هوا مؤثر می‌باشند. گرچه درجه حرارت محیط در طول ساعات مختلف سال تغییر می‌کند اما ارتفاع منطقه همواره ثابت بوده که خود عامل مؤثری در کاهش چگالی نسبی هوا است. بنابراین برای اینکه حد گرادیان ولتاژ پوششی برای شرایط متوسط کل ایران باشد با توجه به جدول (۳-۱۵) حداقل مقاطع هادی‌ها در سطوح مختلف ولتاژ باید بر مبنای مقدار منطقی از گرادیان ولتاژ محاسبه شوند تا بتوانند پوششی بر شرایط کل منطقه داشته باشند. طبیعی است در چنین شرایطی کماکان در روزهای بارانی یا ابری گرادیان ولتاژ از حد مجاز تجاوز می‌نماید که سبب ظهور پدیده کرونا در برخی از ایام سال می‌شود.

جدول ۳-۱۵: حد ولتاژ یونیزه شدن هوا در چند منطقه خاص

منطقه	درجه حرارت محیط (سانتیگراد)	ارتفاع منطقه (متر)	چگالی نسبی هوا	حد شکست هوا (kV/cm)
اصفهان	۳۰	۱۶۰۰	۰/۷۸۵	۱۶/۶۵
اهواز	۵۰	۲۰	۰/۹۲۰	۱۹/۵۲
اراک	۴۰	۱۷۰۰	۰/۷۷۵	۱۶/۴۴
ایلام	۴۲	۱۲۵۰	۰/۸۱۴	۱۷/۲۷
ارومیه	۳۷	۱۳۰۰	۰/۸۲۲	۱۷/۴۴
بندرعباس	۴۵	۵۰	۰/۹۳۱	۱۹/۷۵
بوشهر	۵۰	۵۰	۰/۹۱۷	۱۹/۴۵
تهران	۴۰	۱۲۰۰	۰/۸۲۴	۱۷/۴۷
تبریز	۳۷	۱۳۰۰	۰/۸۲۲	۱۷/۴۴
خرم‌آباد	۴۳	۱۱۰۰	۰/۸۲۶	۱۷/۵۳
رشت	۳۸	۵۰	۰/۹۴۵	۲۰/۱۴
زنجان	۳۷	۱۶۰۰	۰/۷۹۲	۱۶/۸۱
زاهدان	۴۲	۱۳۰۰	۰/۸۰۹	۱۷/۱۶
ساری	۳۹	۵۰	۰/۹۴۵	۲۰/۱۴
سمنان	۴۱	۱۲۰۰	۰/۸۲۲	۱۷/۴۳
سنندج	۳۷	۱۴۰۰	۰/۸۱۲	۱۷/۲۳
شیراز	۴۰	۱۳۰۰	۰/۸۱۴	۱۷/۲۷
شهرکرد	۳۷	۱۹۰۰	۰/۷۵۴	۱۶/۰۰
کرمانشاه	۳۹	۱۳۰۰	۰/۸۱۷	۱۷/۳۳
کرمان	۴۰	۱۷۰۰	۰/۷۷۵	۱۶/۴۴
مشهد	۳۹	۱۰۰۰	۰/۸۴۷	۱۷/۹۷
همدان	۳۸	۱۷۰۰	۰/۷۷۵	۱۶/۴۵
یاسوج	۳۷	۱۸۰۰	۰/۷۷۳	۱۶/۴۰
یزد	۴۲	۱۲۰۰	۰/۸۱۹	۱۷/۳۷

**توضیح:** با توجه به اینکه هدف، مطالعه در محدوده هر یک از شهرهای فوق‌الذکر می‌باشد اصلاحاتی در ارتفاع شهرها داده شده است. ضمناً گرچه درجه حرارت ماکزیمم مطلق کمتر از ارقام فوق است اما در این مطالعه از درجه حرارت ماکزیمم نرمال استفاده شده است.

### ۳-۵-۴- تعیین حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه کرونا

با توجه به آنچه گفته شد می‌توان حداقل مقاطع هادی‌ها را طوری انتخاب نمود که گرادیان ولتاژ در سطح هادی‌ها از رقم معینی تجاوز نماید. در شرایط استاندارد گرادیان ولتاژ باید کمتر از  $21/2$  کیلوولت بر سانتیمتر باشد، اما در دیگر شرایط استاندارد گرادیان ولتاژ باید کمتر از  $g_c$  یا گرادیان بحرانی ولتاژ در سطح باشد.

مقدار گرادیان بحرانی  $g_c$  همانطور که قبلاً ارائه شد از رابطه زیر بدست آید:

$$g_c = \delta \cdot g_s \quad (19-3)$$

با توجه به رابطه (۳-۱۵) که مقدار گرادیان در سطح هادی را محاسبه می‌کند، بایستی میزان گرادیان روی سطح هادی از گرادیان بحرانی کمتر و یا حداکثر برابر آن باشد (یعنی  $g < g_c$ ). با قرار دادن معادل آن رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\delta \cdot g_s = \frac{K \cdot V}{ns \cdot r \cdot \ln(GMD / r_b)} \quad (20-3)$$

چون مقدار  $\delta$  با توجه به شرایط مسیر متفاوت می‌باشد، لذا برای تعیین مقدار گرادیان بحرانی ولتاژ به جای اینکه مقادیر مختلفی برای  $\delta$  در نظر گرفته شود، برای گرادیان بحرانی ولتاژ ارقام مختلفی منظور می‌شود. بر این مبنا با منظور کردن رقم یک برای  $\delta$  به کمک رابطه (۳-۱۹) و رابطه (۳-۲۰) شعاع هادی‌ها از طریق سعی و خطا طوری انتخاب می‌شود که مقدار گرادیان بحرانی ولتاژ در حد ۱۶ یا  $16/5$  و ... یا  $21/2$  کیلوولت بر سانتیمتر مهار گردد. نتایج این محاسبات در جداول (۳-۱۶) و (۳-۱۷) و (۳-۱۸) و (۳-۱۹) درج گردیده است. لذا بر حسب اینکه گرادیان بحرانی و یا حد گرادیان ولتاژ چه باشد می‌توان مقطع مناسب هادی‌ها را بدست آورد. لازم به یادآوری است همانطور که جداول (۳-۱۶) و (۳-۱۷) نشان می‌دهند در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت، حتی مقاطع کوچک هادی‌های استاندارد از دیدگاه پدیده کرونا مناسب می‌باشند، اما وقتی ولتاژ به ۱۳۲ کیلوولت و بالاتر می‌رسد، مقاطع هادی‌ها نباید از یک اندازه مشخصی کوچکتر باشند. گرچه وقتی از خطوط باندل استفاده می‌شود مقاطع هادی‌ها می‌توانند تقلیل یابند اما موقعی از خطوط باندل استفاده می‌شود که قدرت انتقالی بالا باشد. بنابراین همانطور که در بخشهای بعدی اشاره خواهد شد عملاً استفاده از مقاطع کوچک از دیدگاه فنی و اقتصادی توجیه کافی ندارد.

در مجموع با توجه به اینکه هدف، تنوع‌زدایی و محدود کردن تعداد هادی‌ها می‌باشد، لذا باید مقاطع هادی‌ها طوری انتخاب شوند که در خطوط انتقال ساده (یک هادی در هر فاز) پاسخگو باشند. بر این مبنا از دیدگاه پدیده کرونا حداقل مقاطع هادی‌ها نباید از مقاطع معینی کوچکتر باشند. جداول (۳-۲۰) و (۳-۲۱) حداقل مقاطع هادی‌ها را بر مبنای مقادیر مختلفی از گرادیان ولتاژ نشان می‌دهند. همانطور که در این جداول مشاهده می‌شود وقتی تعداد هادی‌ها در هر فاز به ۳ و ۴ می‌رسند برای برخی از مقادیر گرادیان ولتاژ، قطر هادی‌ها می‌تواند خیلی تقلیل یابد که حتی از حداقل مقاطع که برای تحمل جریان اتصال کوتاه لازم است کمتر است که طبیعتاً معقول نخواهد بود. از طرف دیگر وقتی قدرت انتقالی کم باشد از نظر اقتصادی، انتخاب خطوط باندل ۳ یا ۴ تایی توجیه ندارد و اگر بار انتقالی زیاد باشد، عملاً قطر هادی‌های فرعی باید افزایش یابند. بر این مبنا برای این چنین حالات در جداول (۳-۱۸) و

(۳-۱۹) حداقل قطر هادی برابر حداقل مقاطعی که از دیدگاه جریان اتصال کوتاه لازم است، منظور می‌گردد. برای سطوح ولتاژ ۱۳۲ و ۶۳ مقاطعی که از دیدگاه پدیده کرونا لازم است عملاً کمتر از حدی است که از دیدگاه جریان اتصال کوتاه ضروری است، لذا برای این حالت جداول خاصی ارائه نمی‌شود.

جدول ۳-۱۶: حداقل قطر هادی (میلیمتر) در خطوط ۴۰۰ کیلوولت بر مبنای مقادیر مشخصی از گرادیان ولتاژ

گرادیان ولتاژ (کیلوولت بر سانتیمتر)	تعدادهای درهرفاز برابر ۱	تعدادهای درهرفاز برابر ۲	تعدادهای درهرفاز برابر ۳	تعدادهای درهرفاز برابر ۴
۱۶/۰	۴۷/۸۴	۳۲/۵۲	۲۴/۴۸	۱۹/۹۰
۱۶/۵	۴۶/۱۰	۳۱/۳۲	۲۳/۶۰	۱۹/۲۰
۱۷/۰	۴۴/۴۸	۳۰/۲۲	۲۲/۷۸	۱۸/۵۰
۱۷/۵	۴۲/۷۸	۲۹/۲۰	۲۲/۰۰	۱۷/۹۲
۱۸/۰	۴۱/۵۲	۲۸/۲۲	۲۱/۲۸	۱۷/۳۶
۱۸/۵	۴۰/۲۲	۲۷/۳۲	۲۰/۶۲	۱۶/۸۰
۱۹/۰	۳۸/۹۶	۲۶/۴۶	۱۹/۹۸	۱۶/۳۰
۲۰/۰	۳۶/۶۶	۲۴/۹۰	۱۸/۸۲	۱۵/۳۶
۲۱/۲	۳۴/۲۰	۲۳/۲۶	۱۷/۵۸	۱۴/۳۸

جدول ۳-۱۷: حداقل قطر هادی (میلیمتر) در خطوط ۲۳۰ کیلوولت بر مبنای مقادیر مشخصی از گرادیان ولتاژ

گرادیان ولتاژ (کیلوولت بر سانتیمتر)	تعدادهای درهرفاز برابر ۱	تعدادهای درهرفاز برابر ۲	تعدادهای درهرفاز برابر ۳	تعدادهای درهرفاز برابر ۴
۱۶/۰	۲۵/۸۲	۱۷/۸۴	۱۳/۶۴	۱۱/۲۶
۱۶/۵	۲۴/۹۰	۱۷/۲۲	۱۳/۱۶	۱۰/۸۶
۱۷/۰	۲۴/۰۴	۱۶/۶۲	۱۲/۷۲	۱۰/۵۰
۱۷/۵	۲۳/۲۴	۱۶/۰۸	۱۲/۳۰	۱۰/۱۸
۱۸/۰	۲۲/۴۸	۱۵/۵۶	۱۱/۹۲	۹/۸۶
۱۸/۵	۲۱/۷۸	۱۵/۰۵	۱۱/۵۶	۹/۵۶
۱۹/۰	۲۱/۰۸	۱۴/۶۲	۱۱/۲۰	۹/۲۸
۲۰/۰	۱۹/۸۶	۱۳/۷۸	۱۰/۵۸	۸/۷۶
۲۱/۲	۱۸/۵۴	۱۲/۹۰	۹/۹۰	۸/۲۲

جدول ۳-۱۸: حداقل قطر هادی (میلیمتر) در خطوط ۱۳۲ کیلوولت بر مبنای مقادیر مشخصی از گرادیان ولتاژ

تعداد هادی در هر فاز برابر ۴	تعداد هادی در هر فاز برابر ۳	تعداد هادی در هر فاز برابر ۲	تعداد هادی در هر فاز برابر ۱	گرادیان ولتاژ (کیلوولت بر سانتیمتر)
۶/۵۸	۷/۸۶	۱۰/۰۸	۱۴/۱۴	۱۶/۰
۶/۳۸	۷/۵۸	۹/۷۴	۱۳/۶۴	۱۶/۵
۶/۱۶	۷/۳۴	۹/۴۰	۱۳/۱۶	۱۷/۰
۵/۹۶	۷/۱۰	۹/۱۰	۱۲/۷۲	۱۷/۵
۵/۷۸	۶/۸۸	۸/۸۲	۱۲/۳۲	۱۸/۰
۵/۶۲	۶/۶۸	۸/۵۴	۱۱/۹۲	۱۸/۵
۵/۴۶	۶/۴۸	۸/۲۸	۱۱/۵۶	۱۹/۰
۵/۱۶	۶/۱۲	۷/۸۲	۱۰/۸۸	۲۰/۰
۴/۸۴	۵/۷۴	۷/۳۲	۱۰/۱۸	۲۱/۲

جدول ۳-۱۹: حداقل قطر هادی (میلیمتر) در خطوط ۶۳ کیلوولت بر مبنای مقادیر مشخصی از گرادیان ولتاژ

تعداد هادی در هر فاز برابر ۴	تعداد هادی در هر فاز برابر ۳	تعداد هادی در هر فاز برابر ۲	تعداد هادی در هر فاز برابر ۱	گرادیان ولتاژ (کیلوولت بر سانتیمتر)
۳/۳۰	۳/۸۶	۴/۸۰	۶/۳۸	۱۶/۰
۳/۲۰	۳/۷۲	۴/۶۲	۶/۱۶	۱۶/۵
۳/۱۰	۳/۶۰	۴/۴۸	۵/۹۴	۱۷/۰
۳/۰۰	۳/۴۸	۴/۳۴	۵/۷۶	۱۷/۵
۲/۹۰	۳/۳۸	۴/۲۰	۵/۵۶	۱۸/۰
۲/۸۲	۳/۲۸	۴/۰۸	۵/۴۰	۱۸/۵
۲/۷۴	۳/۱۸	۳/۹۶	۵/۲۴	۱۹/۰
۲/۶۰	۳/۰۲	۳/۷۴	۴/۹۲	۲۰/۰
۲/۴۴	۲/۸۲	۳/۵۰	۴/۶۴	۲۱/۲

جدول ۳-۲۰: حداقل مقطع استاندارد هادی در خطوط ۴۰۰ کیلوولت بر مبنای مقادیر مشخصی از گرادیان ولتاژ

تعداد هادی در هر فاز برابر ۴	تعداد هادی در هر فاز برابر ۳	تعداد هادی در هر فاز برابر ۲	تعداد هادی در هر فاز برابر ۱	گرادیان ولتاژ (کیلوولت بر سانتیمتر)
Hawk-477kCM	Squzb-605kCM	Finch-1111kCM	**	۱۶/۰
Ibis-397kCM	Squab-715kCM	Curlew-1033kCM	**	۱۶/۵
Oriole-336kCM	Dove-556kCM	Curlew-1033kCM	Thrasher-2312kCM	۱۷/۰
Oriole-336kCM	Dove-556kCM	Canary-900kCM	Kiwi-2167kCM	۱۷/۵
Oriole-336kCM	Hawk-477kCM	Canary-900kCM	Kiwi-2167kCM	۱۸/۰
Oriole-336kCM	Hawk-477kCM	Darke-795kCM	Chukar-1780kCM	۱۸/۵
Oriole-336kCM	Hawk-477kCM	Starling-715kCM	Chukar-1780kCM	۱۹/۰
Oriole-336kCM	Ibis-397kCM	Root-636kCM	Plover-1431kCM	۲۰/۰
Oriole-336kCM	Oriole-336kCM	Dove-556kCM	Pheseant-1272kCM	۲۱/۲

\*\* هیچگونه هادی در استاندارد ASTM وجود ندارد.

جدول ۳-۲۱: حداقل مقطع استاندارد هادی در خطوط ۲۳۰ کیلوولت بر مبنای مقادیر مشخصی از گرادیان ولتاژ

تعداد هادی در هر فاز برابر ۴	تعداد هادی در هر فاز برابر ۳	تعداد هادی در هر فاز برابر ۲	تعداد هادی در هر فاز برابر ۱	گرادیان ولتاژ (کیلوولت بر سانتیمتر)
Oriole-266kCM	Oriole-266kCM	Oriole-336kCM	Starling-715kCM	۱۶/۰
Oriole-266kCM	Oriole-266kCM	Oriole-336kCM	Squab-605kCM	۱۶/۵
Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Squab-605kCM	۱۷/۰
Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Dove-556kCM	۱۷/۵
Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Dove-556kCM	۱۸/۰
Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Hawk-477kCM	۱۸/۵
Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Hawk-477kCM	۱۹/۰
Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Ibis-397kCM	۲۰/۰
Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Partridge-266kCM	Oriole-336kCM	۲۱/۲



## ۳-۵-۵- نتیجه مقدماتی

گرچه در عمل حداقل مقاطع هادی‌ها با توجه به دیدگاه‌های مختلف تعیین می‌شود، اما در این بخش از استاندارد که هدف نشان دادن یک شرایط کلی برای انتخاب حداقل شعاع هادی‌ها می‌باشد، با توجه به جدول (۳-۱۵) که مقادیر ولتاژ حد یونیزاسیون هوا را در شرایط آب و هوایی مراکز استانهای کشور نشان می‌دهد رقم معینی برای انتخاب حداقل مقاطع هادی‌ها در نظر گرفته می‌شود تا حداقل مقاطع هادی‌ها از دیدگاه پدیده کرونا محاسبه گردد.

مروری بر طراحی خطوط نیروی کشور نشان می‌دهد که مهندسین مشاور یا طراحان، در انتخاب مقاطع هادی‌ها، دیدگاه‌های مختلفی در بکارگیری حداقل گرادیان ولتاژ داشته‌اند. به طوریکه در خط انتقال نیرو ۲۳۰ کیلوولت حسن کیف به رامسر که از مناطقی با ارتفاع و درجه حرارت متفاوتی عبور می‌نماید هادی Dove انتخاب شده است که مبین منظور نمودن ۱۷/۵ کیلوولت بر سانتیمتر برای گرادیان ولتاژ است، حال آنکه هم ارتفاع و هم درجه حرارت مسیر خطوط نیرو بالاتر از حد استاندارد بوده است. به عبارت دیگر در این خطوط در بسیاری از ساعات سال تلفات کرونا وجود خواهد داشت. همچنین خطوط انتقال ۴۰۰ کیلوولت سد کارون به اهواز و اراک بصورت باندل با هادی‌های Drake و Curlew طراحی شده‌اند که نشانگر در نظر گرفتن مقادیر ۱۸/۵ و ۱۷ کیلوولت بر سانتیمتر برای گرادیان ولتاژ می‌باشد، حال آنکه در بسیاری از ساعات سال حد شکست هوا کمتر از ۱۷ کیلوولت بر سانتیمتر می‌باشد. این مطالب نشان می‌دهد که برخی از طراحان خطوط نگران افزایش گرادیان ولتاژ در بعضی از ساعات سال نبوده‌اند، چون در واقع وجود تلفات کرونا در برخی از ساعات سال همواره به معنی نامناسب بودن طراحی نمی‌باشد. اما در رابطه با برخی از خطوط نیرو که از داخل شهرها عبور می‌کنند، تنها تلفات کرونا مطرح نیست بلکه لازم است اغتشاشات مخابراتی و نویز قابل شنیدن نیز کنترل گردد که در چنین حالتی لازم است نه فقط از دیدگاه اقتصادی بلکه از دیدگاه محیط زیست نیز گرادیان ولتاژ کنترل شود.

همانطور که جداول (۳-۲۰) و (۳-۲۱) نشان می‌دهند در خطوط انتقال نیرو ۴۰۰ کیلوولت باندل وقتی تعداد هادی‌ها به ۲ یا ۳ یا ۴ می‌رسند مقاطع مناسب برای اینکه گرادیان ولتاژ در حد ۱۷ کیلوولت بر سانتیمتر مهار گردد، به ترتیب برابر  $2 \times 1033 \text{ kCM}$  و  $3 \times 556 \text{ kCM}$  و  $4 \times \text{Oriole kCM}$  می‌باشند. برای انتقال توان یکسان، اگر از خطوط باندل با هادی‌های بیشتر استفاده شود نه تنها تلفات الکتریکی تقلیل نمی‌یابد بلکه سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث خطوط نیرو افزایش می‌یابد که در نتیجه طراحی را به سمت غیراقتصادی شدن هدایت می‌کند. اما در عمل موقعی از خطوط باندل استفاده می‌شود که هدف انتقال توان بالا باشد بهمین دلیل مقاطع مجموع هادی‌ها افزایش می‌یابند. به عبارت دیگر اگر برای انتقال یک توان معین دو هادی  $1033 \text{ kCM}$  موجه باشد با افزایش توان انتقالی قطعاً مقطع معادل باید افزایش یابد، تا صرفه‌جویی ناشی از کاهش تلفات (در اثر افزایش مقاطع معادل هادی‌ها) افزایش سرمایه‌گذاری اولیه را جبران نماید.

در رابطه با خطوط انتقال ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت موضوع پدیده کرونا در مقایسه با سایر عوامل محدودکننده تأثیر عمده‌ای در انتخاب مقاطع هادی‌ها ندارند. به عنوان مثال برای اینکه گرادیان ولتاژ در سطح هادی‌ها در حد ۱۷ کیلوولت محدود شود، کلیه هادی‌های موجود در جدول استاندارد پاسخگو می‌باشند. اما با توجه به سایر عواملی که در انتخاب حداقل مقاطع هادی‌ها دخالت دارند، عملاً می‌توان این نتیجه مقدماتی را بیان نمود که در این سطوح از ولتاژ پدیده کرونا دخالتی در انتخاب هادی‌ها ندارند، چون همانطور که در فصل قبل اشاره گردید برای کنترل سطوح اتصال کوتاه حداقل مقاطع هادی‌ها در سطوح ولتاژ ۱۳۲ و ۶۳ کیلوولت باید به ترتیب  $\text{Partridge-266/8 kCM}$ ،  $\text{Orile-336/4 kCM}$  باشند که این مقاطع بزرگتر از حدی است که تلفات کرونا آن را دیکته می‌کند.

چون هدف از استاندارد و تنوع‌زدایی هادی‌ها انتخاب تعداد محدودی از هادی‌ها برای خطوط نیرو می‌باشد، لازم است انتخاب حداقل مقاطع هادی‌ها با توجه به تمام جوانب انجام گیرد. در این نشریه حداقل مقاطع هادی بر مبنای ۱۷ کیلوولت بر سانتیمتر برای ولتاژ یونی‌اسیون هوا محاسبه می‌شوند که این رقم برای مناطقی با ارتفاع حدود ۱۰۰۰ متر و درجه حرارت متوسط حدود ۴۰ درجه سانتیگراد پاسخگو می‌باشد.

البته برای مناطق دیگر که نیاز به کنترل بیشتر پدیده کرونا باشد، اگر سایر دیدگاهها هادی‌های قطورتر را موجه ندانست، می‌توان از خطوط باندل استفاده نمود. بر این مبنای حداقل مقاطع هادی‌ها از دیدگاه پدیده کرونا برای سطوح ولتاژ ۶۳ و ۱۳۲ و ۲۳۰ و ۴۰۰ انتخاب و در جدول (۳-۲۲) نشان داده شده است. در این جدول در مواردی که حداقل مقاطع هادی‌ها کمتر از حدی بود که جریان اتصال کوتاه آن را تعیین نموده است با آن هادی‌ها جایگزین شده‌اند.

جدول ۳-۲۲: حداقل مقطع هادی در سطوح مختلف ولتاژ بر مبنای مقادیر ۱۷ کیلوولت بر سانتیمتر

ولتاژ خط انتقال (کیلوولت)	تعداد هادی در هر فاز ۱	تعداد هادی در هر فاز ۲	تعداد هادی در هر فاز ۳	تعداد هادی در هر فاز ۴
۶۳	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM
۱۳۲	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM
۲۳۰	Dove-556 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM
۴۰۰	Kiwi- 2167 kCM	Canary 900 kCM	Hawk-477 kCM	Partridge-266 kCM

### ۳-۶- انتخاب مقطع از دیدگاه اقتصادی

در کنار مسائل فنی در انتخاب هادی‌ها، مسائل اقتصادی نیز بسیار مؤثر هستند. وقتی ارزیابی و مقایسه اقتصادی بین چند پروژه به میان می‌آید مسلماً دو پارامتر عمده یعنی سرمایه‌گذاری اولیه جهت احداث و هزینه‌های مختلفی که بابت بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری در طول عمر مفید صرف می‌شوند، باید باهم جمع شده و بعنوان مبنای بررسی و مقایسه مورد استفاه قرار گیرند. بنابراین مسائل اقتصادی به دو بخش زیر قابل تفکیک است:

- سرمایه‌گذاری اولیه

- ارزش حال مجموع هزینه‌های جاری

### ۳-۶-۱- سرمایه‌گذاری اولیه

سرمایه‌گذاری اولیه خطوط نیرو تابعی است از مشخصات فنی خطوط، شرایط مسیر، شرایط جغرافیایی و جوی منطقه، قیمت زمین و عوامل مؤثر دیگر که ممکن است باعث شوند تا قیمت خطوط در محدوده وسیعی تغییر نمایند. اما در یک شرایط معین و مشخص، سرمایه‌گذاری خطوط تابعی از تعداد و اندازه هادی‌های فرعی در هر فاز است. اصولاً با تغییر اندازه هادی، قیمت خط بر

حسب کلاس ولتاژ بین ۱۲ تا ۳۰ درصد و در صورت افزایش تعداد هادی‌های هر فاز حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد قیمت خط افزایش می‌یابد.

### ۳-۶-۱-۱- رابطه تعداد مدارها و هادی‌های هر فاز با سرمایه‌گذاری

یکی از روش‌های افزایش توان انتقالی خطوط نیرو افزایش تعداد مدارها یا تعداد هادی‌های آن در هر فاز می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد مدارها و هادی‌ها، سرمایه‌گذاری خطوط نیرو تقریباً به نسبت مشخصی افزایش می‌یابد. اگر تعداد مدارهای خطوط نیرو  $nc$  و تعداد هادی‌های فرعی هر فاز  $ns$  باشد، سرمایه‌گذاری خط چند مداره و باندل را برحسب سرمایه‌گذاری خطوط ساده می‌توان به صورت روابط زیر نشان داد:

$$INV = Inv. [1+(nc-1).Kc] \quad (21-3)$$

$$INV = Inv. [1+(ns-1).Ks] \quad (22-3)$$

اگر روابط (۲۱-۳) و (۲۲-۳) را با هم تلفیق نماییم به رابطه زیر می‌رسیم که این رابطه میزان سرمایه‌گذاری خطوط چند مداره باندل را برحسب سرمایه‌گذاری خطوط ساده نشان می‌دهد:

$$INV = Inv. [1+(nc-1).Kc] . [1+(ns-1).Ks] \quad (23-3)$$

در این روابط  $INV$  و  $Inv$  به ترتیب سرمایه‌گذاری نسبی خطوط انتقال ساده و چند مداره باندل،  $Kc$  نسبت سرمایه‌گذاری خطوط دو مداره به یک مداره،  $Ks$  نسبت سرمایه‌گذاری خطوط باندل به خطوط ساده،  $nc$  تعداد مدارها و  $ns$  تعداد هادی در هر فاز می‌باشند. در صورتی که قطر هادی‌های خط یک مداره و چند مداره با هم برابر باشند در این صورت  $Kc$  در حدود ۰/۵۰ تا ۰/۶۰ و  $Ks$  حدود ۰/۴۵ تا ۰/۵۰ تغییر می‌کند، اما اگر قطر هادی‌ها تغییر نمایند، مقدار  $Kc$  و  $Ks$  نیز تغییر خواهند کرد که بر حسب مورد باید محاسبه گردد.

### ۳-۶-۱-۲- رابطه هادی‌ها با وزن برجها

با تغییر قطر و تعداد هادی‌های فرعی در هر فاز، چون وزن هادی‌ها و برآیند نیروهای ناشی از باد و یخ تغییر می‌کنند، در نتیجه وزن برج‌ها نیز بر حسب مورد افزایش یا کاهش می‌یابند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که برای یک شرایط مشخص تأثیر تغییر قطر هادی‌ها در وزن برج‌ها را می‌توان به صورت مدل تقریبی زیر نشان داد:

$$Kt_d = -1.2 + 1.6e^{0.32d/d0} \quad (24-3)$$

در صورتی که از خطوط انتقال نیروی باندل استفاده شود رابطه تعداد هادی‌های فرعی و وزن برج را می‌توان به صورت زیر ارائه داد:

$$Kt_s = \sqrt{\frac{ns}{n_0}} \quad (25-3)$$

با تلفیق دو رابطه (۲۴-۳) و (۲۵-۳) می‌توان ضریب مجموع افزایش وزن برج‌ها را از رابطه زیر بدست آورد:

$$Kt = Kt_d . Kt_s \quad (26-3)$$

در این روابط :

$Kt_d$ : ضریب تعیین وزن برجها در اثر تغییر قطر هادی از  $d_0$  به  $d$

$Kt_s$ : ضریب تغییر وزن برجها در اثر تغییر تعداد هادیهای فرعی از  $n_0$  به  $ns$

$Kt$ : ضریب تغییر وزن برجها در اثر تغییر قطر و تعداد هادیهای فرعی

$d_0$ : قطر اولیه هادی

$d$ : قطر جدید هادی

$n_0$ : تعداد هادیهای فرعی در حالت اولیه

$ns$ : تعداد هادیهای فرعی در حالت جدید می باشد.

### ۳-۱-۳-۳-۳ رابطه هادیها با حجم فونداسیونها

در صورتی که قطر و تعداد هادیهای فرعی در هر فاز تغییر نمایند، حجم فونداسیونها نیز تغییر می کنند که تأثیر این دو عامل را می توان به صورت مدل های تقریبی زیر نشان داد [۱۷]:

$$Kf_d = -2.5 + 2.9e^{0.19d/d_0} \quad (۲۷-۳)$$

رابطه (۲۸-۳) تأثیر تعداد هادیهای فرعی در حجم فونداسیونها و رابطه (۲۹-۳) تأثیر مجموع دو عامل قطر و تعداد هادیهای

در هر فاز را نشان می دهند.

$$Kf_s = 0.1 + 0.9 \sqrt{\frac{ns}{n_0}} \quad (۲۸-۳)$$

$$Kf = Kf_d \cdot Kf_s \quad (۲۹-۳)$$

در این روابط :

$Kf_d$ : ضریب تغییر حجم فونداسیون در اثر تغییر هادی

$Kf_s$ : ضریب تغییر فونداسیون در اثر تغییر تعداد هادیهای فرعی

$Kf$ : ضریب تغییر حجم فونداسیون در اثر تغییر تعداد و قطر هادیها می باشد.

### ۳-۲-۳-۳ سرمایه گذاری پستها

بخش دیگر از هزینه هایی که باید در ارزیابی اقتصادی مورد بررسی و توجه قرار گیرد، سرمایه گذاری مربوط به احداث یا توسعه پستهای دو طرف خطوط نیرو می باشد. طبیعی است هر چه ولتاژ و تعداد مدارهای خطوط انتقال نیرو افزایش یابد هزینه های مربوط به احداث پستها نیز افزایش می یابد که در نتیجه می تواند باعث تغییر طرح بهینه گردد.

در انتخاب ولتاژ، تعداد مدارها و یا مقاطع هادیهای خطوط نیرو، سرمایه گذاری مربوط به پستها تأثیر عمده ای در نتیجه ارزیابی های اقتصادی دارد به طوری که برای خطوط کوتاه این تأثیر گذاری بیشتر و برای خطوط بلند کمتر می باشد (چون سرمایه گذاری مربوط به احداث خطوط نیرو تابعی از طول آنها است، اما هزینه احداث پستهای دو طرف آنها تقریباً مقداری ثابت

است). بنابراین هرچه طول خطوط کوتاه‌تر باشد، سهم سرمایه‌گذاری پستها در واحد طول افزایش می‌یابد که همین امر سبب می‌شود تا در خطوط کوتاه افزایش اندازه و تعداد هادی‌های فرعی در هر فاز یا تعداد مدارها اقتصادی‌تر از افزایش ولتاژ باشد.

### ۳-۶-۳- ارزش حال هزینه‌ها

علاوه بر سرمایه‌گذاری اولیه پروژه‌های برقرسانی، هزینه‌های دیگری نیز باید در طول عمر مفید خطوط صرف شود که چند نمونه از موارد عمده آنها به شرح زیر می‌باشد.

### ۳-۶-۳-۱- ارزش حال تلفات

ارزش تلفات توان و انرژی در خطوط نیرو بستگی به پارامترهای متعددی دارد که برحسب مورد ممکن است مقدار آن در دامنه وسیعی تغییر نماید. برای محاسبه ارزش تلفات در خطوط نیرو می‌توان از روابط زیر استفاده نمود.

$$VDL = GRF \cdot PL \cdot CP \cdot KP \quad (۳۰-۳)$$

$$PVE = T \cdot PL \cdot LSF \cdot CE \cdot KE \quad (۳۱-۳)$$

$$PVL = VDL + PVE \quad (۳۲-۳)$$

در این روابط:

VDL: ارزش مالی دیماند تلفات

GRF: ضریب ذخیره تولید (۱/۱ تا ۱/۳)

PL: تلفات قدرت در بار پیک

CP: ارزش مالی هر کیلووات از دیماند

KP: ضریبی متناسب با رشد بار در طول عمر مفید خط

PVE: ارزش حال هزینه انرژی

T: دوره بهره‌برداری، ساعت

LSF: ضریب تلفات

CE: ارزش هر کیلووات ساعت از انرژی

KE: ضریبی برای ارزش تلفات انرژی متناسب با رشد بار برای دوره عمر مفید خط

PVL: ارزش حال تلفات دیماند و انرژی می‌باشد.

ضرایب KE و KP به پارامترهای متعددی بستگی دارند، که در حالت کلی مقادیر آنها را می‌توان از روابط زیر بدست آورد.

$$KP = \frac{1}{G^{2k}} + \frac{(G^{2k} - J^k) \cdot (G^2 - 1)}{G^{2k} \cdot J^k \cdot (G^2 - J)} \quad (۳۳-۳)$$

$$KE = \frac{(G^{2k} - J^k) \cdot G^2}{G^{2k} \cdot J^k \cdot (G^2 - J)} + \frac{(J^{n-k} - 1)}{J^n \cdot (J - 1)} \quad (۳۴-۳)$$

در این رابطه:

$n$ : عمر مفید، به سال

$k$ : تعداد سالی از عمر مفید، که خط انتقال دارای رشد بار متوسط  $g$  درصد در سال می‌باشد

$J$ : برابر است با  $J=1+z$

$j$ : تفاضل بهره و تورم سالیانه، درصد

$G$ : برابر است با  $G = 1+g$

$g$ : متوسط رشد بار سالیانه، درصد

در مواردی که پیک بار عبوری از خطوط نیرو در طول عمر مفید ثابت باشد، مقدار  $g = 0$  یا  $(G = 1)$  و مقدار  $k = n$  خواهد شد و در نتیجه  $KE = EF$  و  $KP = 1$  است. مقدار  $EF$  نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$EF = \frac{(1+j)^n - 1}{j \cdot (1+j)^n} \quad (3-35)$$

مقدار  $KP$  و  $KE$  و  $EF$  با توجه به روند رشد بار در خطوط نیرو، اطلاعات سیستم و سایر پارامترهای اقتصادی می‌توانند مورد بررسی و محاسبه قرار گیرند.

### ۳-۶-۳-۲- ارزش حال هزینه‌های تعمیرات و بهره‌برداری

هزینه‌های تعمیرات و بهره‌برداری بخش مهمی از هزینه‌های جاری را به خود اختصاص می‌دهند. این هزینه تابعی است از قیمت خط انتقال که معمولاً به درصدی از آن نشان داده می‌شود (حدود یک تا دو درصد سرمایه‌گذاری خط انتقال). براین مبنا ارزش حال هزینه تعمیرات و بهره‌برداری برابر است با:

$$PVM = MC \cdot INV \cdot EF \quad (3-36)$$

در این رابطه  $PVM$  ارزش حال هزینه تعمیرات و بهره‌برداری و  $MC$  هزینه نسبی تعمیرات و نگهداری (یا نسبت هزینه‌ای سالیانه به سرمایه‌گذاری خط) و  $INV$  مقدار سرمایه‌گذاری خط می‌باشد.

### ۳-۶-۳-۳- ارزش تلفات راکتیو

در خطوط کوتاه یا در مواردی که برای اصلاح ولتاژ نیازی به خازن نیست، ارزش تلفات راکتیو قابل صرف‌نظر کردن است. اما در خطوط انتقال بلند یا خطوط باندل این پارامتر باید محاسبه و مدنظر قرار گیرد. در خطوط دارای باندل، با افزایش تعداد هادی‌های فرعی در هر فاز مقدار راکتانس خط کاهش و بر سوسپتانس خط افزوده می‌گردد که این دو عامل از یک سو باعث تقلیل وار مصرفی خط ( $Q_x$ ) از سوی دیگر باعث افزایش وار تولیدی خط ( $Q_y$ ) می‌گردد. ارزش اقتصادی تلفات راکتیو معادل است با ارزش مقادیری از خازن شنت یا سری که از روابط زیر بدست می‌آید.

$$Q_x = \frac{3 \cdot X \cdot I^2}{1000} \quad (37-3)$$

$$Q_y = \frac{Y \cdot U^2}{1000} \quad (38-3)$$

$$Q = Q_x - Q_y \quad (39-3)$$

$$PVV = Q \cdot C_v \quad (40-3)$$

رابطه (۳-۴۰) تنها سرمایه‌گذاری اولیه جهت خرید و نصب خازن معادل با راکتیو مصرفی در خط انتقال را نشان می‌دهد، حال آنکه در محاسبات دقیق‌تر لازم است انرژی راکتیو مصرفی نیز در طول بهره‌برداری محاسبه گردد که در این محاسبات از آن صرف‌نظر گردید.

در این روابط:

$Q_x$ : وار مصرفی خط بر حسب کیلووار بر کیلومتر

$X$ : راکتانس خط نیرو بر حسب اهم بر کیلومتر

$I$ : جریان عبوری از خط نیرو به آمپر

$Q_y$ : وار تولیدی خط نیرو بر حسب کیلووار بر کیلومتر

$Y$ : سوسپتانس خط نیرو بر حسب میکروزیمنس بر کیلومتر

$U$ : ولتاژ فاز با فاز خط انتقال نیرو به کیلوولت

$Q$ : تفاوت وار مصرفی و تولیدی به کیلووار

$C_v$ : قیمت هر کیلووار خازن

بکارگیری باندل، افزایش سوسپتانس و کاهش راکتانس سلفی را به‌همراه دارد، نتیجتاً دارای مزایای زیر می‌باشد:

- کاهش وار مصرفی خط و در نتیجه تقلیل جریان عبوری از آن
- اصلاح افت ولتاژ و در نتیجه امکان انتقال توان بیشتر
- تقلیل تلفات خط انتقال از دو طریق فوق‌الذکر

در بررسی‌های اقتصادی و مقایسه طرح‌های مختلف خطوط انتقال نیرو مقدار PVV می‌تواند مدنظر قرار گیرد اما در خطوط انتقال ساده (یک هادی در هر فاز) یا خطوط با طول کوتاه، مقدار PVV ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است.

### ۳-۶-۴- انتخاب مقاطع مناسب هادی‌ها از دیدگاه اقتصادی

برای انتخاب مقطع بهینه هادی‌ها لازم است از بین هادی‌هایی که از نظر فنی حداقل شرایط لازم را دارا می‌باشند، نسبت به محاسبه مقطع بهینه اقدام نمود. مقطع بهینه هادی‌ها ضمن اینکه به پیک بار بستگی دارد به پارامترهای بسیار متعدد دیگری که در روابط قبل به آنها اشاره گردید نیز وابسته است، به همین دلیل ممکن است حتی برای مقادیر مشخصی از ولتاژ و پیک بار مقاطع اقتصادی از حالتی به حالت دیگر متفاوت باشد. در مجموع برای تعیین مقطع مناسب می‌توان از رابطه کلی زیر استفاده نمود.

$$PVT = INV + PVL + PVM + PVV + \frac{PVS}{L} \quad (۴۱-۳)$$

در این رابطه:

PVT: ارزش حال کل هزینه بر کیلومتر

INV: سرمایه‌گذاری اولیه خطوط بر کیلومتر

PVM: ارزش حال هزینه‌های تعمیرات و بهره‌برداری، بر کیلومتر

PVL: ارزش حال هزینه تلفات، بر کیلومتر

PVV: ارزش حال تلفات راکتیو، بر کیلومتر

PVS: سرمایه‌گذاری توسعه یا احداث پستهای دو طرف

L: طول خط نیرو، کیلومتر

در این رابطه اگر تعداد مدارها و سطح ولتاژ ثابت باشند با تغییر مقاطع هادی‌ها، هزینه اتصال خطوط به پستهای دو طرف (PVS) ثابت باقی می‌ماند، اما بقیه پارامترها دچار تغییر می‌شوند. بر این مبنا و با توجه به اطلاعات فنی و اقتصادی مندرج در پیوست (۱-۳) نسبت به محاسبه مقاطع اقتصادی هادی‌ها در سطوح ولتاژ ۶۳ و ۱۳۲ و ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلو ولت یک مداره و دو مداره اقدام می‌شود.

برای تعیین مقاطع اقتصادی هادی‌ها سه حالت نرخ مختلف برای انرژی الکتریکی در نظر گرفته شده است، که به کمک سایر اطلاعات مندرج در پیوست (۱-۳)، مقاطع اقتصادی تعیین و در جداول (۳-۲۳) و (۳-۲۶) درج گردید. در این جداول مقاطع ستون اول و دوم و سوم بر مبنای شرایط زیر محاسبه گردید. توجه شود که قیمت‌های ارائه شده مربوط به تاریخ نگارش این گزارش می‌باشد.

حالت اول: ضریب بار ۰/۴ و بهای هر کیلووات ساعت انرژی ۲۵۰ ریال (۳ سنت) و هر کیلوولت دیمانند ۵ میلیون ریال (۶۰۰ دلار).

حالت دوم: ضریب بار ۰/۴ و بهای هر کیلووات ساعت انرژی ۴۲۰ ریال (۵ سنت) و عددی برای هر کیلوولت دیمانند در نظر گرفته نشد.

حالت سوم: ضریب بار ۰/۶ و بهای هر کیلووات ساعت انرژی ۴۲۰ ریال (۵ سنت) و عددی برای هر کیلوولت دیمانند در نظر گرفته نشد.

همانطور که نتایج مندرج در جداول نشان می‌دهند نتایج بدست آمده برای دو حالت اول و دوم تقریباً یکسان است.

### خطوط ۶۳ کیلوولت -

به دلیل نامشخص بودن پیک بار عبوری از خط انتقال، مقاطع اقتصادی هادی‌ها بر مبنای مقادیر مختلفی از توان انتقالی محاسبه می‌شوند. ضمناً بر حسب اینکه خط یک یا دو مداره باشد و یا تعداد هادی‌های هر فاز ۱ تا ۴ باشند، محاسبات انجام شد که نتیجه در جدول (۳-۲۳) نشان داده شده است. همانطور که نتایج این محاسبات نشان می‌دهند وقتی بار انتقالی از مقدار ۲۰ مگاوات آمپر تجاوز می‌کند مقطع مناسب هادی‌ها از اندازه‌های متداول فراتر می‌رود که علت این امر ثابت فرض نمودن بار در طول عمر خط است. اما در



عمل بار عبوری همواره ثابت نبوده بلکه اغلب موارد دارای رشد مشخصی در طول بهره‌برداری می‌باشد که اگر محاسبات اقتصادی بر این مبنا انجام گیرد، مقاطع هادی‌ها قدری کوچکتر به دست می‌آیند.

### - خطوط ۱۳۲ کیلوولت

در این حالت نیز بر مبنای مقادیر مختلفی از توان انتقالی مقاطع اقتصادی محاسبه گردید که نتایج در جدول (۳-۲۴) درج گردیده است. همانطور که نتایج این جدول نشان می‌دهد وقتی توان انتقالی خط انتقال یک مداره به ۸۰ مگاوات آمپر می‌رسد، مقطع مناسب هادی باید ۹۰۰ kCM (Cannary) باشد که این هادی از مقاطع متداول بزرگتر است. البته در عمل چون بار عبوری از خط همواره ثابت نیست، لذا مقاطع اقتصادی قدری کوچکتر از مقادیر محاسبه شده بدست می‌آید.

### - خطوط ۲۳۰ کیلوولت

محاسبات این حالت نیز در جدول (۳-۲۵) درج گردیده است. برای این حالت نیز محاسبات بر مبنای بار ثابت و منظور نمودن خطوط یک یا دو مداره محاسبه گردید. البته در این جدول در برخی موارد مقاطع برای بارهای انتقالی تا ۴۰۰ مگاوات آمپر نیز محاسبه گردید که این بار از بارگذاری حالات نرمال در شبکه بیشتر است و به همین دلیل مقاطع به دست آمده نیز بیش از مقادیر نرمال می‌باشد. ضمناً در این حالت وقتی بار کم است، مقاطع اقتصادی کوچکتر از ۵۵۶ kCM (Dove) به دست می‌آید، اما چون حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه کرونا نباید از این هادی کوچکتر باشد، لذا در جدول (۳-۲۵) نیز حداقل مقطع هادی همواره مساوی یا بزرگتر از هادی ۵۵۶kCM (Dove) منظور گردید.

### - خطوط ۴۰۰ کیلوولت

در این حالت نیز در بارهای کم حداقل مقطع مناسب هادی‌ها کوچکتر از ۹۰۰kCM (2×Cannary) به دست می‌آید اما چون از دیدگاه پدیده کرونا مقاطع نباید از این حد کوچکتر باشند لذا در تعیین مقاطع هادی‌ها این نکته رعایت شد. نتایج محاسبات این حالت در جدول (۳-۲۶) درج گردیده است. البته وقتی مقاطع هادی‌ها خیلی بزرگ می‌شوند می‌توان با افزایش تعداد هادی‌ها در هر فاز از مقاطع کوچکتر استفاده نمود.

جدول ۳-۲۳: مقاطع اقتصادی هادی‌ها با توجه به روند تغییرات بار در خطوط ۶۳ کیلوولت

بار عبوری از خط (مگاوات‌آمپر)	محدوده تغییرات مقطع هادی‌ها		
	خطوط یک مداره ۶۳ کیلوولت		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
۱۰	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM
۱۵	1×Ibis-397kCM	1×Ibis-397kCM	1×Hawk-477kCM
۲۰	1×Hawk-447kCM	1×Hawk-447kCM	1×Starling-715kCM
۲۵	1×Squab-605kCM	1×Squab-605kCM	1×Canary-900kCM
۳۰	1×Starling-715kCM	1×Starling-715kCM	1×Finch-113kCM
۳۵	1×Canary-900kCM	1×Canary-900kCM	1×Starling-1354kCM
۴۰	1×Curlew-1033kCM	1×Cardinal-954kCM	1×Chukar-1750kCM
بار عبوری از خط (مگاوات‌آمپر)	خطوط دومداره ۶۳ کیلوولت		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
	۲۰	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM
۲۵	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM	1×Dove-566kCM
۳۰	1×Oriole-397kCM	1×Oriole-397kCM	1×Starling-715kCM
۳۵	1×Hawk-477kCM	1×Ibis-397kCM	1×Starling-715kCM
۴۰	1×Hawk-477kCM	1×Hawk-477kCM	1×Dark-795kCM
۵۰	1×Starling-715kCM	1×Starling-715kCM	1×Canary-900kCM
۶۰	1×Dark-795kCM	1×Dark-795kCM	1×Grackle-1192kCM
۷۰	1×Canary-900kCM	1×Canary-900kCM	1×Chukar-1780kCM
۸۰	1×Finch-113kCM	1×Curlew-1033kCM	1×Chukar-1780kCM

جدول ۳-۲۴: مقاطع اقتصادی هادی‌ها با توجه به روند تغییرات بار در خطوط ۱۳۲ کیلوولت

بار عبوری از خط (مگاوات‌آمپر)	محدوده تغییرات مقطع هادی‌ها		
	خطوط یک مداره ۱۳۲ کیلوولت		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
۲۰	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM
۳۰	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM	1×Hawk-477kCM
۴۰	1×Ibis-397kCM	1×Ibis-397kCM	1×Squab-795kCM
۵۰	1×Dove-566kCM	1×Dove-566kCM	1×Dark-795kCM
۶۰	1×Starling-715kCM	1×Starling-715kCM	1×Cardinal-954kCM
۷۰	1×Dark-795kCM	1×Dark-795kCM	1×Grackle-1192kCM
۸۰	1×Canary-900kCM	1×Canary-900kCM	1×Canary-900kCM
بار عبوری از خط (مگاوات‌آمپر)	خطوط دومداره ۱۳۲ کیلوولت		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
	۴۰	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM
۶۰	1×Oriole-336kCM	1×Oriole-336kCM	1×Hawk-477kCM
۸۰	1×Hawk-477kCM	1×Hawk-477kCM	1×Starling-715kCM
۱۰۰	1×Squab-605kCM	1×Dove-566kCM	1×Canary-900kCM
۱۲۰	1×Dark-795kCM	1×Starling-715kCM	1×Curlew-1033kCM
۱۴۰	1×Canary-900kCM	1×Dark-795kCM	1×Martin-1345kCM
۱۶۰	1×Cardinal-954kCM	1×Canary-900kCM	1×Canary-900kCM

جدول (۳-۲۵): مقاطع اقتصادی هادی‌ها با توجه به روند تغییرات بار در خطوط ۲۳۰ کیلوولت

بار عبوری از خط (مگاوات‌آمپر)	محدوده تغییرات مقطع هادی‌ها		
	خطوط یک مداره ۲۳۰ کیلوولت		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
۵۰	1×Starling-715kCM	1×Starling-715kCM	1×Starling-715kCM
۷۵	1×Starling-715kCM	1×Starling-715kCM	1×Dark-795kCM
۱۰۰	1×Dark-795kCM	1×Dark-795kCM	1×Canary-900kCM
۱۲۵	1×Dark-795kCM	1×Dark-795kCM	1×Grackle-1192kCM
۱۵۰	1×Curlew-1033kCM	1×Canary-900kCM	1×Chukar-1780kCM
۱۷۵	1×Pheasant-1272kCM	1×Pheasant-1272kCM	1×Chukar-1780kCM
۲۰۰	1×Martin-1345kCM	1×Martin-1345kCM	1×Curlew-1033kCM
بار عبوری از خط (مگاوات‌آمپر)	خطوط دومداره ۲۳۰ کیلوولت		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
	۱۰۰	1×Dark-795kCM	1×Dark-795kCM
۱۵۰	1×Dark-795kCM	1×Dark-795kCM	1×Canary-900kCM
۲۰۰	1×Dark-795kCM	1×Dark-795kCM	1×Curlew-1033kCM
۲۵۰	1×Canary-900kCM	1×Canary-900kCM	1×Martin-1345kCM
۳۰۰	1×Finch-1113kCM	1×Curlew-1033kCM	1×Chukar-1780kCM
۳۵۰	1×Martin-1345kCM	1×Martin-1345kCM	1×Chukar-1780kCM
۴۰۰	1×Parrot-1510kCM	1×Parrot-1510kCM	1×Martin-1345kCM

جدول ۳-۲۶: مقاطع اقتصادی هادی‌ها با توجه به روند تغییرات بار در خطوط ۴۰۰ کیلوولت

بار عبوری از خط (مگاوات‌آمپر)	محدوده تغییرات مقطع هادی‌ها		
	خطوط یک مداره ۴۰۰ کیلوولت		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
۲۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM
۲۵۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM
۳۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM
۳۵۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM
۴۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Curlew-1033kCM
۴۵۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Martin-1345kCM
۵۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	1×Chukar-1780kCM
۶۰۰	2×Finch-1113kCM	2×Finch-1113kCM	1×Chukar-1780kCM
بار عبوری از خط (مگاوات‌آمپر)	خطوط دومداره ۴۰۰ کیلوولت		
	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
	۳۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM
۴۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM
۵۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM
۶۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM
۷۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Curlew-1033kCM
۸۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	2×Martin-1345kCM
۹۰۰	2×Canary-900kCM	2×Canary-900kCM	1×Chukar-1780kCM
۱۰۰	2×Finch-1113kCM	2×Finch-1113kCM	1×Chukar-1780kCM
۱۲۰۰	2×Martin-1345kCM	2×Martin-1345kCM	1×Chukar-1780kCM

### ۷-۳- مقاطع هادی‌ها برای استاندارد ملی

گرچه هادی‌های مورد استفاده در خطوط نیرو دارای مشخصه‌های الکتریکی و مکانیکی مختلفی می‌باشند، اما اصولاً در استانداردها دسته‌بندی هادی‌ها بر مبنای مقاطع آنها انجام می‌گیرد. اهمیت دادن به مقطع هادی‌ها، در حقیقت توجه به مشخصه الکتریکی به خصوص مقاومت الکتریکی آنها می‌باشد. بنابراین با وجود آنکه سایر مشخصات هادی‌ها از جمله کشش، وزن، تعداد رشته‌ها و جنس هادی‌ها نیز دارای اهمیت بالایی است، اما توجه ظاهری به آنها کمتر از مقطع هادی‌ها می‌باشد. این فصل که با هدف تنوع‌زدایی از هادی‌ها ارائه می‌گردد، دسته‌بندی و انتخاب هادی‌ها را بر مبنای مقاطع آنها انجام می‌دهد، اما تلاش بر این است کلیه خصوصیات الکتریکی، مکانیکی و متالورژیکی هادی‌ها بطور اجمال مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به مطالب ارائه شده در بخشهای گذشته، در اینجا بطور خلاصه عوامل موثر در انتخاب هادی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۱-۷-۳- انتخاب جنس هادی‌ها

در شبکه‌های برقرسانی کشور از هادی‌های متنوعی چه از نظر جنس و چه از نظر مقطع استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در اکثر خطوط نیروی کشور از هادی‌های ACSR با مغزی GS یا AS یا AW استفاده گردیده، اما در برخی از خطوط نیرو کشور از هادی‌های AAAC و ACAR نیز استفاده شده است. گرچه هادی‌های AAAC و ACAR می‌توانند برای مناطق آلوده مناسب باشند، اما مقاومت مکانیکی کمتر، قیمت بیشتر، ضریب انبساط طولی بیشتر در مقایسه با هادی ACSR سبب می‌شود که همواره به عنوان یک گزینه برتر در مقایسه با هادی‌های ACSR/AS یا ACSR/AW مورد توجه قرار نگیرند. به همین دلیل در گذشته و حال به جز در برخی از مناطق جنوبی کشور کمتر از آنها استفاده شده است.

یکی از شایع‌ترین پدیده‌ها روی هادی‌های خطوط، خوردگی گالوانیک است که در زمان تماس دو فلز غیر همجنس با یکدیگر رخ می‌دهد. یکی از مثالهای عملی این پدیده در هادی ACSR دیده می‌شود. رشته‌های فولادی که در هسته هادی قرار گرفته‌اند دارای روکش گالوانیزه هستند و جنس این روکش از روی می‌باشد. اولین لایه از رشته‌های آلومینیومی که هسته فولادی را در بر می‌گیرند، مصداق تماس دو فلز غیر همجنس روی و آلومینیوم است. در ابتدا، روی موجود در پوشش گالوانیزه هسته فولادی در اثر تماس با رشته‌های آلومینیومی دچار خوردگی می‌شود. در مرحله بعد در اثر تماس رشته‌های آلومینیومی با فولاد این رشته‌ها خورده می‌شوند.

در مورد هادی‌های ACSR/AS امکان بروز عمل گالوانیک وجود ندارد و در مقایسه با هادی ACSR دارای عمر مفید بیشتری می‌باشد. همچنین هادی ACSR/AS به دلیل درجه بالای خلوص آلومینیوم (۹۹/۵ درصد) در مقایسه با هادی AAAC که دارای درجه خلوص کمتر از ۹۹ درصد است و از نظر متالورژی، درجه خلوص بالاتر به معنی مقاومتر بودن در برابر خوردگی است، دارای خوردگی کمتر می‌باشد.

براین مبنا و با توجه به وضعیت هادی‌های موجود در شبکه و در جهت تنوع‌زدایی هادی‌ها در مناطق آلوده از هادی‌های ACSR با مغزی فولاد روکش آلومینیوم (AW یا AS) استفاده می‌شود که برحسب مورد و درجه آلودگی محیط می‌توان ضخامت روکش آلومینیوم را تعیین نمود. این انتخاب کمک می‌کند تا از اتصالات و براق‌آلات محدودتری در خطوط نیروی کشور استفاده شود.

### ۳-۷-۲- مقاومت مکانیکی هادی‌ها

همانطور که گفته شد گرچه با تقلیل اسپین می‌توان تا حدودی کاستی‌های ناشی از پایین بودن مقاومت مکانیکی هادی‌ها را جبران نمود اما تجارب و بررسی‌های انجام شده در طول چندین سال گذشته نشان می‌دهد که با پارامترهای اقتصادی، اسپین بهینه یا فاصله دو پایه در محدوده معینی تغییر می‌کند.

در استاندارد نمودن هادی‌ها هدف این است که امکان استفاده از هادی‌های قطور به صورت تکی در خطوط ساده و هادی‌های نازکتر به صورت باندل در ولتاژهای بالا عملی باشد. یا به عبارت دیگر امکان استفاده از هادی‌های تکی برای سطوح ولتاژ ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت و به صورت باندل در سطوح ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت عملی باشد. براین مبنا تعدادی از هادی‌ها با رعایت حداقل مقاطع مناسب از دیدگاه تحمل مکانیکی انتخاب و در جدول (۳-۲۷) درج گردید.

جدول ۳-۲۷: حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه تحمل مکانیکی

مقطع مناسب هادی‌ها	سطوح ولتاژ (کیلوولت)
Partridge-266kCM	۶۳
Oriole-336kCM	۱۳۲
Hawk-477kCM	۲۳۰
Squab-605kCM	۴۰۰

### ۳-۷-۳- تحمل جریان اتصال کوتاه

در خطوط انتقال نیرو هادی‌ها باید تحمل جریان اتصال کوتاه را در زمان احتمالی تداوم آن داشته باشند. تجارب بهره‌برداری از شبکه‌های برق‌رسانی در کشور نشان می‌دهد که مقادیر جریان اتصال کوتاه ضمن اینکه به موقعیت مکانی خط نیرو در شبکه بستگی دارند به سطوح ولتاژ نیز وابسته هستند. با توجه به بررسی‌هایی که در بخش قبل انجام گرفت حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه جریان اتصال کوتاه به صورت جدول (۳-۲۸) می‌باشد.

جدول ۳-۲۸: حداقل مقطع هادی‌ها از دیدگاه تحمل جریان اتصال کوتاه

مقطع مناسب هادی‌ها	سطوح ولتاژ (کیلوولت)
Partridge-266.8kCM	۶۳
Oriole-336.4kCM	۱۳۲
Ibis-367.5kCM	۲۳۰
Hawk-477.0kCM	۴۰۰

## ۳-۷-۴- پدیده کرونا

پدیده کرونا علاوه بر اینکه بخشی از انرژی الکتریکی را به صورت تلفات هدر می‌دهد باعث بروز اغتشاشاتی در شبکه‌های رادیویی و مخابراتی نیز می‌گردد. بنابراین لازم است با انتخاب مقاطع مناسب در هر سطحی از ولتاژ نسبت به کنترل آن اقدام نمود. با توجه به بررسی‌های انجام شده حداقل مقطع هادی‌ها از این دیدگاه باید به صورت جدول (۳-۲۹) باشد.

جدول ۳-۲۹: حداقل مقطع هادی در سطوح مختلف ولتاژ بر مبنای گردایان ۱۸ کیلوولت بر سانتیمتر

ولتاژ خط انتقال (کیلوولت)	تعداد هادی در هر فاز برابر ۱	تعداد هادی در هر فاز برابر ۲	تعداد هادی در هر فاز برابر ۳	تعداد هادی در هر فاز برابر ۴
۶۳	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM
۱۳۲	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM
۲۳۰	Dove-556 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM
۴۰۰	Kiwi- 2167 kCM	Canary 900 kCM	Hawk-477 kCM	Partridge-266 kCM

## ۳-۷-۵- حداقل مقطع هادی از دیدگاه فنی

با توجه به دیدگاههای فنی که براساس محدودیت‌های مکانیکی، جریان اتصال کوتاه و تلفات کرونا محاسبه شده است، حداقل مقاطع هادی‌ها در هر سطحی از ولتاژ نباید از مقادیری که در جدول (۳-۳۰) نشان داده شده است کمتر باشد. البته مقاطع بهینه باید با توجه به دیدگاههای اقتصادی نیز تعیین شوند.

جدول ۳-۳۰: حداقل مقطع هادی در سطوح مختلف ولتاژ از دیدگاههای فنی

ولتاژ خط انتقال (کیلوولت)	تعداد هادی در هر فاز برابر ۱	تعداد هادی در هر فاز برابر ۲	تعداد هادی در هر فاز برابر ۳	تعداد هادی در هر فاز برابر ۴
۶۳	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM	Partridge-266 kCM
۱۳۲	Oriole-336kCM	Oriole-336kCM	Oriole-336kCM	Oriole-336kCM
۲۳۰	Dove-556 kCM	Hawk-477 kCM	Hawk-477 kCM	Hawk-477 kCM
۴۰۰	Kiwi- 2167 kCM	Canary 900 kCM	Squab-605kCM	Squab-605kCM



### ۳-۷-۶- رعایت دیدگاه‌های اقتصادی

با توجه به حداقل مقاطع هادی‌ها که از دیدگاه‌های فنی دیکته می‌شوند، در عمل لازم است مقاطع اقتصادی با توجه به اطلاعات بار الکتریکی، و پارامترهای اقتصادی تعیین گردد. با توجه به اینکه هادی‌های مندرج در جداول استاندارد ASTM: B-232 به عنوان مبنای مطالعات قرار گرفته است (به دلیل تعداد هادی‌های پیشنهادی در این استاندارد تقریباً هادی‌های مشابه سایر استانداردها نیز در بین آنها وجود دارند) لذا در بررسی هادی‌های پیشنهادی برای استاندارد ملی، کلیه مقاطع در حد فاصل هادی‌های Patridge-266KCM تا Thracher-22312KCM مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که برای مقادیر مختلفی از بار انتقالی و منظور نمودن قیمت‌های واقعی برای بهای انرژی الکتریکی (بر مبنای قیمت واقعی سوخت)، هادی‌های غالب در سطوح مختلف ولتاژ و بارهای نرمال و اولویت دادن به هادی‌های موجود در شبکه‌های برقرسانی کشور به شرح جدول (۳-۳۱) می‌باشند.

گرچه در برخی موارد استفاده از هادی‌های Martin و بالاتر نیز اقتصادی می‌باشد، اما همانطور که در بخش قبل نشان داده شده است هادی‌های بالاتر از مقاطع Curlew و Grackle معمولاً برای بارهای غیرعادی موجه می‌باشند که سایر پارامترهای سیستم از جمله حد پایداری، قابلیت اطمینان برقرسانی و افت ولتاژ عبور چنین بارهایی را موجه نمی‌سازند و به فرض اگر چنین شرایطی ایجاد گردد، می‌توان با افزایش تعداد هادی‌های فرعی در هر فاز از مقاطع کوچکتری استفاده نمود و بی‌مورد بر تعداد هادی‌های استاندارد افزوده نگردد.

از طرف دیگر افزایش تعداد هادی‌های فرعی در هر فاز باعث کاهش راکتانس و افزایش سوسپتانس خط انتقال می‌گردد که در مجموع باعث افزایش توان انتقالی و کاهش افت ولتاژ خواهد شد. بنابراین در بسیاری موارد با افزایش تعداد هادی‌های فرعی در هر فاز می‌توان از انتخاب ولتاژهای بالاتر ممانعت کرد. ضمناً در بررسی‌های اقتصادی هادی‌های مختلف، باید به این نکته توجه شود که وقتی تعداد هادی‌های فرعی در هر فاز افزایش می‌یابد عملاً ظرفیت خط نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه می‌تواند برای زمان طولانی‌تری جوابگوی منطقه باشد. لذا اگر در مقایسات اقتصادی به این نکته مهم توجه شود، در بسیاری موارد خطوط باندا موجه‌تر می‌باشند.

جدول ۳-۳۱: هادی‌های مناسب در بارهای متداول

هادی‌های مناسب اقتصادی	
کد	سطح مقطع (kCM)
Oriole	۳۳۶
Ibis	۳۹۷
Hawk	۴۷۷
Dove	۵۵۶
Squab	۶۰۵
Starling	۷۱۵
Drake	۷۹۵
Canary	۹۰۰
Curlew	۱۰۳۳

### ۳-۷-۷- پیشنهاد مقاطع هادی‌ها برای استاندارد ملی

با توجه به مطالب بالا و توجه به کلیه دیدگاههای فنی و اقتصادی می‌توان هادی‌های مناسب را برای استاندارد ملی پیشنهاد نمود. در انتخاب هادی‌ها به نکات زیر توجه گردید:

- حتی‌الامکان از تنوع هادی‌ها جلوگیری شود.
- در بین هادی‌های مختلف که دارای مقاطع آلومینیوم مشابه می‌باشند، انتخاب با توجه به وزن کل هادی و مقاومت مکانیکی مناسب انجام گیرد.
- در انتخاب هادی‌ها برای استاندارد در شرایط مشابه به هادی‌های موجود در شبکه اولویت داده شود.
- ماکزیمم توان انتقالی غالب، در انتخاب مقاطع مدنظر قرار گیرد.
- با توجه به اینکه امکان معادل‌سازی مقاطع بزرگ با مقاطع کوچکتر از طریق به کارگیری خطوط باندل میسر می‌باشد، لذا از انتخاب هادی‌های قطور و سنگین پرهیز شود.

محاسبات فنی و اقتصادی نشان می‌دهند که در عمل هادی‌های Ibis, Oriole در بسیاری از حالات مناسب می‌باشند اما از آنجا که هادی Lynx مطابق با استاندارد BS215 در بسیاری از خطوط ۶۳ کیلوولت مورد استفاده قرار گرفته است از این دیدگاه دارای الویت بیشتری است، ضمن اینکه به جهت رعایت تنوع‌زدایی در مقاطع هادی‌ها، بجای استفاده از هادی Ibis, Oriole از هادی Lynx استفاده شده است که از دیگر ویژگیهای آن داشتن مشخصات فنی در حد فاصل این دو هادی می‌باشد. ضمناً با توجه به اینکه به دلیل محدودیت‌های مربوط به افت ولتاژ، حد پایداری سیستم امکان انتقال توان‌های زیاد از خطوط باندل دوتایی با هادی‌های Martin و بالاتر میسر نیست لذا این نوع هادی‌ها حذف گردید و بهتر است به جای استفاده از دو هادی قطور، از سه یا چهار هادی نازکتر که دارای ظرفیت و توان انتقالی بیشتر می‌باشد استفاده گردد. ضمناً همانطور که قبلاً اشاره گردید کلیه هادی‌ها از نوع ACSR می‌باشند و در مناطق آلوده می‌توان برای جلوگیری از سرعت خوردگی از مغزی فولادی با روکش آلومینیوم استفاده نمود. براین مبنا هادی‌های پیشنهادی برای استاندارد ملی به شرح جدول (۳-۳۲) می‌باشد.

در این پیشنهاد از هادی Drake-795KCM که دارای وزن سنگینی است صرفنظر گردید، چون عملاً با توجه به بررسی‌های انجام شده برای انتقال توان متداول در ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت نقش مؤثری را ایفا نمی‌کند، ضمن اینکه برای ولتاژ ۱۳۲ کیلوولت نیز سنگین می‌باشد. براین مبنا از هادی Starling-715KCM که دارای ویژگی بهتری است استفاده شده است. ضمناً از هادی Dove نیز در مقایسه با هادی‌های Hawk و Squab که دارای مقاطع نزدیکی می‌باشند صرفنظر گردید ضمن اینکه از این دو هادی در شبکه موجود استفاده بیشتری شده است.

جدول ۳-۳: هادی‌های پیشنهادی برای استاندارد ملی

مقاومت هادی در ۲۰° و جریان DC (Ohm/km)	کشش قابل تحمل هادی (کیلوگرم)	وزن هادی (kg/km)	قطر هادی (میلیمتر)	مقطع هادی (قسمت آلومینیوم) میلیمتر مربع	مقاطع پیشنهادی
۰/۱۵۷۶۰	۸۱۴۰	۸۴۲	۱۹/۵۳	۱۸۳/۴	Lynx 362kCM
۰/۱۱۹۶۰	۸۸۵۰	۹۷۶/۵	۲۱/۷۸	۲۴۱/۷	Hawk 477kCM
۰/۰۹۴۲۲	۱۱۰۰۰	۱۲۳۹	۲۴/۵۳	۳۰۶/۶	Squab 605kCM
۰/۰۷۹۶۳	۱۲۹۰۰	۱۳۶۶	۲۶/۶۹	۳۶۲/۵	Starling 715kCM
۰/۰۶۳۳۲	۱۴۵۰۰	۱۷۲۵	۲۹/۵۱	۴۵۶/۰	Canary 900 kCM
۰/۰۵۵۱۸	۱۶۶۰۰	۱۹۸۰	۳۱/۶۲	۵۲۳/۷	Curlew 1033kCM
۰/۰۴۸۰۳	۱۹۰۰۰	۲۲۸۲	۳۳/۹۷	۶۰۴/۲	Grackle 1192kCM

توجه: در مناطق آلوده بجای فولاد گالوانیزه بایستی از مغزی با روکش آلومینیوم استفاده شود.

### پیوست ۳-۱

## پارامترهای فنی و اقتصادی

### اطلاعات بار

- ضریب بار در طول بهره‌برداری بطور متوسط ۰/۴ و ۰/۶
- روند رشد بار در طول بهره‌برداری: بدون رشد ( بار ثابت)

### بهای دیمانند و انرژی

- حالت اول - هر کیلووات ساعت ۲۵۰ ریال و هر کیلوولت دیمانند ۵ میلیون ریال و ضریب بار ۰/۴
- حالت دوم - هر کیلووات ساعت ۴۲۰ ریال و هر کیلووات دیمانند صفر ریال و ضریب بار ۰/۴
- حالت سوم - هر کیلووات ساعت ۴۲۰ ریال و هر کیلووات دیمانند صفر ریال و ضریب بار ۰/۶

### قیمت اجزای خطوط نیرو

- بهای هر کیلوگرم هادی در محل نصب ۱۲۰۰۰ ریال
- بهای هر کیلوگرم سیم محافظ در محل نصب ۶۰۰ ریال
- هزینه هر کیلومتر سیم‌کشی هر سیم - ۵ میلیون ریال
- هزینه هر کیلوگرم نبشی گالوانیزه ۶۰۰۰ ریال و هزینه نصب هر کیلوگرم ۶۰۰ ریال
- هزینه مواد و نصب هر متر مکعب بتون ۱/۲ میلیون ریال
- قیمت هر مقره ۵۰،۰۰۰ ریال و هزینه نصب مقره‌ها در هر کیلومتر ۱/۵ میلیون ریال
- هزینه‌های متفرقه - ده درصد قیمت خط انتقال

### سایر اطلاعات مورد نیاز

- تفاوت بهره و تورم سالیانه - ۴ درصد
- دوره مطالعه - ۳۰ سال
- ضریب ذخیره تولید - ۱/۱
- قیمت هر دلار = ۸۰۰۰ ریال
- هزینه تعمیرات و نگهداری سالیانه - یک درصد سرمایه‌گذاری اولیه

\* توجه شود که قیمت‌های ارائه شده مربوط به تاریخ نگارش گزارش می‌باشد.



\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## ۴-۱- کلیات

به دلیل اهمیت خطوط نیرو کاملاً آشکار است که طراحی آنها باید به نحوی باشد که کلیه مشخصات فنی و اقتصادی لازم را ارائه دهند.

در این فصل عوامل فنی و اقتصادی مرتبط با هادی‌های خطوط نیرو مورد بررسی قرار می‌گیرند به نحوی که رفتار مناسبی را بتوان از خط انتظار داشت. به عبارت دیگر به دلیل اهمیت خطوط نیرو هادی خط باید به نحوی انتخاب شود که مشخصه عملکرد مورد نیاز را بدون انجام طراحی دست بالا و در نتیجه تلف کردن هزینه زیاد و یا انجام طراحی دست پایین که همراه با قابلیت اطمینان پایین و اثرات زیست محیطی و تلفات زیاد و تداخلات رادیویی است، به وجود آورد. لذا هادی باید به نحوی انتخاب گردد که تمامی مسائل فنی و اقتصادی را به طور مناسبی برآورده کند.

در این فصل پارامترهایی که محاسبات آنها در انتخاب هادی‌های استاندارد مؤثر می‌باشند و باید مورد بررسی قرار گیرند به شرح ذیل ارائه شده است :

- مسائل اقتصادی

- مسائل فنی

که لیست مهمترین عوامل مؤثر در مسائل فنی در زیر آورده شده است:

- جریان مجاز هادی‌ها
- جریان اتصال کوتاه
- اختلالات رادیویی و تلویزیونی
- گرادیان ولتاژ
- تلفات
- افت ولتاژ
- محاسبات مکانیکی
- هادی‌های باندل
- آلودگی و خوردگی

با توجه به این که هادی‌های خطوط مبنای انتخاب سایر اجزای خط می‌باشند بررسی و انتخاب صحیح آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید سعی شود در پیش بینی‌ها کلیه عوامل مؤثر در انتخاب هادی مد نظر قرار گیرد.

## ۴-۲- مسائل اقتصادی

هزینه‌های اقتصادی که شامل ارزش حال، هزینه تلفات، هزینه تأمین نیروگاه و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه خط می‌باشد به طور کامل در فصل سوم مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۴-۳- مسائل فنی

علاوه بر آن که انتخاب هادی مناسب برای خطوط نیرو به مسائل اقتصادی برمی‌گردد، مسائل فنی نیز از عواملی است که بر انتخاب هادی تأثیر زیادی می‌گذارد. به عبارت دیگر اگر هادی فقط از دیدگاه اقتصادی انتخاب گردد، مسائل زیادی از قبیل احتمال آسیب رسیدن به هادی از نظر جریان مجاز، مسائل مکانیکی خط، تداخلات رادیویی و تلویزیونی، افت ولتاژ بالا و بسیاری مسائل دیگر به وجود می‌آید که عملاً امکان استفاده مناسب از خط را از بین می‌برد. در ادامه پارامترهای فنی مهم در انتخاب هادی معرفی شده‌اند.

## ۴-۳-۱- جریان مجاز هادی

یکی از اهداف اصلی در طراحی خطوط نیرو بالا بردن میزان توان عبوری از آن است. بهترین توان انتقالی از خط برابر SIL خط می‌باشد که در این حالت ولتاژ یکنواختی در امتداد خط به وجود می‌آید و توان سلفی و خازنی همدیگر را خنثی می‌کنند. ولی مطالعات اقتصادی و حرارتی نشان داده است که انتقال توانی برابر با SIL خط از نظر اقتصادی و فنی به صرفه نمی‌باشد.

مقدار جریان مجاز هادی ثابت نبوده و بسته به شرایط محیطی مختلف متغیر است. از جمله عوامل مختلفی که بر میزان جریان مجاز هادی موثر هستند می‌توان سرعت باد، فشار هوا، دمای محیط، بیشترین دمای مجاز هادی، قطر هادی و شرایط سطحی هادی از نظر جذب و دفع توان حرارتی را نام برد. بیشترین دمای مجاز هادی‌های ACSR معمولاً تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.

به منظور محاسبه جریان مجاز هادی از اصل تعادل حرارتی استفاده می‌شود. در این روش عوامل ایجاد حرارت و عوامل دفع حرارت در هادی مورد بررسی و شناسایی قرار می‌گیرد و با استفاده از اصل نقطه تعادل حرارتی، میزان جریانی که دمای هادی را به بیشترین مقدار مجاز می‌رساند محاسبه می‌شود.

برای برقراری تعادل حرارتی، باید حرارت ایجاد شده به جهت اثر ژولی<sup>۱</sup> و اشعه خورشید<sup>۲</sup>، معادل حرارت خارج شده از هادی به جهت انتقال همرفتی<sup>۳</sup> و تشعشع<sup>۴</sup> باشد.

---

1. Joule effect  
2. Solar radiation  
3. Convection  
4. Radiation



تبادل حرارتی را می‌توان به وسیله رابطه تقریبی (۱-۴) بیان نمود:

$$P_j + P_{sol} = P_{rad} + P_{conv} \quad (۱-۴)$$

که در آن :

$P_j$ : حرارت تولید شده بوسیله اثر ژولی، (W/m)

$P_{sol}$ : حرارت جذب شده خورشید به وسیله سطح هادی، (W/m)

$P_{rad}$ : تلفات حرارتی ناشی از تشعشع حرارت، (W/m)

$P_{conv}$ : تلفات حرارتی ناشی از انتقال همرفتی حرارت، (W/m)

#### ۴-۱-۱-۳-۱- اثر ژولی

تلفات توان ناشی از اثر ژولی از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$P_j = R_T I_{max}^2 \quad (۲-۴)$$

که در آن :

$P_j$ : تلفات توان ناشی از اثر ژولی در دمای T، برحسب وات بر متر.

$R_T$ : مقاومت الکتریکی هادی در دمای T، برحسب اهم بر متر.

$I_{max}$ : حداکثر جریان مجاز هادی در دمای T، برحسب آمپر می‌باشد.

مقاومت الکتریکی هادی در دمای T، بطور تقریبی از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد :

$$R_T = R_{80} \left\{ 1 + \left[ \frac{1}{20} - \left( \frac{R_{100}}{R_{80}} - 1 \right) \right] \times (T - 80) \right\} \quad (۳-۴)$$

که در آن :

T: دمای هادی که رابطه (۳-۴) به مقاومت هادی در آن منجر می‌گردد، برحسب درجه سانتی‌گراد.

$R_{100}$ : مقاومت هادی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، برحسب اهم بر متر.

$R_{80}$ : مقاومت هادی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، برحسب اهم بر متر می‌باشد.

کمیت‌های  $R_{100}$  و  $R_{80}$  برای انواع مختلف هادی‌های آلومینیومی در استاندارد IEC شماره ۶۱۵۹۷ آمده است.

#### ۴-۱-۳-۲- بهره جذب انرژی حرارتی خورشید

بهره جذب انرژی حرارتی خورشید از رابطه زیر تعیین می‌گردد :

$$P_{sol} = \gamma \cdot D \cdot S_i \quad (۴-۴)$$

که در آن :

$P_{sol}$ : بهره جذب انرژی خورشید، برحسب وات بر متر

$\gamma$ : کمیتی ثابت که نشان دهنده ضریب جذب انرژی خورشید بوده و مقدار آن بین ۰/۳ تا ۰/۹ است. مقدار این کمیت برای

هادی‌های آلومینیومی عموماً برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

D : قطر هادی، برحسب متر

$S_i$  : شدت اشعه خورشید، برحسب وات بر متر مربع است. مقدار این کمیت تابع شرایط آب و هوایی محل پست، زاویه تابش خورشید و ... می باشد. در صورت نبود اطلاعات دقیق درخصوص این پارامتر می توان آن را برابر ۹۰۰ وات بر متر مربع در نظر گرفت.

#### ۴-۳-۱-۳- تلفات حرارتی ناشی از تشعشع حرارت

تلفات حرارتی ناشی از تشعشع حرارت از هادی، از رابطه زیر بدست می آید :

$$P_{\text{rad}} = S\pi DK_e (T_2^4 - T_1^4) \quad (۵-۴)$$

که در آن :

$P_{\text{rad}}$  : تلفات حرارتی ناشی از تشعشع حرارت از هادی، برحسب وات بر متر

$$S : \text{ثابت بولتزمن } (۵/۶۷ \times ۱۰^{-۸} \text{ w m}^{-2} \text{ k}^{-4})$$

D : قطر هادی، برحسب متر

$K_e$  : کمیتی ثابت است که نشان دهنده ضریب صدور تشعشع<sup>۱</sup> از هادی نسبت به اجسام تیره می باشد. مقدار این کمیت برای هادی های آلومینیومی و آلیاژهای آن عموماً برابر ۰/۶ در نظر گرفته می شود.

$T_1$  : درجه حرارت متوسط محیط، برحسب درجه کلون

$T_2$  : درجه حرارت نهایی هادی برحسب درجه کلون

#### ۴-۳-۱-۴- تلفات حرارتی ناشی از انتقال همرفتی حرارت

تلفات حرارتی ناشی از انتقال همرفتی حرارت از هادی به محیط پیرامونش از رابطه زیر بدست می آید :

$$P_{\text{conv}} = \lambda \cdot \text{Nu} \cdot (T_2 - T_1) \pi \quad (۶-۴)$$

که در آن :

$P_{\text{conv}}$  : تلفات حرارتی ناشی از انتقال همرفتی حرارت از هادی به محیط پیرامون، برحسب وات بر متر.

$\lambda$  : هدایت حرارتی لایه ای از هوا می باشد که با سطح هادی در تماس است. فرض می شود که مقدار این کمیت ثابت و برابر  $0/02585 \text{ w.m}^{-1} \text{ k}^{-1}$  می باشد.

Nu : عدد ناسلت<sup>۲</sup>، که با استفاده از رابطه زیر تعیین می گردد :

$$\text{Nu} = 0.65\text{Re}^{0.2} + 0.23\text{Re}^{0.61} \quad (۷-۴)$$

که در آن :

Re : عدد رینولدز<sup>۳</sup> است و از رابطه زیر تعیین می گردد :

$$\text{Re} = 1.644 \times 10^9 \text{VD} [T_1 + 0.5(T_2 - T_1)]^{-1.78} \quad (۸-۴)$$

1 . Emissivity coefficient  
2 . Nusselt number  
3 . Reynolds number

که در آن :

D : قطر هادی بر حسب متر

V : سرعت باد تقریباً دائمی بوده که به صورت عمود بر هادی می‌وزد و برحسب متر بر ثانیه می‌باشد.

حداکثر جریان عبوری از هادی را می‌توان تحت یک شرایط مشخص با استفاده از روابط فوق به صورت زیر تعیین کرد :

$$I_{\max} = \sqrt{(P_{\text{rad}} + P_{\text{conv}} - P_{\text{sol}})/R_T} \quad (9-4)$$

براساس روابط ارائه شده فوق، برخی استانداردها جداولی را تهیه نموده‌اند که با داشتن اطلاعات هادی مورد نظر می‌توان به جریان مجاز دائمی آن دسترسی پیدا نمود (به عنوان مثال استاندارد DIN شماره ۴۸۲۰۱ و IEC شماره ۶۱۵۹۷ برای هادی‌های رشته‌ای آلومینیومی این جریانه‌ها را محاسبه نموده‌اند).

جداولی که توسط استانداردهای مذکور تهیه گردیده‌اند، جریانه‌های مجاز مقاطع مختلفی از هادی‌ها را با مفروضات مشخص به همراه سایر مشخصات مورد نیاز ارائه می‌دهند. با استفاده از این جداول می‌توان جریان مجاز دائمی هادی مورد نظر را برحسب نوع، جنس و سطح مقطع هادی و با در نظر گرفتن شرایط فرض شده در این جداول استخراج نموده و سپس با توجه به شرایط واقعی مورد نیاز، تصحیحات لازم را در انتخاب خود انجام داده و جریان مجاز واقعی را برای هادی مورد نظر به دست آورد.

در جدول (۴-۱) جریان مجاز هادی‌های استاندارد برای ۴ منطقه آب و هوایی محاسبه شده‌اند. در محاسبه این جریانه‌ها فرضیات

زیر به کار رفته است:

ارتفاع منطقه: ۱۰۰۰ متر

حداکثر درجه حرارت هادی: ۹۰ درجه سانتیگراد

توان تابشی خورشید: ۱۰۲۳ وات بر مترمربع

ضریب دفع و جذب حرارت سطح هادی: ۰/۹

سرعت باد: ۰/۶۱ متر بر ثانیه

ضریب ویژه حرارتی آلومینیوم: ۰/۰۰۴ بر درجه سانتیگراد

حداکثر درجه حرارت محیط در چهار منطقه آب و هوایی:

منطقه سبک: ۵۰ درجه سانتیگراد

منطقه متوسط: ۴۵ درجه سانتیگراد

منطقه سنگین: ۴۰ درجه سانتیگراد

منطقه فوق سنگین: ۳۰ درجه سانتیگراد

جدول ۴-۱: جریان مجاز هادی‌ها در چهار منطقه آب و هوایی

جریان مجاز (آمپر)				نام هادی
منطقه فوق سنگین	منطقه سنگین	منطقه متوسط	منطقه سبک	
۶۸۶	۶۱۲	۵۷۲	۵۲۹	Lynx
۸۰۸	۷۲۱	۶۷۴	۶۲۲	Hawk
۹۳۷	۸۳۶	۷۸۰	۷۲۰	Squab
۱۰۳۹	۹۲۶	۸۶۴	۷۹۶	Starling
۱۱۸۵	۱۰۵۵	۹۸۴	۹۰۶	Canary
۱۲۸۳	۱۱۴۲	۱۰۶۴	۹۸۰	Curlew
۱۳۸۷	۱۲۳۴	۱۱۴۹	۱۰۵۸	Grackle

#### ۴-۳-۲- جریان اتصال کوتاه

از عوامل دیگری که در انتخاب سطح مقطع هادی‌ها مؤثر می‌باشد. جریان اتصال کوتاه است. افزایش دما در زمان وقوع اتصال کوتاه به مدت استمرار این جریان وابسته بوده که این زمان مجموع زمان عملکرد رله و کلیدها می‌باشد. زمان فوق برای سطوح ولتاژی مختلف در جدول (۲-۴) آمده است. موارد فوق بر مبنای عملکرد صحیح سیستم حفاظتی استوار است و در صورتی که این سیستم عملکرد مناسبی نداشته باشد، جریان اتصال کوتاه توسط رله پشتیبان قطع خواهد شد. در نتیجه زمان قطع جریان اتصال کوتاه بیشتر شده و باید هادی‌ها بتوانند چنین زمانی را تحمل نمایند. با توجه به مطالب فوق، مدت زمان جریان اتصال کوتاه روی خط یک ثانیه انتخاب می‌گردد و اصل تعیین حداقل سطح مقطع برای هادی‌ها براساس زمان یک ثانیه استوار خواهد بود.

جدول ۴-۲: زمان عملکرد رله و کلید

سطح ولتاژ (kV)	سیکل	میلی ثانیه
۴۰۰	≤۲	≤۴۰
۲۳۰	≤۳	≤۶۰
۱۳۲	≤۳	≤۶۰
۶۳	≤۴	≤۸۰

سطح اتصال کوتاه هر پست نیز مقدار متغیری است که با توجه به شرایط گسترش شبکه تغییر می‌یابد. این مقدار برای هر پست می‌بایستی با توجه به شرایط موجود و پیش بینی گسترش آینده محاسبه شود.

در شرایط اتصال کوتاه که به طور موقت و کوتاه مدت در خطوط اتفاق می‌افتد، هادی می‌تواند دمای بالاتری از دمای هادی در شرایط ماندگار را تحمل نماید. این دما باید با توجه به اثرات دما روی قسمت فلزی هادی و نیز گریس مورد استفاده توسط کارخانه سازنده دقیقاً مشخص شود. جدول (۳-۴) حداکثر دمای مجاز انواع هادی را در حالت اتصال کوتاه نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳: حداکثر دمای مجاز هادی در حالت اتصال کوتاه

نوع هادی	حداکثر دمای مجاز در حالت اتصال کوتاه
ACSR	۱۸۰
AAC	۱۸۰
AAAC	۱۵۰
TACSR	۲۶۰
AS	۲۰۰
GS	۲۰۰

با توجه به قوانین فیزیکی حرارتی حاکم بر هادی در مدت اتصال کوتاه می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که با توجه به زمان کوتاه اتصال کوتاه، انرژی حرارتی ناشی از عبور این جریان به بیرون از هادی منتقل نشده و فقط سبب افزایش دمای هادی می‌شود. حال با توجه به مطالب فوق و روابط حاکم حرارتی بر هادی در زمان اتصال کوتاه می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه سطح مقطع هادی‌های تشکیل شده از یک فلز که تحمل اتصال کوتاه مورد نظر را داشته باشد، استفاده گردد.

$$A = \frac{I_k 1000 \sqrt{t}}{\sqrt{4.184 \frac{C \omega_d}{\rho_1 \alpha} \ln[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]}} \quad (۱۰-۴)$$

که در رابطه فوق :

A : سطح مقطع هادی

$I_k$  : جریان اتصال کوتاه (کیلو آمپر مؤثر)

t : زمان اتصال کوتاه (ثانیه)

C : ضریب حرارتی ویژه ( $\frac{\text{Cal.}^\circ\text{C}}{\text{g}}$ )

$\omega_d$  : چگالی وزنی (گرم بر سانتیمتر مکعب)

$\rho_1$  : مقاومت ویژه در دمای  $\theta_1$  (اهم در میلیمتر مربع بر متر)

$\alpha$  : ضریب حرارتی (معکوس درجه سانتیگراد)

$\theta_1$  : دمای اولیه هادی (درجه سانتیگراد)

$\theta_2$  : دمای ماکزیمم هادی (درجه سانتیگراد)

ظرفیت حرارتی ویژه آلومینیوم برابر با  $0.2171 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$  و چگالی وزنی آلومینیوم برابر  $2.7 \text{ g.cm}^{-3}$  است.

برای محاسبه  $\rho_1$  در هر دمائی از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\rho_1 = \rho_{20} [1 + \alpha(\theta_1 - 20)] \quad (۱۱-۴)$$

که در آن  $\rho_{20}$  برای آلومینیوم برابر  $0.0286 \Omega.\text{mm}^2.\text{m}^{-1}$  می‌باشد.

چنانچه هادی‌های استفاده شده از دو جنس مختلف مثلاً آلومینیوم و فولاد تشکیل شده باشند باید از رابطه زیر استفاده نمود.

$$\frac{1}{4.1868} I_k^2 R \Delta t = A_a \omega_a C_a (\theta_2 - \theta_1) + A_s \omega_s C_s (\theta_2 - \theta_1) \quad (۱۲-۴)$$

که در رابطه فوق :

$A_a$ : سطح مقطع آلومینیوم (میلیمتر مربع)

$A_s$ : سطح مقطع فولاد (میلیمتر مربع)

$\omega_a$ : وزن مخصوص آلومینیوم برابر ۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب

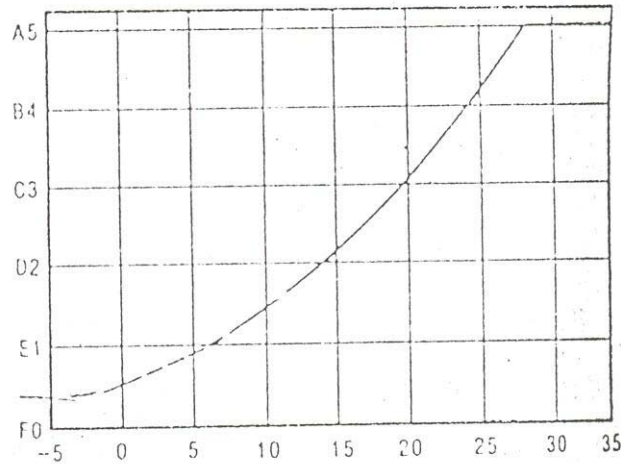
$\omega_s$ : وزن مخصوص فولاد برابر ۷/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد.

برای حل این معادله از روش تکراری استفاده شده و مقدار R در هر تکرار تصحیح می‌شود و تکرار آن قدر ادامه می‌یابد تا دمای هادی از ماکزیمم دمای کار  $90^\circ\text{C}$  در حالت عادی به دمای  $180^\circ\text{C}$  (دمای قابل قبول برای هادی ACSR در حالت اتصال کوتاه) برسد.

مدت زمانی که این افزایش دما صورت می‌گیرد به عنوان زمانی که هادی می‌تواند جریان اتصال کوتاه را تحمل کند در نظر گرفته می‌شود. با ساده کردن روابط (۴-۱۰) و (۴-۱۲) و یکپارچه کردن سایر پارامترها، رابطه (۳-۱۱) به دست می‌آید و می‌توان رابطه بین جریان اتصال کوتاه و سطح مقطع هادی را از این رابطه نیز به دست آورد. مقدار K برای ACSR برابر ۸۵ می‌باشد.

#### ۴-۳-۳- اختلالات رادیویی و تلویزیونی

یکی از اثرات و نتایج پدیده کرونا در خطوط انتقال نیرو، اختلالات رادیویی و تلویزیونی می‌باشد. در زمان وقوع پدیده کرونا پالسهای نوسانی از جریان و ولتاژ ایجاد می‌شوند که فرکانس این پالسها در محدوده‌ای است که می‌تواند بر باند فرکانس رادیویی و تلویزیونی تأثیرگذار باشد که به آن تداخل رادیویی (RI) یا تداخل تلویزیونی (TVI) گفته می‌شود. این اغتشاشات بسته به ناحیه عبور خط نباید از حد معینی بیشتر گردد، از این جهت سطح اغتشاش محاسبه شده به صورت قید در انتخاب هادی اعمال می‌شود. محدوده گرادپان سطحی که ایجاد RI می‌کند به عوامل متعددی بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به قطر هادی، آرایش و شکل هادی‌ها در باندل، شرایط جوی و ارتفاع از سطح دریا اشاره نمود. در عمل نیز مشخص نمودن سطح اغتشاشات رادیویی (RI) که موجب تداخلات ناخواسته می‌شود بسیار مشکل است و دلیل این امر وجود همیشگی مقداری سطح تداخل در محیط (بدون وجود خط و ناشی از عوامل دیگر) می‌باشد. از سوی دیگر شدت سیگنالهای دریافتی رادیویی در محل نیز بسیار مهم است. خط انتقالی که در اطراف شهرها به علت پائین بودن سطح تداخل رادیویی در محیط و نیز پایین بودن شدت سیگنال دریافتی رادیویی به عنوان خط با اغتشاش محسوب می‌گردد می‌تواند در یک منطقه شهری که سطح اغتشاشات محیطی و نیز شدت سیگنال دریافتی رادیویی قوی می‌باشد به عنوان یک خط با اغتشاش کم مطرح شود. به همین دلیل از معیار سیگنال به نویز (SNR) جهت ارزیابی مقدار اغتشاش استفاده می‌شود. سطح سیگنال به نویز به معنای نسبت قدرت متوسط سطح سیگنال در یک باند رادیویی به قدرت متوسط سطح نویز در همان باند رادیویی است. شکل (۴-۱) تأثیر این مقدار به کیفیت سیگنال دریافتی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: کیفیت دریافت سیگنالهای رادیویی بر حسب نسبت سیگنال به نویز

A<sub>5</sub>: سطح کاملاً رضایت‌بخش

B<sub>4</sub>: سطح بسیار خوب

C<sub>3</sub>: نسبتاً رضایت‌بخش، زمینه بصورت واضح (نویز کم)

D<sub>2</sub>: وجود نویز در زمینه وجود دارد ولی سیگنال صوتی به راحتی تشخیص داده می‌شود.

E<sub>1</sub>: سیگنال صوتی قابل فهم است ولی کم و زیاد شدن سیگنال مشهود است.

F<sub>0</sub>: سیگنال صوتی غیرقابل مفهوم

برای بررسی مسائل تداخل رادیویی و تلویزیونی از تعریف مشابه دیگری بصورت نسبت شدت سیگنال به شدت نویز استفاده می‌شود. از سوی دیگر مسأله تعیین کیفیت تداخلات RI در سیگنالهای رادیویی یک مبحث کاملاً کیفی است، به این معنا که دو شنونده مختلف دارای دو درک متفاوت از یک میزان اغتشاش رادیویی می‌باشند. طبق استاندارد مخابرات آمریکا (FCI) لازم است حد مجاز سیگنال به نویز از ۲۴ دسی‌بل بزرگتر باشد.

جریانها، ولتاژها و میدانهای RI در هر نقطه‌ای از طول خط معمولاً نتیجه تأثیر عوامل مولد اغتشاش مانند بروز کرونا در قسمتهایی از هادی، بروز جرقه درگیره‌های نگهدارنده هادی‌ها و یراق‌آلات متصل به آن و بروز جرقه در سطح مقره‌ها می‌باشد. بنابراین مقدار RI اندازه‌گیری شده در هر نقطه از خط می‌تواند نتیجه تولید اغتشاشات به وسیله عوامل یادشده در نقطه‌ای دیگر از خط باشد که در طول خط انتشار یافته است. میدان RI در هر نقطه‌ای از طول خط معمولاً نتیجه پالسهای جریانی است که در چندین نقطه از خط در هادی تزریق می‌شوند. این پالسها به نوبه خود نتیجه پدیده کرونا هستند و لذا محدود کردن تداخلات از طریق محدود کردن کرونا امکان‌پذیر خواهد بود.

روشهای محاسبه این اختلالات مبتنی بر دو روش تحلیلی و قیاسی می‌باشد. در روش قیاسی، اساس کار، مقایسه بین مختصات هندسی خط جدید با خط مرجعی است که برای آن داده‌های اندازه‌گیری موجود می‌باشد. در این روش با ضرایب تصحیحی که به سطح اغتشاش خط مرجع اعمال می‌گردد، سطح اغتشاش برای خط جدید محاسبه می‌شود. از معایب عمده این روش عدم انعطاف‌پذیری و عدم دقت قابل توجه آن است. در روش قیاسی مشخصات عمومی برای هر سطح ولتاژ با تعیین و محاسبات دقیق

برای حالت مبنا انجام می‌شود و سپس نمودارهایی برای تصحیح نتایج در شرایط متفاوت با مشخصات مبنا ارائه می‌گردد. نمونه‌هایی از این حالات مبنا را می‌توان در مراجع [۸ و ۱۲] یافت.

در روش تحلیلی از محاسبات بسیار پیچیده‌ای استفاده می‌گردد که عملاً بدون استفاده از برنامه‌های کامپیوتری ویژه قابل استفاده نیستند. اساس این روش را می‌توان در مراجع [۸ و ۱۲] یافت.

بنابراین در مرحله طرح خطوط نیرو باید در مسیر خط و فواصل مختلف از خط مقدار تداخلات محیطی را اندازه گرفته سپس به کمک یکی از روشهای قیاسی یا تحلیلی میزان اختلالات رادیویی و تلویزیونی را محاسبه نمود.

از مجموع مقادیر فوق و با توجه به مفهوم عبارت سیگنال به نویز (SNR) چنانچه این مقدار در محدوده قابل قبول باشد، خط طراحی شده از نظر اختلالات رادیویی و تلویزیونی مورد قبول واقع می‌شود.

با توجه به اینکه تداخلات رادیویی و تلویزیونی معلول پدیده کرونا است لذا طراح می‌تواند با محدود کردن سطح شروع پدیده کرونا این تداخلات را نیز محدود کند. در عمل به هنگام طراحی خطوط نیرو سعی می‌شود که گرادیان ولتاژ سطحی هادی از  $17 \text{ kV/cm}$  تجاوز ننماید. طراح بایستی دقت کند که در مناطقی که سطح سیگنال رادیویی و تلویزیونی پایین است تا حد امکان گرادیان سطحی را به مقادیر کمتر محدود کند.

#### ۴-۳-۴- گرادیان ولتاژ

معمولاً در طراحی خطوط نیرو با در نظر گرفتن شرایط مختلف جوی و نیز ایجاد ضرایب اطمینان مناسب شدت میدان بحرانی را  $17 \text{ kV/cm}$  در نظر می‌گیرند به نحوی که شدت میدان الکتریکی در سطح هادی باید کمتر از این مقدار باشد. نحوه محاسبه گرادیان ولتاژ هادی در بند ۳-۵ آمده است.

#### ۴-۳-۵- تلفات

تلفات توان و انرژی در خطوط نیرو نقش عمده‌ای در انتخاب هادی‌ها دارد که این مسئله به مشخصات فنی هادی‌ها و شرایط محیطی در هنگام بهره‌برداری ارتباط مستقیم دارد.

اصولاً تلفات در خطوط به دو بخش تلفات اهمی و تلفات کرونا تقسیم می‌شود که تلفات کرونا در مقایسه با تلفات اهمی ناچیز است ولی پیک تلفات کرونا در مقایسه با پیک تلفات اهمی قابل ملاحظه است. مهمترین عامل تلفات قدرت و انرژی در خطوط انتقال نیرو مقاومتی است که هادی در برابر عبور جریان از خود بروز می‌دهد. این مقاومت به دو عامل زیر بستگی دارد:

- مشخصات فنی هادی شامل سطح مقطع، طول و مقاومت ویژه هادی
  - شرایط جانبی چون درجه حرارت و فرکانس جریان عبوری
- تغییر فرکانس (به سبب پدیده اثر پوستی) باعث کاهش سطح مقطع مؤثر عبور جریان شده و مقاومت هادی را افزایش می‌دهد. درجه حرارت هادی خود تابعی است از دامنه جریان عبوری و شرایط محیطی و با افزایش درجه حرارت هادی، مقاومت هادی نیز افزایش می‌یابد.

برای محاسبه تلفات اهمی باید با توجه به تغییرات مقاومت بر اثر تغییر دما، این مقاومت را محاسبه نمود:



$$\frac{R_2}{R_1} \approx \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \quad (۱۳-۴)$$

$t_1$  و  $t_2$ : دمای هادی در دو شرایط مختلف ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T$ : برای هادی آلایژ آلومینیوم برابر ۲۲۵ و برای هادی آلومینیوم - فولاد برابر ۲۲۳ است.

مقاومت dc هادی از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$R_{dc} = \rho \frac{L}{A} \quad (۱۴-۴)$$

که در آن:

$\rho$ : مقاومت ویژه هادی ( $\Omega\text{m}$ )

$L$ : طول مقاومت هادی (m)

$A$ : سطح مقطع هادی ( $\text{m}^2$ ) می‌باشد.

عملاً مقاومت ac در فرکانس ۵۰Hz تقریباً برابر مقاومت dc هادی است با این وجود از رابطه تقریبی زیر می‌توان مقاومت ac

هادی را محاسبه نمود:

$$R_{ac} = R_{dc} + 1.5 \times 10^{-3} \times (R_{dc}^{0.25} - R_{dc}^{-0.25})^2 \quad (۱۵-۴)$$

با روابط ارائه شده، مقاومت مؤثر هادی را در شرایط بهره‌برداری و با فرض مشخص بودن درجه حرارت هادی می‌توان محاسبه

کرد. با محاسبه  $R_{ac}$  که برابر مقاومت مؤثر در برابر عبور جریان می‌باشد می‌توان تلفات خط را از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$P_{\text{loss}} = \frac{R_e P_{av}^2}{n_b V_L^2 \cos^2 \varphi} \quad (۱۶-۴)$$

$R_e$ : مقاومت مؤثر هادی در شرایط بهره‌برداری با فرض دمای میانگین  $T_c$  ( $\Omega$ )

$P_{av}$ : توان متوسط عبوری از خط (kW)

$n_b$ : تعداد هادی در باندل

$V_L$ : ولتاژ خط (kV)

$\cos \varphi$ : ضریب توان (از تغییرات ضریب توان در دوره‌های زمانی مختلف صرف‌نظر می‌شود).

بنابراین تلفات انرژی در دوره زمانی یک ساله برای یک خط انتقال از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن  $H$  مدت زمان برحسب

ساعت می‌باشد (برای مدت یک سال این پارامتر برابر ۸۷۶۰ در نظر گرفته می‌شود).

$$E_{\text{loss}} = \frac{R_e P_{av}^2}{n_b V_L^2 \cos^2 \varphi} H \quad (۱۷-۴)$$

در فرآیند انتخاب هادی بهینه، تلفات سالیانه انرژی در هادی‌های خطوط نقش مهمی دارد. در طول دوره بهره‌برداری از خط،

جریان‌های مختلف در شرایط محیطی متفاوت از هادی عبور می‌کند. بنابراین در هر دوره زمانی، هادی مقاومت متفاوتی از خود بروز

می‌دهد.

دمای میانگین هادی ( $T_c$ ) را می‌توان از روی  $P_{av}$  تخمین زد. برای این منظور از رابطه تعادل حرارتی در شرایط بهره‌برداری از

هادی با فرض عبور توان متوسط  $P_{av}$  می‌توان استفاده نمود. البته فرض بر این است که کلیه شرایط در حد میانگین باشد:

$$R_e I_{av}^2 + 10^5 W_s = 10^5 (W_c + W_r) A \quad (۱۸-۴)$$

که در آن:

$I_{av}$ : جریان متوسط عبوری از خط (A)

$W_s$ : قدرت جذب شده از تابش خورشید ( $W/cm^2$ )

$W_c$ : قدرت تلف شده در واحد سطح توسط همرفتی ( $W/cm^2$ )

$W_r$ : قدرت تلف شده در واحد سطح توسط تشعشع ( $W/cm^2$ )

A: سطح خارجی هادی بر حسب  $cm^2$  برای طول یک cm از هادی می باشد.

پس از حل معادله تعادل حرارتی (۱۸-۴)، دمای متوسط محاسبه می شود که با توجه به آن می توان مقاومت و تلفات اهمی را حساب کرد. لازم به ذکر است که تلفات قدرت در خط نباید از ۵ درصد توان انتقالی خط بیشتر شود.

در خطوط نیرو زمانی که گرادیان ولتاژ در سطح هادی از مقاومت حد شکست عایقی هوا بیشتر شود، تلفات کرونا روی می دهد. شکست عایقی هوا در نزدیکی هادی، تولید گرما، نور، اغتشاشات رادیویی و صوتی می کند. کلیه این پدیده ها موجب آزاد شدن انرژی الکترومغناطیسی می شوند. اثر اقتصادی تلفات کرونا ناشی از دو عامل است، تلفات متوسط سالیانه و تلفات ماکزیمم که این دو عامل از نظر اقتصادی متفاوت عمل می کند. اثر اقتصادی تلفات متوسط سالیانه براساس تأثیری که در افزایش مصرف سوخت دارد، محاسبه می شود در حالی که اثر اقتصادی تلفات ماکزیمم براساس این که چه مقدار در افزایش ظرفیت تولید مؤثر است، محاسبه می شود. عملاً تلفات متوسط کرونا بسیار کمتر از متوسط تلفات مقاومتی (اهمی) است در حالی که ماکزیمم تلفات کرونا در حد ماکزیمم تلفات اهمی است.

تلفات کرونا تابعی از خصوصیات هندسی هادی، گرادیان ولتاژ سطح هادی، ولتاژ و شرایط آب و هوایی مسیر خط می باشد. تلفات کرونا از مقادیر کم کیلووات بر کیلومتر در هوای خوب و تا چند صدکیلووات بر کیلومتر در آب و هوای بارانی یا برفی تغییر می کند. برای محاسبه تلفات کرونای تک فاز در شرایط آب و هوایی خوب از رابطه زیر استفاده می شود:

$$P = \frac{0.209 \times 10^{-4}}{[\log_{10}(2s/d)]^2} fV^2 F \quad (۱۹-۴)$$

که در آن:

P: تلفات (KW/km)

F: فرکانس (Hz)

V: ولتاژ مؤثر خط به زمین (KV)

s: فاصله بین هادی ها

d: قطر هادی

F: ضریب کرونا که با آزمایش تعیین می شود و تابعی از نسبت V به  $V_0$  است [۱۳].

لازم است یادآوری شود که مقدار تلفات اهمی به میزان بار خط وابسته بوده در حالی که تلفات کرونا به ولتاژ و شرایط آب و هوایی و ارتفاع از سطح دریا بستگی دارد.

## ۴-۳-۶- افت ولتاژ

برای طراحی یک خط نیرو لازم است که ولتاژ در نقاط مختلف آن در محدوده معین شده قرار بگیرد. چرا که یکی از شروط اصلی برای انتقال قدرت، کنترل ولتاژ سیستم در محدوده قابل قبول می‌باشد.

عموماً در شبکه‌های به هم پیوسته محاسبات افت ولتاژ و پخش بار به کمک برنامه‌های کامپیوتری انجام می‌شود، لیکن شناخت اولیه در خصوص تنظیم ولتاژ را می‌توان با استفاده از مدار معادل خط بررسی نمود. برای محاسبه ولتاژ هر نقطه از خط، (با توجه به مدل گسترده خط) از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$V^{(x)} = \cosh(\gamma x) V_R + Z_C \sinh(\gamma x) I_R \quad (۲۰-۴)$$

$$I^{(x)} = \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma x) V_R + \cosh(\gamma x) I_R \quad (۲۱-۴)$$

در معادلات فوق  $Z_C$  امپدانس مشخصه خط است که به طول خط بستگی ندارد و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}} \quad (۲۲-۴)$$

عبارت  $\gamma$  که ثابت انتشار است از طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)} \quad (۲۳-۴)$$

در رابطه فوق  $R, L, C$  و  $G$  به ترتیب مقاومت، اندوکتانس، کاپاسیتانس و کنداکتانس در واحد طول خط هستند.

برای محاسبه ولتاژ و جریان ابتدای خط ( $I_S, V_S$ ) بر حسب ولتاژ و جریان انتهایی خط ( $I_R, V_R$ ) و بر عکس معادلات زیر قابل استفاده هستند.

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (۲۴-۴)$$

$$I_S = CV_R + AI_R \quad (۲۵-۴)$$

$$V_R = AV_S - BI_S \quad (۲۶-۴)$$

$$I_R = -CV_S + AI_S \quad (۲۷-۴)$$

که در روابط فوق :

$$A = \cosh(\gamma L) \quad (۲۸-۴)$$

$$B = Z_C \sinh(\gamma L) \quad (۲۹-۴)$$

$$C = \frac{1}{Z_C^2} B \quad (۳۰-۴)$$

لازم به ذکر است که افت ولتاژ در خط کاملاً وابسته به میزان بارگیری از خط بوده و یکی از عوامل محدودسازی توان انتقالی خطوط می‌باشد. معمولاً افت ولتاژ خط تا حد  $\pm 5\%$  قابل قبول است.

### ۴-۳-۷- محاسبات مکانیکی

تحمل مکانیکی هادی در مقابل کشش ایجادشده در شرایط مختلف آب و هوایی و نیز فلشی که در هادی در بدترین شرایط بارگذاری یا دما بوجود می‌آید در انتخاب نوع هادی خطوط نیرو مؤثر می‌باشد. شرایط آب و هوایی متنوع و هادی‌های مختلف سبب می‌شوند که هر هادی اسپن معادل طراحی متفاوتی از بقیه هادی‌ها داشته باشد.

با افزایش اسپن معادل طراحی و متعاقب آن کاهش تعداد دکلها، هزینه خط کاهش می‌یابد. از طرفی این مسئله از نظر بارگذاری، هزینه ساخت و اجرای فونداسیونها را افزایش می‌دهد. بنابراین در طراحی خطوط با انتخاب هادی مناسب بایستی تعادلی بین موارد فوق برقرار نمود.

عوامل محدودکننده اسپن معادل طراحی، فلش هادی و کشش مجاز هادی در سخت‌ترین شرایط آب و هوایی می‌باشند. روش محاسبه کشش و فلش هادی در بند ۳-۳ ارائه شده است.

در این حالت حداقل فاصله هادی از سطح زمین نباید از حدود مجاز کمتر باشد و در اسپنی که در آن ماکزیمم کشش روی هادی رخ می‌دهد نباید بیشتر از حاصل قسمت حد گسیختگی نهایی هادی بر ضریب اطمینان باشد. به طور کلی طراحی بایستی به نحوی صورت گیرد که نیروی وارد شده به هادی‌ها در شرایط مختلف بارگذاری از مقادیر مجاز زیر فراتر نرود:

کشش حداکثر کوچکتر یا مساوی ۵۰ درصد U.T.S

کشش روزمره<sup>۱</sup> کوچکتر یا مساوی ۲۰ درصد U.T.S

کشش در دمای حداقل کوچکتر یا مساوی ۲۵ درصد U.T.S

کشش در یخ و باد نرمال کوچکتر یا مساوی ۴۰ درصد U.T.S

برای بالابردن استقامت مکانیکی خط باید از مقاطعی با نسبت فولاد به آلومینیوم بیشتر استفاده کرد.

### ۴-۳-۸- هادی‌های باندل (هادی‌های گروهی)

به دلیل لزوم انتقال توانهای بالا توسط خطوط نیرو، که بوسیله خطوط ولتاژ بالا انجام می‌شود، مشکلات جدیدی نیز بروز می‌کند که از جمله آنها افزایش گرادیان ولتاژ در سطح هادی‌ها، کرونا، اختلالات رادیویی، نیاز به هادی‌ها با مقاطع بزرگتر و نیاز به کاهش راکتانس خط می‌باشد.

- استفاده از هادی‌های گروهی راه حلی است که پاسخگوی مشکلات فوق می‌باشد. از آنجا که استفاده از هادی‌های گروهی

افزایش قیمت خطوط را به دنبال خواهد داشت در خطوطی که ولتاژ خط چندان بالا نباشد کاربردی ندارند.

در مواردی که از هادی‌های باندل استفاده می‌شود، باید ملاحظاتی از قبیل انتخاب فاصله‌دهنده مناسب برای حفظ فاصله بین هادی‌ها، اعمال دقت لازم در تنظیم کشش یکسان هادی‌ها و مطالعات مربوط به سرعت باد و جهت باد غالب در طول سال و انواع نوسانات، مورد نظر قرار گیرند.

در یک هادی باندل، جریان بطور مساوی بین هادی‌های فرعی تقسیم نخواهد شد مگر اینکه در طول باندل، جابجایی (ترانسپوزه) صورت گرفته باشد ولی تفاوت جریان در آنها مقدار ناچیزی است که در عمل اهمیتی ندارد.

#### ۴-۳-۹- خوردگی و خوردگی

مقاوم بودن و دوام آوردن در برابر خوردگی یک ویژگی بسیار مهم محسوب می‌گردد. هادی‌های آلومینیومی که در خطوط انتقال نیرو و توزیع هوایی بکار می‌روند بسته به شرایط جوی و جغرافیایی مسیر خط در معرض عوامل گوناگون قرار گرفته و از آنها تأثیر می‌پذیرند. یکی از عوامل بسیار مؤثر بر طول عمر مفید هادی‌های آلومینیومی پدیده خوردگی است.

به عنوان مثال هنگامی که این هادی‌ها در خطوطی نصب می‌شوند که از مناطق فرساینده و خورنده مانند سواحل دریا، مناطق صنعتی، مولد دودهای اسیدی، کوپرهای نمکی، نزدیکی آتشفشان‌ها و نظایر آن عبور می‌کنند، لازم است که کلیه عوامل موجب خوردگی در این گونه مناطق را به دقت مورد توجه قرار داد. با توجه به بررسی‌های انجام شده در شرایطی که امکان خوردگی بالا باشد، مناسب است که از هادی‌های ACSR/AZ یا AAAC استفاده شود.

یکی از مؤثرترین و رایج‌ترین پدیده‌هایی که باعث خوردگی می‌شود، عمل گالوانیک است. عمل گالوانیک معمولاً هنگامی وقوع پیدا می‌کند که دو فلز غیر همجنس با یکدیگر در تماس الکتریکی قرار گیرند. سیم آلومینیومی نیز مانند سیم فولادی اگر در یک مایع الکترولیت فرو برده شود، ابتدا در آن یونیزه و سپس دچار خوردگی می‌شود و در بعضی از الکترولیتها پس از تشکیل لایه پسیو عمل خوردگی متوقف می‌گردد و همینطور است در مورد یک سیم آلومینیومی نیز این چنین است. در صورتی که احتمال خوردگی در مسیر وجود داشته باشد می‌توان از گریسه‌های محافظ و یا هادی‌های ACSR/AS استفاده کرد. وزن مجاز گریس برای هادی‌های مختلف و نحوه محاسبه آن در استاندارد IEC شماره ۶۱۰۸۹ آمده است.

#### ۴-۴- حل یک مثال نمونه

هدف از این بخش انتخاب هادی جهت یک خط با مشخصات زیر است:

- طول خط : ۱۴۲ کیلومتر
- شرایط جوی : معتدل
- بار متوسط : ۳۷۲ مگاوات
- آلودگی : متوسط
- حداکثر دمای محیط : ۴۰ درجه سانتیگراد
- سطح ولتاژ : ۴۰۰ کیلوولت
- سرعت باد : ۴۰ متر بر ثانیه
- جریان اتصال کوتاه : ۵۰ کیلوآمپر
- فاصله فازها : ۷/۳ متر
- آرایش فازها : افقی

- ضریب قدرت : ۰/۹ پس فاز

با وجود آنکه جهت انتخاب هادی پارامترهای زیادی معرفی شدند که بایستی در نظر گرفته شوند، اما با توجه به سطح ولتاژ، تنها چند عامل در انتخاب هادی موثر خواهند بود. به عنوان مثال در سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت، اگر خط طراحی شده مشکلی از جهت گرادیان ولتاژ نداشته باشد طراح اغلب می تواند اطمینان داشته باشد که خط جریان کار دائم را نیز تحمل می کند. علاوه بر این می توان ادعا کرد که در سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت حتماً بایستی از هادی باندا استفاده کرد. این نکته نیز لازم به ذکر است که روش طراحی به صورت سعی و خطا بوده و هیچگونه رابطه صریحی جهت انتخاب هادی وجود ندارد، بلکه بایستی به صورت تکراری نسبت به اصلاح هادی و یا باندا کردن اقدام نمود تا زمانی که شرایط مسأله ارضا شود.

#### ۴-۱- محاسبات جریان مجاز

جریان حالت کار دائم هادی را می توان بصورت زیر محاسبه کرد :

$$I = \frac{372 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 400 \times 10^3 \times 0.9} = 596.6 \text{ A}$$

همان طور که قبلاً اشاره شد جریان مجاز در سطح ۴۰۰ کیلوولت در غالب اوقات عامل محدودکننده ای محسوب نمی شود. (جدول ۱-۴)

برای محاسبات اتصال کوتاه از فرمول تقریبی به شکل زیر استفاده می کنیم:

$$A = \frac{50 \times 10^3 \times \sqrt{I}}{85} = 588.2 \text{ mm}^2$$

با توجه به این مقطع می توان از هادی Canary, Curlew, یا Grackle استفاده کرد که از لحاظ جریان مجاز نیز شرایط را برآورده می سازند.

#### ۴-۲- سایر محاسبات فنی

همانطور که قبلاً نیز گفته شد در سطح ۴۰۰ کیلوولت حتماً بایستی از هادی باندا استفاده شود. جهت روشن شدن این موضوع می توان گرادیان سطحی یک هادی تکی Canary را بدست آورد :

$$\text{GMD} = \sqrt[3]{2 \times 7.3 \times 7.3 \times 7.3} = 9.197 \text{ m}$$

$$r_b = r = 1.48 \text{ cm}$$

$$k = 1$$

$$g = \frac{400 / \sqrt{3}}{1.48 \times \text{Ln}(9.179 \times 10^2 / 1.48)} = 24.27 \text{ kV/cm}$$

این مقدار به وضوح خارج از محدوده مجاز گرادیان سطحی ولتاژ است و لذا خط را به صورت هادی باندا دوتایی در نظر

می گیریم. برای باندا دوتایی Canary داریم :

$$n_s=2$$

$$d_s=30 \text{ cm}$$

$$K = 1 + \frac{2 \times 1.48}{30} (2 - 1) \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1.099$$

$$r_b = \left[ 2 \times 1.48 \times \left( \frac{30}{2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} \right)^{(2-1)} \right]^{\frac{1}{2}} = 6.66 \text{ cm}$$

$$g = \frac{1.105 \times 400 / \sqrt{3}}{2 \times 1.48 \times \text{Ln}\left(\frac{9.197 \times 10^2}{6.66}\right)} = 17.49 \text{ kV/cm}$$

تلفات کرونا به کمک رابطه پترسون از رابطه (۴-۱۹) به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$P = \frac{0.209 \times 10^{-4}}{\left[\log\left(\frac{25}{d}\right)\right]^2} f v^2 F$$

با این فرض که خط انتقال سه فاز و فرکانس ۵۰ هرتز باشد، از معادله (۴-۱۹) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$P = 0.00314 F \left[ \frac{V}{\log \frac{\text{GMD}}{r}} \right]^2$$

برای محاسبه F باید ولتاژ شروع کرونا ( $V_0$ ) را محاسبه نماییم که این مقدار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_0 = 21.1 \times m \times r \times n_s \times (\delta)^{\frac{2}{3}} \times \text{Ln}\left(\frac{\text{GMD}}{r_b}\right)$$

که در این رابطه m ضریبی است که برای هادی‌های رشته‌ای بین ۰/۸۳ (برای هادی فرسوده) تا ۰/۸۸ (برای هادی نو) انتخاب می‌شود و مقدار  $\delta$  از رابطه (۳-۱۳) به دست می‌آید.

$$\delta = \frac{3.92 \times 76}{273 + 40} = 0.952$$

$$V_0 = 21.1 \times 0.83 \times 1.48 \times 2 \times (0.952)^{\frac{2}{3}} \times \text{Ln}\left(\frac{9.197}{6.66 \times 10^{-2}}\right) = 247.21 \text{ kV}$$

با توجه به این که مقدار ولتاژ شروع کرونا از ولتاژ خط انتقال بیشتر است، به همین دلیل مقدار تلفات کرونا بسیار ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

لازم به ذکر است که معمولاً افزایش سطح مقطع برای جلوگیری از کرونا غیر اقتصادی بوده و لذا از باندل کردن استفاده می‌شود. همانطور که دیده می‌شود اندازه گرادیان ولتاژ در محدوده مجاز قرارداد. همچنین مقدار گرادیان ولتاژ برای باندل دوتایی Curlew برابر ۱۶/۵ کیلوولت بر سانتی‌متر و برای باندل دوتایی Grackle برابر ۱۵/۵۷ کیلوولت بر سانتی‌متر است.

حداقل مقطع استاندارد در سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت که استقامت مکانیکی کافی را داشته باشد برابر 605kCM و یا به عبارتی هادی Squab است. با توجه به این امر انتخاب باندل دوتایی Canary، Curlew و یا Grackle مشکلی از جهت استقامت مکانیکی

نخواهد داشت. با توجه به آنکه خط بیشتر از ۱۰۰ کیلومتر طول دارد، خط بلند محسوب شده و بایستی مسأله افت ولتاژ و پایداری را در نظر گرفت. به عبارتی با توجه به نتایج بخش بار شبکه ممکن است که لازم باشد توان انتقالی خط کاهش یابد. محاسبات پایداری و افت ولتاژ نشان می‌دهد که هیچ از این سه طرح ارائه شده از این نظر مشکل ندارند و در هر سه مورد، توان انتقالی پائین تر از بار طبیعی خواهد بود.

محاسبات اختلالات رادیویی و تلویزیونی وابسته به سطح تداخلات در محیط و مسیر عبور خط بوده که در این مثال در نظر گرفته نشده‌اند. از آنجا که در مسیر خط احتمال وقوع باران و برف اندک است لذا می‌توان اطمینان داشت که تلفات کرونا بیش از مقدار مجاز نخواهد بود چرا که تلفات کرونا تنها در هوای بارانی و برفی قابل توجه می‌باشد.

#### ۴-۳-۴- ملاحظات اقتصادی

برای بررسی مسائل اقتصادی بایستی چند طرح مختلف که نیازمندی‌های فنی را برآورده می‌سازند، مورد مقایسه قرار گیرند. در این مسائل سه طرح مختلف در نظر گرفته شده است، با این حال می‌توان طرح‌های بیشتری نیز که نیازمندی‌های فنی را برآورده می‌سازند، در نظر گرفت. جدول (۴-۴) هزینه‌های سرمایه‌گذاری نسبی این طرح‌ها را نسبت به یک حالت پایه و همچنین تلفات در بار متوسط عبوری را نشان می‌دهد. این محاسبات از روابط ذکر شده در بخش ۳-۶ و پیوست ۳-۱ قابل محاسبه می‌باشد.

جدول ۴-۴: مقایسه اقتصادی طرح‌های مختلف

طرح انتخابی	هزینه نسبی سرمایه‌گذاری	تلفات متوسط (kw/km)
2 × Canary	۱۰۳/۷	۱۳/۷
2 × Curlew	۱۱۰/۹	۱۱/۹۲
2 × Grackle	۱۱۹/۳۳	۱۰/۳۹

همان‌طور که دیده می‌شود با بیشتر شدن سطح مقطع هزینه سرمایه‌گذاری افزایش اما تلفات کاهش می‌یابد. به کمک روابطی که در بخش (۳-۶) ارائه شد، می‌توان هزینه به روز شده و تلفات را محاسبه و با سایر عوامل مقایسه کرد. با توجه به این محاسبات، اقتصادی ترین طرح از بین سه طرح پیشنهادی هادی باندل دوتایی Curlew است.



# الزمامات و آزمونها



## مقدمه

در این فصل نحوه انجام آزمونهای هادی‌های خطوط نیرو جهت حصول از کار صحیح و مورد انتظار آنها تشریح می‌گردد.

### ۵-۱- آزمونهای هادی‌های رشته‌ای

در این بخش روشهای انجام آزمونهای نوعی و نمونه‌ای برای هادی‌های رشته‌ای آلومینیومی و آلومینیوم - فولاد تشریح و حدود مجاز پارامترهای اندازه‌گیری شده، جهت تأیید هادی‌ها ارائه می‌گردد. در هنگام استفاده از این بخش، به کارگیری مراجع [۷-۱] الزامی است.

کلیه آزمونهای نوعی و نمونه‌ای زیر بایستی مطابق با آخرین تجدیدنظر مراجع [۷-۱] انجام گیرند.

#### آزمونهای نوعی شامل

- آزمون اتصالات در رشته‌های آلومینیومی (IEC شماره ۶۱۰۸۹)
- آزمون منحنی‌های تنش - کرنش بر روی هادی (ISO شماره ۶۸۹۲ و IEC شماره ۶۱۰۸۹ و IEC شماره ۶۰۸۸۹)
- آزمون نیروی گسیختگی هادی (IEC شماره ۶۱۰۸۹)

#### آزمونهای جاری شامل

- آزمون کشش بر روی مفتولهای آلومینیومی و فولادی (IEC شماره ۶۱۰۸۹)
- آزمون پیچش مفتولهای آلومینیومی (IEC شماره ۶۰۸۸۸ و ISO شماره ۷۸۰۲)
- آزمون مقاومت الکتریکی مفتولهای آلومینیومی (IEC شماره ۶۰۴۶۸)
- آزمون تنش در یک درصد افزایش طول روی مفتولهای فولادی (ISO شماره ۶۸۹۲ و IEC شماره ۶۱۰۸۹)
- آزمون خاصیت لوله شدن روی مفتولهای فولادی (IEC شماره ۶۰۸۸۸ و ISO شماره ۷۸۰۲)
- آزمون پوشش فلز روی در مفتولهای فولادی (IEC شماره ۶۰۸۸۸)
- اندازه‌گیری سطح مقطع هادی (IEC شماره ۶۱۰۸۹)
- اندازه‌گیری قطر نهایی هادی (IEC شماره ۶۱۰۸۹)
- اندازه‌گیری جرم در واحد طول هادی (چگالی خطی) (IEC شماره ۶۱۰۸۹)
- آزمون گسیختگی رشته‌های آلومینیومی و فولادی پس از تابیده شدن (IEC شماره ۶۱۰۸۹)
- آزمون وضعیت سطح هادی (IEC شماره ۶۱۰۸۹)
- آزمون نسبت لایه و جهت لایه هادی (IEC شماره ۶۱۰۸۹)

## ۵-۱-۱- آزموهای نوعی

## ۵-۱-۱-۱- آزموهای اتصالات در رشتههای آلومینیومی و فولادی

## - مفتولهای آلومینیومی:

به علت گسیختگیهای غیرقابل پیش بینی به هنگام ساخت و به منظور استفاده از مفتولهای با طول کوتاه، به اتصال مفتولهای آلومینیومی نیاز است. در این مفتولها، مستقل از تعداد مفتولها در هر هادی، اتصال مفتولهای آلومینیومی باید از طریق جوش سر به سر الکتریکی<sup>۱</sup>، جوش سربه سر فشاری سرد<sup>۲</sup>، یا هر طریق مورد تأیید دیگر صورت پذیرد و نیازی نمی باشد که مفتول در نقطه اتصال، مشخصات مکانیکی یک مفتول یکسره و بدون اتصال را کاملاً دارا باشد و تنها کافی است اتصالاتی که با استفاده از جوش سر به سر الکتریکی انجام شده اند، تنشی به میزان ۷۵ نیوتن بر میلیمتر مربع و در اتصالاتی که از طریق جوش سر به سر فشاری سرد انجام شده اند، تنشی به میزان ۱۳۰ نیوتن بر میلیمتر مربع را تحمل کنند.

فاصله دو اتصال در یک هادی نباید کمتر از ۱۵ متر باشد و در اتصالاتی که از طریق جوش سر به سر الکتریکی ایجاد شده اند، باید پس از جوشکاری در محدوده ای به طول ۲۵۰ میلیمتر در هر دو طرف نقطه اتصال، تنش پس ماند به طریق عملیات حرارتی<sup>۳</sup> از بین برود. لازم به ذکر است منظور از اتصال در این بند، اتصالاتی که پیش از آخرین مرحله کشش سیمها ایجاد می شوند، نبوده و این اتصالات مشمول مقررات این بند نمی باشد.

تعداد اتصالات مجاز در رشتههای آلومینیومی نایستی از مقادیر مشخص شده در جدول (۵-۱) فراتر رود. این اتصالات نایستی با اتصالات مجاورشان در همان رشته یا رشتههای پیرامونش، کمتر از ۱۵ متر فاصله داشته باشد.

جدول ۵-۱: تعداد اتصالات مجاز در هادیهای آلومینیوم

تعداد لایه های آلومینیوم	تعداد مجاز اتصال در طول هادی
۱	۲
۲	۳
۳	۴
۴	۵

## - مفتولهای فولادی و فولاد با پوشش آلومینیومی:

هیچ اتصالی، از هر نوعی، در طول مفتولهای فولادی مجاز نمی باشد. تنها اتصالات مجاز، اتصالات با جوش سر به سر الکتریکی و در مراحل پیش از کشش است.

هیچ اتصالی، از هر نوعی، در طول مفتولهای فولادی با پوشش آلومینیومی مجاز نمی باشد، تنها اتصالات مجاز در مراحل پیش از کشش می باشد.

1 . Electric bult – welding  
2 . Cold pressure  
3 . Annealing

در صورتی که هادی دارای هفت مفتول فولادی باشد وجود اتصالاتی که پس از مرحله نهایی کشش ایجاد می‌شوند (به شرطی که فاصله دو اتصال در یک هادی بیش از ۱۵ متر باشد)، بلامانع است. در این صورت این اتصالات باید از طریق جوش سر به سر الکتریکی انجام پذیرد و در مقابل خوردگی به نحو مطلوبی محافظت شود.

سازنده موظف است که مدارک و اطلاعات مورد نیاز خریدار را در ارتباط با روش مورد استفاده جهت اتصال رشته‌های آلومینیومی و فولادی و فولادی با پوشش مسی فراهم نموده و دلایل کافی در مورد اینکه روش مذکور نیازمندیهای استاندارد را برآورده می‌سازد (شامل نتایج آخرین آزمونهای انجام شده) ارائه نماید و یا مقدمات انجام مجدد آزمونها و بازرسی‌های رشته‌ها را فراهم آورد. سازنده بایستی مدارکی مبنی بر تحمل تنشهای فوق‌الذکر را به خریدار ارائه نموده یا آزمون‌های مربوطه را انجام دهد.

### ۵-۱-۱-۲- آزمون منحنی‌های تنش - کرنش بر روی رشته‌ها و هادی‌ها

در این قسمت آزمونهای کششی رشته‌ها و هادی‌ها بصورت عام تشریح می‌گردد که برای کلیه آزمونهای مشابه صادق می‌باشد. طول نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام این آزمون بایستی حداقل ۴۰۰ برابر قطر هادی باشد که این مقدار نباید کمتر از ۱۰ متر شود. این طول، حداقل مقدار مورد نیاز برای انجام آزمون با دقت کافی می‌باشد. چنانچه سازنده با در دست داشتن مدارک و اطلاعات کافی بتواند خریدار را متقاعد نماید که انجام آزمون بر روی نمونه‌های با طول کوتاهتر از مقدار ارائه شده فوق، نتایج یکسانی را بدنبال خواهد داشت، در صورت موافقت خریدار می‌توان طولهای کوتاهتری را برای انجام آزمون برگزید.

آزمون تهیه منحنی‌های تنش - کرنش که به عنوان یک آزمون نوعی توسط خریدار (در صورت لزوم) درخواست می‌گردد، اطلاعات بسیار مفیدی در مورد رفتار رشته‌ها و هادی در شرایط بارگذاری مختلف را ارائه می‌نماید. این آزمون، بنابه توافق خریدار و تأمین‌کننده هادی در زمان سفارش، بر روی هادی و چنانچه لازم تشخیص داده شود، بر روی رشته‌های فولادی بطور منفرد انجام می‌گیرد.

آزمونها بجز در مواردی که مشخص شده است، در درجه حرارت محیط ۱۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شوند. در انجام آزمون منحنی‌های تنش - کرنش بایستی دقت شود که درجه حرارت در طول آزمون بیش از  $\pm 2$  درجه سانتیگراد تغییر ننماید. بنابراین درجه حرارت بایستی در شروع و پایان هر پریود وقفه (سکون در آزمون) ثبت گردد. قبل از شروع آزمون، فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها بایستی با دقت انجام گیرد. در آزمون هادی، لغزش و تغییر مکان نسبی بین مغزی فولادی و لایه‌های آلومینیومی، حتی به اندازه ۱ میلی‌متر، منجر به تغییرات قابل ملاحظه در منحنی‌های تنش - کرنش می‌گردد. آماده‌سازی نمونه‌ها شامل فعالیتهای زیر است:

- قبل از جداسازی نمونه از هادی کلاف شده بر روی قرقره، یک کلمپ پیچ و مهره‌ای به فاصله  $1 \pm 5$  متر از انتهای هادی نصب می‌گردد. این کلمپ بایستی با فشار زیاد به هادی محکم گردد تا از حرکت نسبی رشته‌ها ممانعت بعمل آورد.
- طول مورد نظر جهت آزمون، از قرقره باز شده و کلمپ دیگری با همان کیفیت بر روی هادی نصب می‌گردد. پس از نصب برچسب مناسب (مشخص‌کننده نمونه)، هادی به فاصله کافی از کلمپ بریده می‌شود تا گیره‌های انتهایی قابل نصب باشند.
- در زمان حمل نمونه تا آزمایشگاه، بایستی با روشهای مناسب از صدمه دیدن آن جلوگیری نمود. قطر کلاف یا قرقره‌ای که برای حمل نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد، بایستی حداقل ۵۰ برابر قطر هادی باشد.
- گیره‌های انتهایی از نوع پرسی یا اپوکسی یا جوشی (که به تأیید خریدار رسیده باشد) بایستی برای انجام آزمون مورد استفاده قرار گیرد. قبل از نصب گیره‌های انتهایی، رشته‌ها نبایستی باز شده، تمیز یا گریس کاری شوند.

- در فرآیند آماده‌سازی انتهای نمونه‌ها باید کاملاً دقت شود که نمونه‌ها صدمه نینند.
  - در هنگام نصب گیره‌های انتهایی باید دقت شود که هیچکدام از رشته‌ها آزاد یا شل نباشند. شل بودن رشته‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای در منحنیهای تنش - کرنش می‌گذارد.
- تعاریف زیر در تشریح فرآیند آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرند :
- طول اولیه مبنا ( $L_0$ ) : طول مبنا قبل از اعمال نیروی کششی (بر حسب میلی‌متر).
  - طول نهایی مبنا ( $L_U$ ) : طول مبنا پس از گسیختگی قطعه آزمون (بر حسب میلی‌متر).
  - کشیدگی : مقدار افزایش در طول اولیه مبنا در هر لحظه از آزمون (بر حسب میلی‌متر).
  - درصد افزایش طول دائم : مقدار افزایش طول مبنا پس از حذف تنش مشخص که بر حسب درصدی از طول مبنا بیان می‌گردد.
  - حداکثر نیرو ( $F_m$ ) : بزرگترین نیرویی که قطعه در طول آزمون قبل از تسلیم شدن تحمل می‌کند (بر حسب نیوتن).
  - استقامت کششی ( $R_m$ ) : تنش مربوط به حداکثر نیرو (بر حسب نیوتن بر میلی‌متر مربع).
- جهت انجام آزمون، ابتدا قطعات آزمون تهیه می‌گردند. طول اولیه مبنا از روی سطح مقطع رشته و توسط رابطه  $L_0 = k\sqrt{s_0}$  انتخاب می‌گردد، که مقدار ضریب تناسب  $k$  بایستی  $5/65$  باشد، ضمن اینکه مقدار طول اولیه مبنا نبایستی کمتر از ۲۰ میلی‌متر باشد. در رابطه مذکور  $s_0$  سطح مقطع نامی رشته (بر حسب میلی‌مترمربع) می‌باشد. چنانچه سطح مقطع رشته بسیار کوچک باشد، بطوریکه مقدار بدست آمده با در نظر گرفتن  $k=5/65$  به ۲۰ میلی‌متر نرسد، مقدار  $k=11/3$  انتخاب شده یا آزمون غیرمتناسب انجام می‌گیرد. به این ترتیب طول اولیه مبنا مستقل از سطح مقطع اولیه انتخاب می‌گردد.
- برای رشته‌هایی با سطح مقطع دایره و با قطر کمتر از ۴ میلی‌متر، طول اولیه مبنا برابر با  $20 \pm 2$  میلی‌متر یا  $100 \pm 1$  میلی‌متر پیشنهاد می‌گردد. فاصله بین گیره‌های دستگاه آزمون بایستی حداقل ۵۰ میلی‌متر بیشتر از طول اولیه مبنا یعنی ۲۵۰ یا ۱۵۰ میلی‌متر باشد.
- تلورانس قابل قبول برای علامت‌گذاری طول اولیه مبنا، یک درصد طول مبنا و فاصله بین گیره‌ها و نشانه‌های طول مبنا معادل ۱۰ درصد طول مبنا پیشنهاد می‌گردد. طول کلی قطعه آزمون که از نمونه‌های برداشت شده جدا شده و بسته به روش محکم شدن نمونه در گیره‌های دستگاه آزمون، بایستی ۲ تا ۴ برابر قطر رشته، بزرگتر از فاصله بین گیره‌ها انتخاب گردد.
- هر انتهای طول اولیه مبنا بایستی بوسیله یک علامتگذار نازک یا خط حکاکی شده مشخص گردد. باید دقت کافی بکار برده شود تا شکاف در رشته ایجاد نگردد و گسیختگی نابهنگام رخ ندهد.
- دستگاه آزمون بایستی مطابق با استاندارد ISO شماره ۱-۷۵۰۰ و از کلاس ۱ یا کلاس بالاتر باشد. فاصله بین نشانه طول مبنا و دهانه گیره بایستی در طول آزمون توسط یک کولیس اندازه‌گیری شود تا اطمینان حاصل گردد که پس از اعمال ۸۵ درصد سیکل بار و در بازه زمانی حذف بار، این فاصله بیش از یک میلی‌متر از مقدار قبل از آزمون تغییر نکند. دقت اندازه‌گیری ۰/۱ میلی‌متر کافی می‌باشد. در زمان اعمال بار، این فاصله ممکن است بیش از یک میلی‌متر افزایش یابد.
- سرعت باز شدن گیره‌ها در دستگاه آزمون بایستی بین ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر در دقیقه باشد.

شکلهای شماره (۱-۵) و (۲-۵)، نتیجه آزمون و منحنیهای تنش - کرنش را نمایش می‌دهند. اعداد مشخص شده در شکلها

بیانگر پارامترهای زیر می‌باشند:

۱۳: کشیدگی پس از گسیختگی

۱۴: درصد کشیدگی پس از گسیختگی

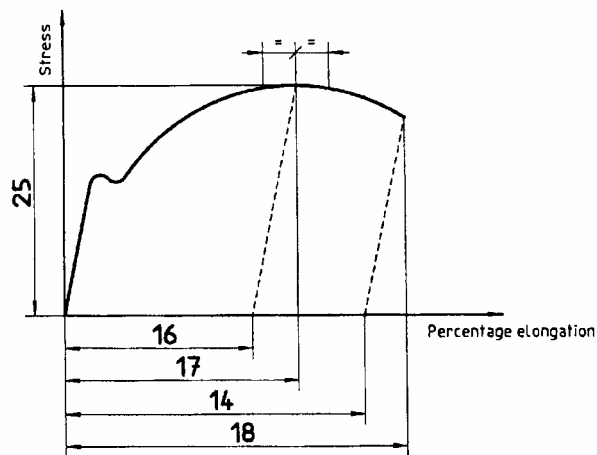
۱۶: درصد کشیدگی غیر متناسب در حداکثر نیرو

۱۷: درصد کشیدگی کل در حداکثر نیرو

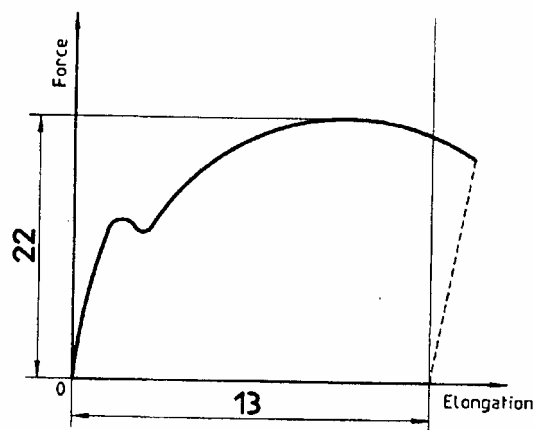
۱۸: درصد کشیدگی کل در گسیختگی

۲۲: حداکثر نیرو

۲۵: استقامت کششی



شکل ۱-۵: منحنی تنش برحسب درصد کشیدگی



شکل ۲-۵: منحنی حداکثر نیرو

استقامت کششی رشته‌های آلومینیومی نبایستی کمتر از مقادیر مشخص شده در جدول (۲-۵) باشد.

جدول ۲-۵: خواص مکانیکی رشته آلومینیومی سخت

حداقل استقامت کششی (Mpa)	قطر نامی رشته	
	کمتر یا مساوی با (mm)	بیشتر از (mm)
۲۰۰	۱/۲۵	—
۱۹۵	۱/۵۰	۱/۲۵
۱۹۰	۱/۷۵	۱/۵۰
۱۸۵	۲/۰۰	۱/۷۵
۱۸۰	۲/۲۵	۲/۰۰
۱۷۵	۲/۵۰	۲/۲۵
۱۷۰	۳/۰۰	۲/۵۰
۱۶۵	۳/۵۰	۳/۰۰
۱۶۰	۵/۰۰	۳/۵۰

در مورد رشته‌های فولادی با پوشش روی، آزمون تنش در یک درصد کشیدگی انجام می‌گیرد. برای اینکار، یک قطعه از نمونه‌های آزمون در بین گیره‌های دستگاه آزمون قرار گرفته و محکم می‌گردد. یک بار کشش مطابق با ستون دوم جدول (۳-۵) به قطعه اعمال شده و توسط دستگاه اندازه‌گیری افزایش طول که مناسب برای طول مبنای ۲۵۰ میلی‌متر باشد و تنظیم اولیه‌ای مطابق با ستون سوم جدول (۳-۵) داشته باشد، افزایش طول قطعه با دقت اندازه‌گیری می‌گردد. چنانچه طول مبنای برابر با ۱۰۰ یا ۲۰۰ میلی‌متر یا هر مقدار دیگر انتخاب گردد، در این صورت تنظیم اولیه دستگاه اندازه‌گیری بایستی متناسب با طول واقعی آزمون نسبت به طول ۲۵۰ میلی‌متر اصلاح شود. طول مبنای برای اندازه‌گیری‌های بعدی بایستی قبل از اعمال بار ثبت گردد.

جدول ۳-۵: تنش اولیه و تنظیم دستگاه اندازه‌گیری طول برای تعیین تنش در یک درصد افزایش طول برای رشته‌های فولادی با پوشش روی

تنظیم اولیه دستگاه اندازه‌گیری (برای طول مبنای ۲۵۰ میلی‌متر)	تنش اولیه (مگا پاسکال)	قطر واقعی رشته (mm)	
		کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۰/۱۲۵	۱۰۰	۲/۲۵	۱/۲۴
۰/۲۵۰	۲۰۰	۳/۰۰	۲/۲۵
۰/۳۷۵	۳۰۰	۴/۷۵	۳/۰۰
۰/۵۰۰	۴۰۰	۵/۵۰	۴/۷۵

چنانچه طول مبنای متفاوت از ۲۵۰ میلی‌متر باشد، مقدار تنظیم اولیه دستگاه اندازه‌گیری با ضرب کردن نسبت طول واقعی مبنای به ۲۵۰ میلی‌متر اصلاح می‌گردد.



در مورد رشته‌های فولادی با پوشش آلومینیوم، آزمون تنش در یک درصد کشیدگی انجام می‌گیرد. برای این کار، یک قطعه از نمونه‌های آزمون در بین گیره‌های دستگاه آزمون قرار گرفته و محکم می‌گردد. یک بار کشش مطابق با ستون دوم جدول (۴-۵) به قطعه اعمال شده و توسط دستگاه اندازه‌گیری افزایش طول که مناسب برای طول مبنای ۲۵۰ میلی‌متر باشد و تنظیم اولیه مطابق با ستون سوم جدول (۴-۵) داشته باشد، افزایش طول قطعه با دقت اندازه‌گیری می‌گردد.

جدول ۵-۴: تنش اولیه و تنظیم دستگاه اندازه‌گیری طول برای تعیین تنش در یک درصد افزایش طول برای رشته‌های فولادی با پوشش آلومینیوم

تنظیم اولیه دستگاه اندازه‌گیری (برای طول مبنای ۲۵۰ میلی‌متر)	تنش اولیه	قطر واقعی رشته (mm)	
		کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۰/۰۰۰۵	۸۱/۴	۲/۵	۱/۲۴
۰/۰۰۱۰	۱۶۲	۳/۳۰	۲/۵
۰/۰۰۱۵	۲۴۴	۵/۵۰	۳/۳۰

به عبارت دیگر در شرایط تنش اولیه، افزایش طولی برابر با ستون سوم جداول (۳-۵) و (۴-۵) به ترتیب برای رشته فولادی با پوشش روی و پوشش آلومینیوم بایستی در دستگاه اندازه‌گیری افزایش طول نشان داده شود. اینکار با تنظیم اولیه دستگاه اندازه‌گیری انجام می‌گیرد. سپس بار بصورت یکنواخت افزایش می‌یابد تا دستگاه اندازه‌گیری، افزایش طولی برابر با یک درصد طول اولیه مینا را نشان دهد. در این لحظه بار مربوطه ثبت شده و از روی آن مقدار تنش در یک درصد افزایش طول محاسبه می‌گردد. مقدار تنش با تقسیم بار به سطح مقطع اولیه رشته بدست می‌آید. این مقدار برای قطعه فولادی با پوشش روی تحت آزمون بایستی از مقادیر داده شده در جداول (۵-۵) تا (۷-۵) و برای قطعه فولادی با پوشش آلومینیوم تحت آزمون نباید از مقادیر داده شده در جدول (۸-۵) کمتر باشد. قطعه تحت آزمون قرار گرفته، متعاقباً برای آزمونهای کشش و کشیدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۵-۵: حداقل تنش در یک درصد افزایش طول برای رشته‌های فولادی معمولی

حداقل تنش در یک درصد افزایش طول (مگاپاسکال)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۱۱۰۰	۱۱۷۰	±۰/۰۵	±۰/۰۳	۲/۲۵	۱/۲۴
۱۰۷۰	۱۱۴۰	±۰/۰۶	±۰/۰۴	۲/۷۵	۲/۲۵
۱۰۷۰	۱۱۴۰	±۰/۰۶	±۰/۰۵	۳/۰۰	۲/۷۵
۱۰۰۰	۱۱۰۰	±۰/۰۶	±۰/۰۵	۳/۵۰	۳/۰۰
۱۰۰۰	۱۱۰۰	±۰/۰۹	±۰/۰۶	۴/۲۵	۳/۵۰
۱۰۰۰	۱۱۰۰	±۰/۱۰	±۰/۰۶	۴/۷۵	۴/۲۵
۱۰۰۰	۱۱۰۰	±۰/۱۱	±۰/۰۷	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۶: حداقل تنش در یک درصد افزایش طول برای رشته‌های فولادی با استقامت زیاد

حداقل تنش در یک درصد افزایش طول (مگاپاسکال)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۱۲۴۰	۱۳۱۰	±۰/۰۵	±۰/۰۳	۲/۲۵	۱/۲۴
۱۲۱۰	۱۲۸۰	±۰/۰۶	±۰/۰۴	۲/۷۵	۲/۲۵
۱۲۱۰	۱۲۸۰	±۰/۰۶	±۰/۰۵	۳/۰۰	۲/۷۵
۱۱۷۰	۱۲۴۰	±۰/۰۷	±۰/۰۵	۳/۵۰	۳/۰۰
۱۱۰۰	۱۱۷۰	±۰/۰۹	±۰/۰۶	۴/۲۵	۳/۵۰
۱۱۰۰	۱۱۷۰	±۰/۱۰	±۰/۰۶	۴/۷۵	۴/۲۵
۱۱۰۰	۱۱۷۰	±۰/۱۱	±۰/۰۷	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۷: حداقل تنش در یک درصد افزایش طول برای رشته‌های فولادی با استقامت بسیار زیاد

حداقل تنش در یک درصد افزایش طول (مگاپاسکال)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
—	۱۴۵۰	—	±۰/۰۳	۲/۲۵	۱/۲۴
—	۱۴۱۰	—	±۰/۰۴	۲/۷۵	۲/۲۵
—	۱۴۱۰	—	±۰/۰۵	۳/۰۰	۲/۷۵
—	۱۳۸۰	—	±۰/۰۵	۳/۵۰	۳/۰۰
—	۱۳۴۰	—	±۰/۰۶	۴/۲۵	۳/۵۰
—	۱۳۴۰	—	±۰/۰۶	۴/۷۵	۴/۲۵
—	۱۲۷۰	—	±۰/۰۷	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۸: حداقل تنش در یک درصد افزایش طول برای رشته‌های فولادی با پوشش آلومینیوم

حداقل تنش در یک درصد افزایش طول (مگا پاسکال)	قطر نامی رشته (میلیمتر)		نوع	کلاس
	کمتر یا مساوی با	بیشتر از		
۱۲۰۰	۳/۲۵	۱/۲۴		
۱۱۸۰	۳/۴۵	۳/۲۵		
۱۱۴۰	۳/۶۵	۳/۴۵		
۱۱۰۰	۳/۹۵	۳/۶۵	A	20SA
۱۱۰۰	۴/۱۰	۳/۹۵		
۱۰۷۰	۴/۴۰	۴/۱۰		
۱۰۳۰	۴/۶۰	۴/۴۰		
۱۰۰۰	۴/۷۵	۴/۶۰		
۱۰۰۰	۶/۵۰	۴/۷۵		
۱۱۰۰	۵/۵۰	۱/۲۴	B	
۸۰۰	۵/۰۰	۲/۵۰	-	27SA
۶۵۰	۵/۰۰	۲/۵۰	-	30SA
۶۰۰	۵/۰۰	۲/۵۰	-	40SA

جهت انجام آزمون استقامت کششی ابتدا باری معادل ۲ درصد استقامت کششی نامی (RTS)<sup>۱</sup> برای صاف شدن رشته اعمال می‌شود. پس از صاف شدن، بار حذف شده و دستگاه‌های اندازه‌گیری در کشش صفر تنظیم می‌گردند. برای ثبت اطلاعات تنش - کرنش غیرپیوسته، مقدار افزایش طول در بازه‌های ۲/۵ درصدی از (RTS) که به نزدیکترین عدد برحسب کیلونیوتن گرد شده باشد، ثبت خواهند شد.

فرآیند آزمون با افزایش کشش تا ۳۰ درصد RTS آغاز می‌گردد. سپس ۰/۵ ساعت در ۳۰ درصد کشش متوقف می‌شود. در طول بازه زمانی توقف و در زمانهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری انجام می‌گیرد. سپس بارگذاری به حالت اولیه باز گردانده می‌شود. مجدداً آزمون با افزایش کشش تا ۵۰ درصد RTS ادامه می‌یابد و یکساعت توقف اعمال می‌شود. در طول بازه زمانی توقف و در زمانهای ۵، ۱۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه اندازه‌گیری انجام گرفته و بارگذاری به حالت اولیه باز گردانده می‌شود. مجدداً آزمون با روند قبل برای ۷۵ و ۸۵ درصد RTS تکرار می‌گردد. پس از انجام ۴ آزمون فوق‌نهایتاً کشش بصورت یکنواخت اعمال می‌گردد تا گسیختگی در رشته رخ دهد. تا کشش ۸۵ درصد RTS در همان بازه‌های قبلی، ثبت اندازه‌گیریها بایستی انجام گیرد.

نرخ افزایش کشش بایستی در طول آزمون بصورت یکنواخت باشد. زمان مورد نیاز برای رسیدن به ۳۰ درصد RTS بایستی کمتر از ۱ دقیقه و بیشتر از ۲ دقیقه باشد. همان نرخ بارگذاری بایستی تا اتمام آزمون حفظ شود.

1 . Rated tensile strength

حد نهایی تنش کششی قابل تحمل با تقسیم بار گسیختگی به سطح مقطع رشته فولادی با پوشش روی (که از روی قطر واقعی محاسبه می‌گردد) تعیین می‌گردد و نیابستی از مقدار مشخص شده در جداول (۵-۹) تا (۵-۱۱) کمتر باشد.

جدول ۵-۹: حداقل حد نهایی تنش کششی برای رشته‌های فولادی عادی

حداقل حد نهایی تنش کششی (مگاپاسکال)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۱۲۴۰	۱۳۴۰	±۰/۰۵	±۰/۰۳	۲/۲۵	۱/۲۴
۱۲۱۰	۱۳۱۰	±۰/۰۶	±۰/۰۴	۲/۷۵	۲/۲۵
۱۲۱۰	۱۳۱۰	±۰/۰۶	±۰/۰۵	۳/۰۰	۲/۷۵
۱۱۹۰	۱۲۹۰	±۰/۰۷	±۰/۰۵	۳/۵۰	۳/۰۰
۱۱۹۰	۱۲۹۰	±۰/۰۹	±۰/۰۶	۴/۲۵	۳/۵۰
۱۱۹۰	۱۲۹۰	±۰/۱۰	±۰/۰۶	۴/۷۵	۴/۲۵
۱۱۹۰	۱۲۹۰	±۰/۱۱	±۰/۰۷	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۱۰: حداقل حد نهایی تنش کششی برای رشته‌های فولادی با استقامت زیاد

حداقل حد نهایی تنش کششی (مگاپاسکال)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۱۳۸۰	۱۴۵۰	±۰/۰۵	±۰/۰۳	۲/۲۵	۱/۲۴
۱۳۴۰	۱۴۱۰	±۰/۰۶	±۰/۰۴	۲/۷۵	۲/۲۵
۱۳۴۰	۱۴۱۰	±۰/۰۶	±۰/۰۵	۳/۰۰	۲/۷۵
۱۳۴۰	۱۴۱۰	±۰/۰۷	±۰/۰۵	۳/۵۰	۳/۰۰
۱۲۸۰	۱۳۸۰	±۰/۰۹	±۰/۰۶	۴/۲۵	۳/۵۰
۱۲۸۰	۱۳۸۰	±۰/۱۰	±۰/۰۶	۴/۷۵	۴/۲۵
۱۲۸۰	۱۳۸۰	±۰/۱۱	±۰/۰۷	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول شماره ۵-۱۱: حداقل حد نهایی تنش کششی برای رشته‌های فولادی با استقامت بسیار زیاد

حداقل حد نهایی تنش کششی (مگا پاسکال)		تلورانس قطر (میلی متر)		قطر نامی رشته (میلی متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
—	۱۶۲۰	—	$\pm 0.03$	۲/۲۵	۱/۲۴
—	۱۵۹۰	—	$\pm 0.04$	۲/۷۵	۲/۲۵
—	۱۵۹۰	—	$\pm 0.05$	۳/۰۰	۲/۷۵
—	۱۵۵۰	—	$\pm 0.05$	۳/۵۰	۳/۰۰
—	۱۵۲۰	—	$\pm 0.06$	۴/۲۵	۳/۵۰
—	۱۵۲۰	—	$\pm 0.06$	۴/۷۵	۴/۲۵
—	۱۵۰۰	—	$\pm 0.07$	۵/۵۰	۴/۷۵

حد نهایی تنش کششی قابل تحمل با تقسیم بارگسیختگی به سطح مقطع رشته فولادی با پوشش آلومینیوم (که از روی قطر واقعی محاسبه می‌گردد) تعیین می‌گردد و نایستی از مقدار مشخص شده در جدول (۹-۱۲) کمتر باشد.

جدول شماره ۹-۱۲: حداقل حد نهایی تنش کششی برای رشته‌های فولادی با پوشش آلومینیوم

حداقل حد نهایی تنش کششی (مگا پاسکال)	قطر نامی رشته (میلی متر)		نوع	کلاس
	کمتر یا مساوی با	بیشتر از		
۱۳۴۰	۳/۲۵	۱/۲۴		
۱۳۱۰	۳/۴۵	۳/۲۵		
۱۲۷۰	۳/۶۵	۳/۴۵		
۱۲۵۰	۳/۹۵	۳/۶۵	A	20SA
۱۲۱۰	۴/۱۰	۳/۹۵		
۱۱۸۰	۴/۴۰	۴/۱۰		
۱۱۴۰	۴/۶۰	۴/۴۰		
۱۱۰۰	۴/۷۵	۴/۶۰		
۱۰۷۰	۶/۵۰	۴/۷۵		
۱۳۲۰	۵/۵۰	۱/۲۴	B	
۱۰۸۰	۵/۰۰	۲/۵۰	—	27SA
۸۸۰	۵/۰۰	۲/۵۰	—	30SA
۶۸۰	۵/۰۰	۲/۵۰	—	40SA

### ۵-۱-۱-۳- آزمون نیروی گسیختگی هادی

دستگاه آزمون مشابه آزمون قبلی بوده و هادی تحت کشش قرار می‌گیرد. دقت اندازه‌گیری بایستی  $\pm 1\%$  درصد باشد. نیروی کششی بصورت یکنواخت افزایش یافته و زمان مورد نیاز برای رسیدن به ۳۰ درصد RTS نبایستی کمتر از ۱ دقیقه و بیشتر از ۲ دقیقه باشد. ادامه آزمون با همان نرخ‌گذاری انجام می‌گیرد. استقامت پارگی یا گسیختگی هادی، مقدار باری است که یک یا چند رشته گسیخته می‌شود. چنانچه پارگی رشته‌های هادی تا فاصله یک سانتیمتری گیره‌های انتهایی رخ دهد، آزمون بایستی مجدداً (حداکثر تا سه بار) تکرار گردد.

بعنوان معیار پذیرش، هادی بایستی بیش از ۹۵ درصد استقامت کششی محاسباتی را بدون اینکه رشته‌ای پاره شود، تحمل نماید. استقامت کششی محاسباتی برای هادی آلومینیومی همگن برابر با مجموع حداقل استقامت کششی رشته‌هاست. برای هادی آلومینیوم - فولاد، مجموع استقامت کششی بخش آلومینیومی هادی و استقامت رشته فولادی متناسب با افزایش طولی برابر با آنچه که در آلومینیوم و در بار گسیختگی رخ می‌دهد، بعنوان استقامت کششی محاسباتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت تعیین مشخصات و کاربردی نمودن آن، می‌توان تنش متناسب با افزایش طول یک درصد برای یک طول مبنای ۲۵۰ میلیمتری را برابر با استقامت کششی محاسباتی قرار داد.

### ۵-۱-۲- آزمونهای نمونه‌ای

#### ۵-۱-۲-۱- آزمون کشش بر روی مفتولهای آلومینیومی و فولادی و فولادی با پوشش آلومینیوم

مطابق با آزمونهای نوعی انجام می‌گیرد.

#### ۵-۱-۲-۲- آزمون پیچش مفتولهای آلومینیومی

این آزمون شامل پیچیدن رشته به تعداد دور مشخص حول یک استوانه با قطر معین می‌باشد. این آزمون را می‌توان بصورت ترکیبی از مراحل پیچیدن رشته، توقف فرآیند پیچیدن و حتی باز کردن رشته از روی استوانه انجام داد. تجهیز آزمون بایستی دارای این قابلیت باشد که رشته را حول استوانه بصورت فنر بیچد، بطوری که دورهای همجوار سیم‌پیچ در تماس با هم قرار گیرند. یک قطعه از رشته را می‌توان بعنوان استوانه (محور) مورد استفاده قرار داد. در این صورت، رشته بایستی قطر استوانه مورد نظر را تأمین نموده و از استحکام لازم برخوردار باشد. عموماً این آزمون در شرایط محیطی بین ۱۰ تا ۳۵ درجه سانتیگراد انجام می‌گیرد. بنابراین آزمون بایستی در شرایط کنترل شده انجام پذیرد. در طول آزمون درجه حرارت بایستی در محدوده  $\pm 5$  ۲۳ درجه سانتیگراد قرار داشته باشد. جهت انجام آزمون، رشته بایستی حول استوانه با سرعت ثابت کمتر از یک دور در ثانیه پیچیده شود. جهت حصول اطمینان از اینکه حرارت تولید شده در فرآیند پیچیدن، تأثیری در نتایج آزمون ایجاد ننماید، در صورت لزوم می‌توان سرعت را کاهش داد. همچنین تنش کششی اعمال شده به رشته در طول آزمون نبایستی از ۵ درصد استقامت کششی نامی فراتر رود.

چنانچه فرآیند پیچیدن متوقف شده و در ادامه رشته از روی استوانه باز شود، سرعت انجام فرآیند بایستی تا حدی آهسته باشد که از هرگونه افزایش درجه حرارت رشته که نتایج آزمون را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اجتناب گردد. بایستی دقت نمود که در انتهای فرآیند باز کردن سیم‌پیچ، حداقل یک دور بر روی استوانه باقی بماند.

برای انجام آزمون مذکور، پیچیدن ۸ دور حول استوانه یا محوری با قطر برابر با قطر رشته بایستی انجام گیرد. سرعت پیچیدن نبایستی از ۶۰ دور در دقیقه فراتر رود. سپس ۶ دور باز شده و بلافاصله پیچیده می‌شود. رشته پس از این شرایط نبایستی بشکند.

جهت نتیجه‌گیری از آزمون پیچش بازدید سطح رشته کفایت می‌نماید. چنانچه نیازهای خاصی توسط خریدار مطرح نگردیده باشد، عدم حضور ترک قابل رویت بدون استفاده از وسایل بزرگنمایی برای کافی بودن استقامت رشته، معیار پذیرش در این آزمون می‌باشد. رشته با قطر کمتر از ۰/۵ میلی‌متر با تقریباً ۱۰ برابر بزرگنمایی مورد بازبینی قرار می‌گیرند.

### ۵-۱-۲-۳- آزمون مقاومت الکتریکی مفتولهای آلومینیومی

مقاومت الکتریکی ویژه یک قطعه از نمونه‌های برداشت شده از رشته‌های آلومینیومی با روش روتین مشخص شده در مرجع [۷] تعیین می‌گردد. استاندارد مذکور برای محاسبه مقاومت ویژه حجمی، مقاومت ویژه جرمی و مقاومت ویژه واحد طول هادی‌های فلزی مفتولی (بافته نشده) با سطح مقطع یکنواخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. دقت مجاز برای محاسبه مقاومت ویژه حجمی  $\pm 0/65$  درصد، برای مقاومت ویژه جرمی  $\pm 0/45$  درصد و برای مقاومت ویژه واحد طول  $\pm 0/40$  درصد می‌باشد. اندازه‌گیری هر یک از مقادیر فیزیکی مورد نیاز جهت محاسبات بایستی با دقتی انجام گیرد که خطای کلی از محدوده‌های فوق‌الذکر فراتر نرود. چنانچه پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه مقاومت ویژه با دقت‌های مندرج در جدول (۵-۱۰) اندازه‌گیری شوند، دقت‌های مجاز فوق‌الذکر تأمین می‌گردند.

درجه حرارت مرجع برای آزمونها ۲۰ درجه سانتیگراد است. مقاومت ویژه حجمی طبق تعریف، مقاومت یک هادی با طول واحد و سطح مقطع واحد می‌باشد که در درجه حرارت مرجع  $t_0$  از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$R_v(t_0) = \frac{A(t_0)}{L_1(t_0)} \times R(t_0) \quad (1-5)$$

که در آن  $R_v(t_0)$  مقاومت ویژه حجمی (بر حسب اهم متر)،  $R(t_0)$  مقاومت بین پایانه‌های طول مینا از یک قطعه آزمون (بر حسب اهم)،  $A(t_0)$  سطح مقطع قطعه (بر حسب مترمربع) و  $L_1(t_0)$  طول مبنای قطعه (بر حسب متر)، همگی در درجه حرارت مرجع  $t_0$  می‌باشند.

مقاومت ویژه جرمی بصورت مقاومت یک هادی با طول واحد و جرم واحد تعریف می‌گردد. این مقدار در درجه حرارت مرجع  $t_0$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد :

$$R_m(t_0) = \frac{m}{L_2(t_0)} \times \frac{R(t_0)}{L_1(t_0)} \quad (2-5)$$

جدول ۵-۱: محدوده دقت اندازه‌گیریها

دقت اندازه‌گیری	پارامتر
$\pm 0.10$ درصد	طول مینا
$\pm 0.30$ درصد	مقاومت
$\pm 0.50$ درصد	سطح مقطع
	با اطلاع داشتن از چگالی قطعه نمونه :
$\pm 0.10$ درصد	جرم در هوا
$\pm 0.20$ درصد	طول قطعه
$\pm 0.45$ درصد	چگالی قطعه
	با استفاده از وزن کردن هیدرواستاتیک :
$\pm 0.30 d_L/d_L$ درصد	جرم در هوا
$\pm 0.3 d_L(d_S-d_L)$ درصد	جرم در مایع
$\pm 0.20$ درصد	چگالی مایع
$\pm 0.25$ درصد	عدم قطعیت در درجه حرارت
$\pm 0.15 (0.4^\circ\text{C})$ درصد	کنترل درجه حرارت
$\pm 0.15$ درصد	اصلاح درجه حرارت
	کل :
$\pm 0.65$ درصد	مقاومت ویژه حجمی
$\pm 0.45$ درصد	مقاومت ویژه جرمی
$\pm 0.40$ درصد	مقاومت واحد طول

که در آن  $R_m(t_0)$  مقاومت ویژه جرمی (برحسب اهم در کیلوگرم بر متر مربع)،  $m$  جرم قطعه (برحسب کیلوگرم) و  $L_2(t_0)$  طول کل قطعه (برحسب متر)، همگی در درجه حرارت مرجع  $t_0$  می‌باشند. نهایتاً مقاومت واحد طول  $R_L(t_0)$  (برحسب اهم بر متر)، در درجه حرارت مرجع  $t_0$  از رابطه (۳-۵) بدست می‌آید:

$$R_L(t_0) = \frac{R(t_0)}{L_1(t_0)} \quad (3-5)$$

جهت انجام آزمون بر روی قطعات با مقاومت یک اهم یا کمتر از روش اندازه‌گیری چهار پایانه‌ای و برای قطعات با مقاومت بزرگتر از یک اهم از روش اندازه‌گیری دو پایانه‌ای بهره گرفته می‌شود. از بین قطعات آزمون، بایستی قطعاتی انتخاب گردند که با بیش از چهار بار اندازه‌گیری سطح مقطع در فواصل مساوی از طول مینا، انحراف معیار مقادیر کمتر از ۲ درصد باشد. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت بایستی خطایی در محدوده  $\pm 0.30$  درصد داشته باشد. طول مینا که بین کنتاکتهای ولتاژ قرار می‌گیرد، بایستی با دقتی در محدوده  $\pm 0.10$  درصد اندازه‌گیری شود. مقاومت‌های مرجع و قطعه آزمون بایستی در یک محفظه عاری از جریان هوا و در یک آزمایشگاه بمدت حداقل یک ساعت قبل از انجام آزمون قرار داده شوند، یا اینکه در یک وان روغن غوطه‌ور گردند. درجه حرارت هوای محفظه یا وان روغن بایستی با دقتی کوچکتر یا برابر با  $0.4$  درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شود. درجه حرارت آزمون بایستی بین



۱۰ تا ۳۵ درجه سانتیگراد باشد. جهت دستیابی به نتایج مطلوب و جلوگیری از تأثیر عوامل دیگر، می‌توان اندازه‌گیریها را تکرار نمود (بعنوان مثال ۵ تکرار)، سپس با میانگین‌گیری از اندازه‌ها، مقدار مقاومت اندازه‌گیری شده را تعیین نمود.

جهت حصول اطمینان از اینکه افزایش درجه حرارت تولید شده در اثر عبور جریان اندازه‌گیری تأثیری بر روی نتایج آزمون نداشته باشد، یک مجموعه دیگر برای اندازه‌گیری مقاومت با جریانی معادل  $1/4$  برابر جریان اندازه‌گیری اولیه در نظر گرفته می‌شود. چنانچه میانگین اندازه‌گیریهای جدید، با نتایج آزمون با جریان کوچکتر، اختلافی بیش از  $0/06$  درصد داشته باشد، مشخص می‌گردد که افزایش درجه حرارت بایستی در نظر گرفته شود. بنابر این جریان آزمون بایستی تا حدی کاهش داده شود که افزایش  $40$  درصدی در آن، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی نتایج آزمون نداشته باشد.

درجه حرارت قطعات آزمون و قطعات مرجع بایستی اندازه‌گیری و کنترل شوند تا دقت‌های مورد نظر برآورده شود. در این صورت حاصلضرب این دقتها و ضریب حرارتی مقاومت در هر حالت نبایستی از  $0/04$  درصد فراتر رود. چنانچه لازم باشد، بایستی وان مایع برای یکنواختی و کنترل درجه حرارت بکار گرفته شود. مدت زمان کافی بایستی بین برقراری وضعیت آزمون و انجام اندازه‌گیریها اختصاص داده شود تا این اطمینان حاصل گردد که درجه حرارت در طول اندازه‌گیری، خارج از محدوده دقت مربوطه قرار نگیرد. درجه حرارت قطعات آزمون و مرجع بایستی در محدوده  $15$  تا  $25$  درجه سانتیگراد قرار داشته باشد.

سطح مقطع رشته‌ها بایستی در محدوده  $10$  تا  $35$  درجه سانتیگراد با دقت  $\pm 0/50$  درصد اندازه‌گیری شود. سطح مذکور توسط میانگین‌گیری از دو مقدار محاسبه شده از روی اندازه‌گیری قطرهای دو انتهای طول مبنا تعیین می‌گردد. اگر دو مقدار فوق‌الذکر بیش از  $0/70$  درصد اختلاف داشته باشند، سطح مقطع بایستی از روی جرم، طول و چگالی قطعه بدست آید. خطای اندازه‌گیریها نبایستی از  $\pm 0/1$  درصد برای جرم،  $\pm 0/2$  درصد برای طول  $0/45 \pm$  درصد برای چگالی فراتر رود.

در اندازه‌گیری جرم بایستی دقت لازم بکار گرفته شود تا جریان هوا تأثیری در نتیجه اندازه‌گیری نداشته باشد.

چگالی قطعه آزمون با استفاده از روش توزین هیدرواستاتیکی تعیین می‌گردد. در این روش قطعه در هوا و مایع با چگالی مشخص در درجه حرارت اندازه‌گیری، توزین می‌گردد. چگالی قطعه،  $d_s$ ، (برحسب کیلوگرم بر متر مکعب) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$d_s = \frac{m_A d_L(t) - m_L(t) d_A}{m_A - m_L(t)} \quad (4-5)$$

که در آن  $m_A$  و  $m_L(t)$  بترتیب جرمهای قطعه در هوا و مایع (برحسب کیلوگرم)،  $d_A$  و  $d_L(t)$  چگالی هوا ( $1/2$  کیلوگرم بر متر مکعب) و مایع در درجه حرارت  $t$  می‌باشند. خطا در تعیین چگالی مایع نبایستی بزرگتر از  $\pm 0/20$  درصد باشد. ضمن اینکه یکنواختی و کنترل درجه حرارت مایع بایستی در محدوده‌ای باشد که این شرایط تضمین گردد.

زمانیکه این روش برای تعیین چگالی قطعه آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرد، خطای ایجاد شده در تعیین سطح مقطع بستگی به حاصلضرب دقت اندازه‌گیری  $m_A$  در  $d_S/d_L$  و حاصلضرب دقت اندازه‌گیری  $m_L$  در  $(d_S-d_L)/d_L$  دارد.

اندازه‌گیری جرم در هوا بایستی با خطایی کوچکتر از  $0/30 (d_L-d_S)$  درصد و در مایع با خطایی کوچکتر از  $0/30 d_L/(d_S-d_L)$  انجام گیرد. چنانچه قطعه‌ای از رشته که در مایع معلق می‌شود، دارای قطری بزرگتر از  $0/15$  میلیمتر باشد، دو بار توزین بایستی با رشته‌هایی که قطر آنها نسبت یک به دو دارند و اختلافشان بیشتر از  $0/10 d_L/(d_S-d_L)$  درصد از جرم ظاهری قطعه در مایع نباشد، انجام گیرد، مگر اینکه اثر کششی سطحی حذف گردد.

مقادیر محاسبه شده در درجه حرارت آزمایشگاه بایستی به درجه حرارت مرجع  $t_0$  مثلاً  $20$  درجه سانتیگراد تبدیل گردد.

با فرض اینکه مقاومت یک قطعه بصورت خطی با درجه حرارت تغییر می‌نماید :

$$R(t_0) = \frac{R(t)}{1 + [\alpha_R(t_0)](t - t_0)} \quad (5-5)$$

که در آن  $R(t)$  مقاومت قطعه در درجه حرارت  $t$ ،  $R(t_0)$  مقاومت قطعه در درجه حرارت مرجع  $t_0$  و  $\alpha_R(t_0)$  ضریب حرارتی مقاومت در درجه حرارت مرجع  $t_0$  می‌باشند. این ضریب برای آلومینیوم برابر  $0.00403$  است.

اگر مقاومت  $R(t)$  و طول مبنای قطعه  $L_1(t)$  در درجه حرارت  $t$  اندازه‌گیری شده باشند، مقاومت واحد طول در درجه حرارت مرجع  $t_0$  با دقت کافی از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$R_L(t_0) = \frac{R_L(t)}{1 + [\alpha_R(t_0) - \gamma](t - t_0)} \quad (6-5)$$

که  $R_L(t)$  مقاومت ویژه حجمی قطعه در درجه حرارت  $t$ ،  $\gamma$  ضریب حرارتی انبساط خطی است. اگر مقاومت  $R(t)$ ، طول مبنای قطعه  $L_1(t)$  و سطح مقطع  $A(t)$  در درجه حرارت  $t$  اندازه‌گیری شده باشند، مقاومت ویژه حجمی در درجه حرارت مرجع  $t_0$  با دقت کافی برابر است با :

$$R_V(t_0) = \frac{R_V(t)}{1 + [\alpha_R(t_0) + \gamma](t - t_0)} \quad (7-5)$$

که  $R_V(t)$  مقاومت ویژه جرمی قطعه در درجه حرارت  $t$  می‌باشد. اگر مقاومت  $R(t)$ ، طول مبنای  $L_1(t)$ ، طول کل  $L_2(t)$  و جرم قطعه در درجه حرارت  $t$  اندازه‌گیری شده باشند، مقاومت ویژه جرمی در درجه حرارت  $t_0$  با دقت کافی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_M(t_0) = \frac{R_M(t)}{1 + [\alpha_R(t_0) + 2\gamma](t - t_0)} \quad (8-4)$$

که  $R_M(t)$  مقاومت ویژه جرمی قطعه در درجه حرارت  $t$  است.

اگر اندازه‌گیری طول کل قطعه و سطح مقطع آن در درجه حرارت  $t'$  متفاوت از درجه حرارت  $t$  که مقاومت و طول مبنای در آن اندازه‌گیری شده‌اند، انجام گرفته باشد، بایستی این ابعاد از  $t'$  به  $t$  اصلاح گردند. روابط مربوطه عبارتند از :

$$L_2(t) = L_2(t')[1 + \gamma.(t - t')] \quad (9-5)$$

$$A(t) = A(t')[1 + 2\gamma.(t - t')] \quad (10-5)$$

برای اغلب مواد، ضریب حرارتی انبساط خطی  $\gamma$  بسیار کوچکتر از ضریب حرارتی مقاومت  $\alpha_R(t_0)$  است. بنابراین برای اختلاف درجه حرارت‌های کوچک  $(t - t_0)$  در نظر گرفتن  $\gamma$  در روابط فوق ضروری بنظر نمی‌رسد. حاصلضرب اختلاف درجه حرارت  $(t - t_0)$  در خطای ضریب حرارتی نبایستی از  $0.15$  درصد بیشتر باشد. دقت شود که در روش آزمون روتین، اختلاف درجه حرارت ممکن است جدی بزرگ باشد که لزوماً ضریب حرارتی انبساط خطی بایستی در نظر گرفته شود.

#### ۵-۱-۲-۴- آزموون تنش در یک درصد افزایش طول روی مفتولهای فولادی و مفتولهای فولادی با پوشش آلومینیوم

این آزمون در بند (۵-۱-۱-۲) در زمره آزمونهای نوعی تشریح گردیده است.

## ۵-۱-۲-۵- آزمون خاصیت لوله شدن مفتول‌های فولادی

این آزمون شامل سه آزمون کشیدگی، آزمون پیچش و آزمون پیچاندن دور لوله می‌باشد. انتخاب یکی از دو آزمون کشیدگی و پیچش کفایت می‌نماید و نتیجه انتخاب، تأثیری در ارزیابی کیفیت فولاد مورد استفاده نخواهد داشت. بنابراین انتخاب آزمون به صلاحدید سازنده انجام می‌گیرد، مگر اینکه در زمان سفارش، توافق دیگری بین سازنده و خریدار صورت گرفته باشد.

## \_ آزمون کشیدگی :

جهت انجام این آزمون بایستی از نمونه‌هایی استفاده نمود که تحت آزمون تنش در یک درصد افزایش طول مطابق با روش آزمون مربوطه نشانه‌گذاری شده‌اند. این آزمون بر روی یک تکه از هر یک نمونه‌های آزمون انجام می‌گیرد. این تکه مطابق با آزمون کشش بارگذاری گردیده و پس از پاره شدن، دو انتهای تکه با دقت بهم وصل شده و در فاصله گیره‌ها قرار داده می‌شود. سپس فاصله مبنا اندازه‌گیری شده و مقدار کشیدگی بدست می‌آید.

در این آزمون مناسب‌تر است که تکه تحت آزمون در فاصله بین نشانه‌های مبنا پاره شود. کشیدگی برابر با افزایش طول مبنا بر حسب درصد طول اولیه مبنا می‌باشد. حد نهایی کشیدگی نبایستی از مقادیر مشخص شده در جداول (۵-۱۱) تا (۵-۱۳) کمتر باشد. چنانچه این آزمون برای کنترل کیفی جاری مورد استفاده قرار گیرد، می‌توان از طول مبنای کوچکتر استفاده نمود. در شرایطی که توافق صورت نگیرد، طول مبنای ۲۵۰ میلی‌متر الزامی است.

جدول ۵-۱۱ : حداقل حد نهایی کشیدگی برای رشته‌های فولادی عادی

حداقل حد نهایی کشیدگی (درصد)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۴/۰	۳/۰	±۰/۰۵	±۰/۰۳	۲/۲۵	۱/۲۴
۴/۰	۳/۰	±۰/۰۶	±۰/۰۴	۲/۷۵	۲/۲۵
۴/۰	۳/۵	±۰/۰۶	±۰/۰۵	۳/۰۰	۲/۷۵
۴/۰	۳/۵	±۰/۰۷	±۰/۰۵	۳/۵۰	۳/۰۰
۴/۰	۴/۰	±۰/۰۹	±۰/۰۶	۴/۲۵	۳/۵۰
۴/۰	۴/۰	±۰/۱۰	±۰/۰۶	۴/۷۵	۴/۲۵
۴/۰	۴/۰	±۰/۱۱	±۰/۰۷	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۱۲: حداقل حد نهایی کشیدگی برای رشته‌های فولادی با استقامت زیاد

حداقل حد نهایی کشیدگی (درصد)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۲/۵	۲/۵	±۰/۰۵	±۰/۰۳	۲/۲۵	۱/۲۴
۲/۵	۲/۵	±۰/۰۶	±۰/۰۴	۲/۷۵	۲/۲۵
۳/۰	۳/۰	±۰/۰۶	±۰/۰۵	۳/۰۰	۲/۷۵
۳/۰	۳/۰	±۰/۰۷	±۰/۰۵	۳/۵۰	۳/۰۰
۳/۰	۳/۰	±۰/۰۹	±۰/۰۶	۴/۲۵	۳/۵۰
۳/۰	۳/۰	±۰/۱۰	±۰/۰۶	۴/۷۵	۴/۲۵
۳/۰	۳/۰	±۰/۱۱	±۰/۰۷	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۱۳: حداقل حد نهایی کشیدگی برای رشته‌های فولادی با استقامت بسیار زیاد

حداقل حد نهایی کشیدگی (درصد)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
—	۲/۰	—	±۰/۰۳	۲/۲۵	۱/۲۴
—	۲/۰	—	±۰/۰۴	۲/۷۵	۲/۲۵
—	۲/۵	—	±۰/۰۵	۳/۰۰	۲/۷۵
—	۲/۵	—	±۰/۰۵	۳/۵۰	۳/۰۰
—	۲/۵	—	±۰/۰۶	۴/۲۵	۳/۵۰
—	۲/۵	—	±۰/۰۶	۴/۷۵	۴/۲۵
—	۲/۵	—	±۰/۰۷	۵/۵۰	۴/۷۵

## - آزمون پیچش :

می‌توان بجای آزمون حد نهایی کشیدگی از آزمون پیچش بهره گرفت. این آزمون برای رشته‌های فولادی با پوشش روی کلاس ۲ قابل اعمال نمی‌باشد. جهت انجام این آزمون، قطعه‌ای از رشته بایستی در میان دو گیره قرار گیرد و یکی از این گیره‌ها بایستی توانایی گردش آزادانه حول محور گیره‌ها را داشته باشد. به این ترتیب می‌توان رشته را حول محور طولی آن پیچاند (تابیدن رشته). قبل از گردش گیره حول محور، یک بار کششی کوچک (که بایستی از ۲ درصد کشش گسیختگی رشته بزرگتر باشد) به قطعه اعمال شده و در طول آزمون برقرار می‌باشد. سپس قطعه در حول محور طولی خود تابانده شده و تعداد چرخش گیره توسط یک شمارنده یا دیگر وسیله مناسب ثبت می‌گردد. این فرآیند تا زمان گسیختگی رشته ادامه خواهد یافت. تعداد چرخش گیره در زمان گسیختگی بعنوان نتیجه آزمون تعیین می‌گردد. نرخ چرخیدن گیره بایستی از ۶۰ دور در دقیقه فراتر رود. تعداد پیچش در زمان

گسیختگی رشته برای یک قطعه با طول ۱۰۰ برابر قطر رشته، نبایستی از تعداد مشخص شده در جداول شماره (۵-۱۴) تا (۵-۱۶) کمتر باشد.

جدول ۵-۱۴: حداقل تعداد پیچش در آزمون پیچش برای رشته‌های فولادی عادی

حداقل تعداد پیچش در آزمون پیچش		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
—	۱۸	—	$\pm 0.3$	۲/۲۵	۱/۲۴
—	۱۶	—	$\pm 0.4$	۲/۷۵	۲/۲۵
—	۱۶	—	$\pm 0.5$	۳/۰۰	۲/۷۵
—	۱۴	—	$\pm 0.5$	۳/۵۰	۳/۰۰
—	۱۲	—	$\pm 0.6$	۴/۲۵	۳/۵۰
—	۱۲	—	$\pm 0.6$	۴/۷۵	۴/۲۵
—	۱۲	—	$\pm 0.7$	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۱۵: حداقل تعداد پیچش در آزمون پیچش برای رشته‌های فولادی با استقامت زیاد

حداقل تعداد پیچش در آزمون پیچش		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
—	۱۶	—	$\pm 0.3$	۲/۲۵	۱/۲۴
—	۱۶	—	$\pm 0.4$	۲/۷۵	۲/۲۵
—	۱۶	—	$\pm 0.5$	۳/۰۰	۲/۷۵
—	۱۴	—	$\pm 0.5$	۳/۵۰	۳/۰۰
—	۱۲	—	$\pm 0.6$	۴/۲۵	۳/۵۰
—	۱۲	—	$\pm 0.6$	۴/۷۵	۴/۲۵
—	۱۲	—	$\pm 0.7$	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۱۶: حداقل تعداد پیچش در آزمون پیچش برای رشته‌های فولادی با استقامت بسیار زیاد

حداقل تعداد پیچش در آزمون پیچش		تولرانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
—	۱۴	—	$\pm 0.03$	۲/۲۵	۱/۲۴
—	۱۴	—	$\pm 0.04$	۲/۷۵	۲/۲۵
—	۱۲	—	$\pm 0.05$	۳/۰۰	۲/۷۵
—	۱۲	—	$\pm 0.05$	۳/۵۰	۳/۰۰
—	۱۰	—	$\pm 0.06$	۴/۲۵	۳/۵۰
—	۱۰	—	$\pm 0.06$	۴/۷۵	۴/۲۵
—	۱۰	—	$\pm 0.07$	۵/۵۰	۴/۷۵

## - آزمون پیچاندن دور لوله :

یک قطعه بریده شده از هر یک از نمونه‌های آزمون از رشته فولادی پوشش‌دار برای انجام این آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرد. تجهیزاتی که برای انجام این آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرد بایستی رشته را بدور یک محور استوانه‌ای شکل با قطر مشخص ببیچاند، بطوری که یک ماریپیچ فنری شکل تشکیل شود. تعداد حلقه‌های ماریپیچ فنری بایستی ۸ دور بوده و با نرخ کمتر از ۱۵ دور در دقیقه پیچیده شود. در این حالت رشته نبایستی پاره شود. قطر محور استوانه‌ای شکل بایستی مطابق با مقادیر مشخص شده در جداول شماره (۵-۱۷) تا (۵-۱۹) باشد.

جدول ۵-۱۷: قطر لوله استوانه‌ای در آزمون پیچاندن دور لوله برای رشته‌های فولادی عادی

قطر لوله (ضربیی از قطر رشته)		تولرانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۱	۱	$\pm 0.05$	$\pm 0.03$	۲/۲۵	۱/۲۴
۱	۱	$\pm 0.06$	$\pm 0.04$	۲/۷۵	۲/۲۵
۱	۱	$\pm 0.06$	$\pm 0.05$	۳/۰۰	۲/۷۵
۱	۱	$\pm 0.07$	$\pm 0.05$	۳/۵۰	۳/۰۰
۱	۱	$\pm 0.09$	$\pm 0.06$	۴/۲۵	۳/۵۰
۱	۱	$\pm 0.10$	$\pm 0.06$	۴/۷۵	۴/۲۵
۱	۱	$\pm 0.11$	$\pm 0.07$	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۱۸: قطر لوله استوانه‌ای در آزمون پیچاندن دور لوله برای رشته‌های فولادی با استقامت زیاد

قطر لوله (ضریبی از قطر رشته)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۳	۳	$\pm 0.05$	$\pm 0.03$	۲/۲۵	۱/۲۴
۳	۳	$\pm 0.06$	$\pm 0.04$	۲/۷۵	۲/۲۵
۴	۴	$\pm 0.06$	$\pm 0.05$	۳/۰۰	۲/۷۵
۴	۴	$\pm 0.07$	$\pm 0.05$	۳/۵۰	۳/۰۰
۴	۴	$\pm 0.09$	$\pm 0.06$	۴/۲۵	۳/۵۰
۴	۴	$\pm 0.10$	$\pm 0.06$	۴/۷۵	۴/۲۵
۴	۴	$\pm 0.11$	$\pm 0.07$	۵/۵۰	۴/۷۵

جدول ۵-۱۹: قطر لوله استوانه‌ای در آزمون پیچاندن دور لوله برای رشته‌های فولادی با استقامت بسیار زیاد

قطر لوله (ضریبی از قطر رشته)		تلورانس قطر (میلی‌متر)		قطر نامی رشته (میلی‌متر)	
پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	پوشش روی کلاس ۲	پوشش روی کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
—	۴	—	$\pm 0.03$	۲/۲۵	۱/۲۴
—	۴	—	$\pm 0.04$	۲/۷۵	۲/۲۵
—	۵	—	$\pm 0.05$	۳/۰۰	۲/۷۵
—	۵	—	$\pm 0.05$	۳/۵۰	۳/۰۰
—	۵	—	$\pm 0.06$	۴/۲۵	۳/۵۰
—	۵	—	$\pm 0.06$	۴/۷۵	۴/۲۵
—	۵	—	$\pm 0.07$	۵/۵۰	۴/۷۵

## ۵-۱-۲-۶- آزمون پوشش روی در مفتولهای فولادی

## - آزمون تعیین جرم پوشش روی

مفتولهای فولادی جهت جلوگیری از زنگ‌زدگی باید دارای پوشش روی باشند. جهت تعیین جرم پوشش روی از یکی از دو روش اندازه‌گیری حجم یا اندازه‌گیری وزن استفاده می‌شود. روش اندازه‌گیری حجم دارای دقت قابل ملاحظه‌ای بوده و سریعاً قابل انجام می‌باشد. بنابراین روش اندازه‌گیری حجم برای آزمونهای جاری مربوط به کلیه سطوح مقاطع رشته‌ها توصیه می‌گردد. چنانچه بین سازنده و خریدار اختلاف نظر وجود داشته باشد، روش اندازه‌گیری وزن بعنوان روش الزامی بایستی بکار برده شود. جرم پوشش روی بایستی از مقدار مشخص شده در جدول شماره (۵-۲۰) کمتر باشد.

جدول ۵-۲۰: حداقل جرم پوشش روی در رشته‌های فولادی

حداقل جرم پوشش روی (گرم بر متر مربع)		قطر رشته (میلی‌متر)	
کلاس ۲	کلاس ۱	کمتر یا مساوی با	بیشتر از
۳۷۰	۱۸۵	۱/۵۰	۱/۲۴
۴۰۰	۲۰۰	۱/۷۵	۱/۵۰
۴۳۰	۲۱۵	۲/۲۵	۱/۷۵
۴۶۰	۲۳۰	۳/۰۰	۲/۲۵
۴۹۰	۲۴۵	۳/۵۰	۳/۰۰
۵۲۰	۲۶۰	۴/۲۵	۳/۵۰
۵۵۰	۲۷۵	۴/۷۵	۴/۲۵
۵۸۰	۲۹۰	۵/۵۰	۴/۷۵

## الف - روش اندازه‌گیری حجم توسط گاز:

اساس روش اندازه‌گیری حجم بر این پدیده استوار است که در زمان حل شدن فلز در یک اسید، گاز هیدروژن آزاد می‌گردد و مقدار این گاز متناسب با مقدار فلز حل شده می‌باشد. بعبارت دیگر جهت تعیین جرم فلز حل شده، معادل شیمیایی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هر یک گرم فلز معادل ۰/۳۴۳ لیتر هیدروژن در درجه حرارت صفر درجه سانتیگراد و فشار ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال آزاد می‌نماید.

لازم به ذکر است که در انجام آزمون برای رشته‌های خیلی ضخیم، مشکلاتی در آزمون پدید می‌آید که ممکن است منجر به صدمه دیدن تجهیزات آزمون شود. بنابراین، این روش اندازه‌گیری برای رشته‌هایی با قطر حداکثر ۵ میلی‌متر توصیه می‌گردد.

در طول آزمون، معرفهای زیر بایستی مورد استفاده قرار گیرند :

- کلراید آنتیموان که بوسیله حل کردن ۲۰ گرم تری‌اکسید آنتیموان یا ۳۲ گرم تری کلراید آنتیموان در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلراید تهیه می‌گردد (وزن مخصوص بین ۱/۱۶ و ۱/۱۸)

- اسید هیدروکلراید (وزن مخصوص بین ۱/۱۶ و ۱/۱۸)

برای ترکیب دو محلول فوق، ۵ میلی‌لیتر از محلول اول به ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول دوم اضافه می‌گردد.

علاوه بر موارد فوق‌الذکر می‌توان از دستورالعمل ترکیبی اشاره شده در استاندارد ISO شماره ۱۴۶۰ نیز بهره گرفت.

تجهیزات آزمون شامل یک بورت<sup>۱</sup> شیشه‌ای ۱۰۰ میلی‌لیتری است که توسط یک لوله پلاستیکی به یک مخزن متصل شده و توسط شیر در بالا و پایین کنترل می‌گردد. بورت مذکور بایستی به فواصل ۰/۵ میلی‌لیتری مدرج شده باشد. چنانچه رشته‌هایی با مقاطع کوچکتر (بعنوان مثال رشته‌هایی با قطر کوچکتر از ۱/۵ میلی‌متر) تحت آزمون قرار می‌گیرند، استفاده از بورت ۵۰ میلی‌لیتری با طول تقریبی یکسان با حالت قبل و فواصل درجه‌بندی ۰/۲ میلی‌لیتر مناسبتر خواهد بود.

1. Burette



قطعاتی از رشته که تحت آزمون قرار می‌گیرند، بایستی از یک قسمت سالم رشته و به اندازه مورد نیاز با خطای کمتر از یک درصد جدا شود. مناسبترین طول رشته برای آزمون بستگی به سایز بورت، قطر رشته و جرم تقریبی پوشش دارد. طولهای مشخص شده در جدول شماره (۵-۲۱) رایج می‌باشد.

جدول ۵-۲۱: طول قطعات آزمون اندازه‌گیری حجم توسط گاز

طول قطعه، آزمون		قطر رشته با پوشش روی	
برای یک بورت ۵۰ میلی لیتری (میلی متر)	برای یک بورت ۱۰۰ میلی لیتری (میلی متر)	کمتر یا مساوی با (میلی متر)	بیشتر از (میلی متر)
۷۵	۱۰۰	۱/۸	۱/۲۴
—	۷۵	۳/۶	۱/۸
—	۵۰	۵/۵	۳/۶

معرف اسید داخل منبع ریخته می‌شود، بطوریکه کاملاً بورت را پر نموده و بخش کوچکی از حجم مخزن را خالی نگهدارد. برای انجام آزمون، ارتفاع مخزن بطریقی تنظیم می‌گردد که معرف اسید، ظرفیت بورت را تا شیر بالایی پر نماید. در این حالت شیر پایینی بسته خواهد بود. قطعه آزمون که با طول مشخص بریده شده است، داخل بورت قرار داده شده و فوراً شیر بالایی بسته می‌شود. در این شرایط، پوشش روی سریعاً حل شده و گاز هیدروژن آزاد می‌نماید. اجازه داده می‌شود که حل شدن ادامه یابد تا زمانیکه بجز تعدادی حباب ریز، تولید هیدروژن متوقف گردد. سپس مخزن از گیره آن جدا شده و همتراز با بورت بطریقی قرار می‌گیرد که سطوح معرف اسید در بورت و مخزن برابر باشد و حجم هیدروژن از روی درجه‌های بورت قابل خواندن باشد. زمانیکه آزمون پایان پذیرفت، شیر بالایی باز شده و تمام معرف اسید از بورت توسط پایین آوردن مخزن خارج می‌شود. سپس شیر پایینی باز شده و قطعه آزمون خارج می‌گردد. قطعه آزمون با دقت خشک شده و قطر آن با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود.

جرم پوشش روی از فرمول زیر محاسبه می‌گردد :

$$\text{جرم پوشش روی در واحد سطح فولاد} = \frac{V}{dL} \times f \quad (۵-۱۱)$$

که در آن  $V$  حجم هیدروژن آزاد شده برحسب میلی لیتر،  $d$  قطر رشته لخت شده و  $L$  طول قطعه آزمون می‌باشد. چنانچه طول و قطر برحسب میلی‌متر و  $f$  برابر با ۸۶۶ در نظر گرفته شود، جرم پوشش برحسب گرم بر متر مربع بدست می‌آید. ضریب  $f$  برای درجه حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال محاسبه شده است. اگر فشار اتمسفر خارج از محدوده ۹۸/۷ تا ۱۰۴ کیلو پاسکال باشد، یا درجه حرارت بین ۱۸ تا ۲۲ درجه سانتیگراد نباشد، ضرایب اصلاح مناسب از جدول (۵-۲۲) بایستی استخراج و به ضریب  $f$  اعمال گردد.

اگر حاصلضرب ضرایب اصلاح فشار و درجه حرارت در بازه ۰/۹۸ تا ۱/۰۲ باشد، اعمال این ضریب ضروری بنظر نمی‌رسد.

در مواردی که نتایج آزمون با حداقل مقادیر مشخص شده کمتر از ۵ گرم بر مترمربع فاصله داشته باشد، بایستی فشار و درجه حرارت محیط با دقت بررسی شده و ضرایب اصلاح اعمال گردد.

چنانچه وضعیت آب و هوایی یا ارتفاع از سطح دریا، شرایط آزمون را تحت تاثیر قرار دهد، یک ضریب اصلاح ثابت بایستی در نظر گرفته شود. در ارتفاع زیاد، بهتر است که از یک بورت با ظرفیت بزرگتر از ۵۰ یا ۱۰۰ میلی لیتر استفاده گردد. جدول (۵-۲۲) لیست ضرایب تصحیح درجه حرارت و فشار را ارائه می نماید.

جدول ۵-۲۲: ضرایب اصلاح درجه حرارت و فشار

فشار اتمسفر (کیلو پاسکال)														درجه حرارت (°C)	
۱۰۶/۷	۱۰۴/۰	۱۰۱/۳	۹۸/۷	۹۶/۰	۹۳/۳	۹۰/۷	۸۸/۰	۸۵/۳	۸۲/۷	۸۰/۰	۷۷/۳	۷۴/۷	۷۲/۰		۶۹/۳
۱/۰۸۲	۱/۰۵۵	۱/۰۲۸	۱/۰۰۱	-/۹۷۴	-/۹۴۷	-/۹۲۰	-/۸۹۳	-/۸۶۶	-/۸۳۹	-/۸۱۱	-/۷۸۴	-/۷۵۸	-/۷۳۰	-/۷۰۳	۱۲
۱/۰۷۵	۱/۰۴۸	۱/۰۲۱	-/۹۹۴	-/۹۶۷	-/۹۴۰	-/۹۱۴	-/۸۸۶	-/۸۶۰	-/۸۳۳	-/۸۰۶	-/۷۷۹	-/۷۵۲	-/۷۲۵	-/۶۹۸	۱۴
۱/۰۶۸	۱/۰۴۰	۱/۰۱۴	-/۹۸۸	-/۹۶۰	-/۹۳۴	-/۹۰۸	-/۸۸۰	-/۸۵۴	-/۸۲۷	-/۸۰۰	-/۷۷۴	-/۷۴۷	-/۷۲۰	-/۶۹۴	۱۶
۱/۰۶۰	۱/۰۳۳	۱/۰۰۷	-/۹۸۱	-/۹۵۴	-/۹۲۷	-/۹۰۱	-/۸۷۴	-/۸۴۸	-/۸۲۲	-/۷۹۵	-/۷۶۸	-/۷۴۲	-/۷۱۵	-/۶۸۹	۱۸
۱/۰۵۳	۱/۰۲۶	۱/۰۰۰	-/۹۷۴	-/۹۴۷	-/۹۲۱	-/۸۹۵	-/۸۶۸	-/۸۴۲	-/۸۱۶	-/۷۸۹	-/۷۶۳	-/۷۳۷	-/۷۱۰	-/۶۸۴	۲۰
۱/۰۴۶	۱/۰۱۹	-/۹۹۳	-/۹۶۷	-/۹۴۰	-/۹۱۵	-/۸۸۹	-/۸۶۲	-/۸۳۶	-/۸۱۰	-/۷۸۳	-/۷۵۸	-/۷۳۲	-/۷۰۵	-/۶۷۹	۲۲
۱/۰۳۸	۱/۰۱۲	-/۹۸۶	-/۹۶۰	-/۹۳۴	-/۹۰۸	-/۸۸۲	-/۸۵۶	-/۸۳۰	-/۸۰۵	-/۷۷۸	-/۷۵۲	-/۷۲۷	-/۷۰۰	-/۶۷۴	۲۴
۱/۰۳۲	۱/۰۰۵	-/۹۸۰	-/۹۵۵	-/۹۲۸	-/۹۰۳	-/۸۷۷	-/۸۵۱	-/۸۲۵	-/۸۰۰	-/۷۷۳	-/۷۴۸	-/۷۲۲	-/۶۹۶	-/۶۷۰	۲۶
۱/۰۲۵	-/۹۹۸	-/۹۷۳	-/۹۴۷	-/۹۲۱	-/۸۹۶	-/۸۷۱	-/۸۴۵	-/۸۱۹	-/۷۹۴	-/۷۶۹	-/۷۴۲	-/۷۱۷	-/۶۹۱	-/۶۶۶	۲۸
۱/۰۱۸	-/۹۹۲	-/۹۶۷	-/۹۴۲	-/۹۱۶	-/۸۹۱	-/۸۶۵	-/۸۳۹	-/۸۱۴	-/۷۸۹	-/۷۶۳	-/۷۳۸	-/۷۱۳	-/۶۸۷	-/۶۶۱	۳۰
۸۰۰	۷۸۰	۷۶۰	۷۴۰	۷۲۰	۷۰۰	۶۸۰	۶۶۰	۶۴۰	۶۲۰	۶۰۰	۵۸۰	۵۶۰	۵۴۰	۵۲۰	
ارتفاع بارومتر (میلی متر جیوه)															

### ب - روش اندازه گیری وزن

در این روش یک قطعه از نمونه رشته فولادی با پوشش روی، بریده می شود و با دست کاملاً صاف شده و سپس با فرو بردن در یک حلال روغن زدای مناسب، کاملاً تمیز می گردد. سپس توسط یک دستمال نرم و تمیز کاملاً خشک شده و با دقت ۰/۰۱ گرم توزین می شود. جرم آن برحسب گرم نبایستی از ۴ برابر قطر آن برحسب میلیمتر کمتر باشد. جهت سهولت، خم نمودن قطعه بریده شده جهت لخت کردن بلامانع است. حلالهایی که در روش اندازه گیری حجم توسط گاز معرفی گردید، در اینجا نیز قابل استفاده است. قطعه بریده شده با غوطه ور شدن در حجم مناسب از حلالهای مذکور، از پوشش روی جدا می گردد. همان حلال متناوباً بدون اضافه کردن محلول کلراید آنتیموان مورد استفاده قرار می گیرد تا جاییکه زمان لخت شدن بمقدار قابل ملاحظه ای طولانی گردد. درجه حرارت محلول لخت کننده نبایستی در هیچ زمانی از ۴۰ درجه سانتیگراد بالاتر رود.

برای انجام یک آزمون، حجم مناسب محلول بمقدار ۱۰۰ میلی لیتر در یک ظرف استوانه ای شیشه ای با قطر ۵۰ میلیمتر و عمق ۱۵۰ میلیمتر مناسب است. تعداد قطعه های غوطه ور شونده در محلول در یک مرحله انجام آزمون نبایستی از ۳ قطعه برای هر ۱۰۰ میلی لیتر محلول فراتر رود.

برای هر رشته، بلافاصله پس از اینکه فعالیت شیمیایی شدید بر روی آن متوقف گردید، رشته بایستی از اسید جدا شده و توسط آب جاری کاملاً شسته و خشک گردد. قطر رشته بایستی با دقت  $0/01$  میلیمتر اندازه‌گیری شود. اینکار با میانگین‌گیری از دو اندازه‌گیری که با زاویه  $90^\circ$  درجه از یکدیگر انجام پذیرفته است، محاسبه می‌گردد. سپس قطعه لخت شده با دقت  $0/01$  گرم توزین می‌شود.

جرم پوشش در واحد سطح رشته لخت شده از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$dr = 1950 = \text{جرم پوشش برحسب گرم بر متر مربع از سطح رشته لخت شده} \quad (5-12)$$

که در آن  $d$  قطر رشته لخت شده برحسب میلیمتر و  $r$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد :

$$r = \frac{\text{جرم رشته لخت شده} - \text{جرم اولیه رشته}}{\text{جرم رشته لخت شده}} \quad (5-13)$$

#### - آزمون چسبندگی پوشش روی

یک قطعه بریده شده از هر نمونه رشته فولادی پوشش‌دار بایستی با نرخ کمتر یا مساوی با  $15$  دور در دقیقه بصورت مارپیچ، بمقدار حداقل  $8$  دور حول یک محور سیلندری پیچیده شود. قطر این سیلندر بایستی  $4$  برابر قطر رشته برای رشته‌های با قطر کوچکتر و مساوی با  $3/5$  میلیمتر و  $5$  برابر قطر رشته برای رشته‌های با قطر بزرگتر از  $3/5$  میلیمتر باشد. پس از انجام فرآیند فوق‌الذکر، پوشش روی بایستی با استحکام کافی به فولاد چسبیده باقی بماند و نبایستی ترک خورده یا توسط سائیدن انگشتان بر روی رشته، از آن جدا گردد.

#### - آزمون پیوستگی پوشش روی

یک قطعه از رشته پوشش‌دار بایستی با مشاهده چشمی مورد ارزیابی قرار گیرد تا اطمینان حاصل گردد که هیچ خلل یا عدم پیوستگی در پوشش موجود نباشد. پوشش روی بایستی هموار بوده و در طول رشته دارای ضخامت کافی باشد.

#### ۵-۱-۲-۷- اندازه‌گیری سطح مقطع هادی

ابتدا قطر هر رشته از هادی با استفاده از کولیس میکرومتر که بازوهای آن دارای سطوح مسطح می‌باشد، اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری بر روی دو نقطه در نزدیکی دو انتهای قطعه تحت آزمون و یک نقطه میانی قطعه انجام می‌گیرد. قطر  $d$  برحسب میلیمتر میانگین سه اندازه‌گیری قطر در سه نقطه فوق‌الذکر بوده که اندازه قطر در هر نقطه، از میانگین‌گیری مقادیر حداکثر و حداقل ناشی از چندین اندازه‌گیری در نقطه مذکور محاسبه می‌گردد.

سطح مقطع بخش آلومینیمی یک هادی رشته‌ای از مجموع سطح مقطع‌های رشته‌های آلومینیمی محاسبه می‌شود که سطح مقطع هر رشته، از روی قطر اندازه‌گیری شده به روش فوق‌الذکر تعیین خواهد شد.

این سطح مقطع نبایستی از  $\pm 2\%$  درصد در هیچ نمونه‌ای و بیش از  $\pm 1/5\%$  درصد برای میانگین هر چهار مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیتهایی که بصورت تصادفی انتخاب شده‌اند و حداقل دارای فواصل  $20$  سانتیمتری باشند، تجاوز نماید.

سطح مقطع هسته فولادی (در صورت نیاز) با مجموع سطح مقطع‌های رشته‌های مفتولی تشکیل‌دهنده هسته فولادی محاسبه می‌شود که سطح مقطع هر رشته، از روی قطر اندازه‌گیری شده به روش فوق‌الذکر تعیین خواهد شد.

## ۵-۱-۲-۸- اندازه گیری قطر نهایی هادی

قطر نهایی هادی بایستی در طول هادی و توسط یک کولیس با دقت  $0/01$  میلیمتر اندازه گیری شود. قطر بایستی با میانگین گیری از دو مقدار با دو رقم اعشار برحسب میلی متر تعیین گردد که این دو مقدار با زاویه  $90$  درجه برای هر نقطه از هادی اندازه گیری می شود.

قطر هادی بایستی از  $\pm 1$  درصد برای هادی هایی با قطر بزرگتر یا مساوی  $10$  میلیمتر و  $\pm 0/1$  میلیمتر برای هادی هایی با قطر کوچکتر از  $10$  میلیمتر تجاوز نماید.

## ۵-۱-۲-۹- اندازه گیری جرم گریس و جرم واحد طول هادی (چگالی خطی)

بمنظور کاهش ریسک خوردگی در محیطهای مختلف، از گریس جهت پوشش هادی ها استفاده می گردد. جرم پوشش گریس به روش زیر محاسبه می شود. با فرض اینکه گریس کاملاً حفره های بین رشته ها را پر می نماید، حجم گریس در هر لایه هادی از معادله زیر بدست می آید :

$$V_g = (D_e^2 - D_i^2) \frac{\pi}{4} - \frac{n\pi}{4} d^2 \quad (5-14)$$

که در آن :

$D_e$  : قطر بیرونی لایه

$D_i$  : قطر داخلی لایه

$d$  : قطر رشته ها در لایه

$n$  : تعداد رشته ها در لایه

$V_g$  : حجم گریس در لایه می باشد.

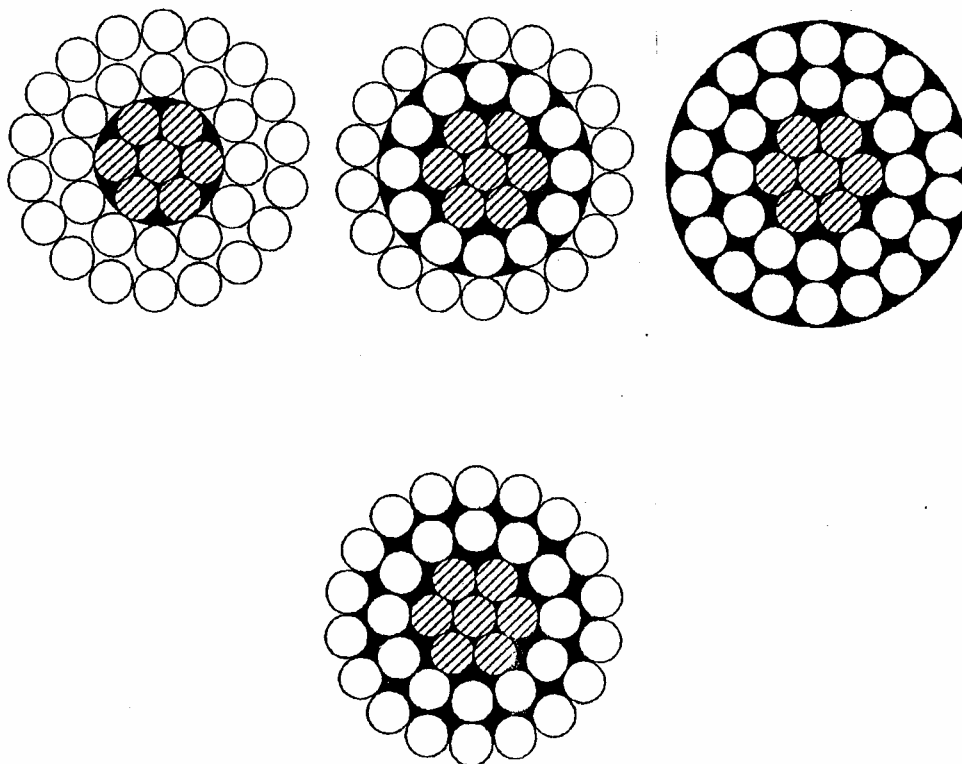
برای هادی هایی که چندین لایه دارند، جرم کل گریس با مجموع مقادیر لایه ها محاسبه می گردد. از آنجا که یک ارتباط هندسی بین تمام پارامترهای معادله فوق الذکر وجود دارد، می توان جرم کل گریس در هر هادی را از رابطه زیر بدست آورد :

$$M_g = K_a d_a^2 \quad (5-15)$$

که در آن  $d_a$  قطر رشته برحسب میلیمتر،  $M_g$  جرم گریس برحسب کیلوگرم بر کیلومتر و  $K_a$  فاکتوری است که بستگی به چگونگی بافت هادی، چگالی گریس و ضریب پر شدن (درصدی از مقدار تئوریک) دارد. در جدول (۵-۲۳) مقادیر  $K_a$  برای چهار حالت گریس کاری با چگالی گریس  $0/87$  گرم بر سانتیمتر مکعب و حداقل ضریب پر شدن  $0/7$  ارائه شده است. در حالت اول تنها هسته فولادی دارای پوشش گریس می باشد. در حالت دوم کل هادی بجز لایه بیرونی، در حالت سوم کل هادی شامل لایه بیرونی و در حالت چهارم کل هادی بجز سطوح بیرونی رشته ها در لایه آخر دارای پوشش گریس می باشند. حالت های مختلف گریس کاری در شکل (۵-۳) آورده شده است.

جرم گریس هادی را می توان از روی تفاضل بین جرم هادی با گریس و جرم آن پس از حذف کامل گریس محاسبه نمود. جرم گریس بایستی حداقل برابر با مقدار مینیمم مشخص شده در جداول باشد. جرم واحد طول هادی بدون گریس بایستی از مقدار نامی

ارائه شده در جداول بیش از  $\pm 0/2$  درصد تغییرات داشته باشد. تجهیزاتی که جهت انجام اندازه‌گیری چگالی خطی (جرم واحد طول) بکار می‌رود، بایستی دارای دقت  $\pm 0/1$  درصد باشد.



شکل ۳-۵: حالت‌های مختلف گریس کاری هادی

جدول ۵-۲۳: ضرائب  $K_a$  برای جرم گریس

$K_{a4}$	$K_{a3}$	$K_{a2}$	$K_{a1}$	بافته شده	
				فولاد	آلومینیوم
تمام هادی بجز سطوح بیرونی لایه آخر گریس دارد (کلاس ۴)	تمام هادی شامل لایه بیرونی گریس دارد (کلاس ۳)	تمام هادی بجز لایه بیرونی گریس دارد (کلاس ۲)	تنها هسته فولادی گریس دارد (کلاس ۱)		
۰/۴۶	۰/۹۶	—	—	۱	۶
۰/۴۶	۰/۹۶	—	—	—	۷
۱/۸۷	۲/۸۷	۰/۹۶	—	۱	۱۸
۲/۶۹	۳/۸۱	۱/۵۷	۰/۳۰	۷	۲۲
۳/۳۷	۴/۷۲	۲/۱۷	۰/۵۸	۷	۲۶
۱/۸۷	۲/۸۷	۰/۹۶	—	—	۱۹
۴/۲۱	۵/۷۴	۲/۸۷	۰/۹۶	۷	۳۰
۴/۲۱	۵/۷۴	۲/۸۷	—	—	۳۷
۷/۲۷	۹/۵۷	۵/۷۴	—	—	۶۱
۷/۲۷	۷/۶۰	۴/۲۵	۰/۴۲۰	۷	۴۵
۷/۳۳	۹/۵۷	۵/۷۴	۰/۹۶	۷	۵۴
۸/۹۷	۹/۶۴	۵/۸۲	۱/۰۳	۱۹	۵۴
۸/۹۷	۱۱/۹۰	۷/۶۰	۰/۴۳	۷	۷۲
۹/۴۲	۱۱/۹۴	۷/۶۳	۰/۴۶	۷	۷۲
۱۱/۱۱	۱۴/۳۵	۹/۵۷	۰/۹۶	۱۹	۸۴
۱۱/۱۸	۱۴/۴۳	۹/۶۴	۰/۹۶	۷	۸۴
۱۱/۱۱	۱۴/۳۵	۹/۵۷	—	—	۹۱

#### ۵-۱-۲-۱-۰-آزمون گسیختگی رشته‌های آلومینیومی و فولادی پس از تابیده شدن

در مواقع لزوم، جهت ارزیابی استقامت پارگی رشته‌هایی که از هادی بافته شده جدا شده‌اند، این آزمون انجام می‌گیرد. قطعه‌ای از رشته، با دقت از هادی نمونه جدا شده و کاملاً صاف می‌شود. دقت کافی در انجام کار بایستی مبذول گردد تا رشته کش نیاید. سطح مقطع رشته بایستی مطابق با آزمون مربوطه بدقت اندازه‌گیری شود. سپس رشته صاف شده در تجهیز آزمون کشش قرار داده شده و بار بصورت تدریجی به آن اعمال می‌گردد. نرخ جدا شدن گیره‌های تجهیز آزمون نبایستی از ۲۵ میلی‌متر در دقیقه کمتر و از ۱۰۰ میلی‌متر در دقیقه بیشتر باشد. نسبت بار در زمان پارگی به سطح مقطع رشته نبایستی از ۹۵ درصد تنش قابل تحمل قبل از بافته شدن کمتر باشد. ۵ درصد کاهش بخاطر فرآیند بافته شدن در نظر گرفته شده است.

### ۵-۱-۲-۱۱- آزمون وضعیت سطح هادی

سطح هادی بایستی با چشم غیرمسلح مورد بازدید قرار گیرد. استفاده لنزهای اصلاح‌کننده نرمال قابل قبول می‌باشد. سطح هادی بایستی عاری از هرگونه عیب قابل رؤیت مثل شکاف، برجستگی و ... باشد.

### ۵-۱-۲-۱۲- آزمون نسبت لایه و جهت لایه هادی

نسبت لایه هر لایه از هادی با محاسبه نسبت طول لایه اندازه‌گیری شده به قطر خارجی لایه مذکور بدست می‌آید. جهت لایه‌های همجوار در هادی بایستی نسبت بهم معکوس باشد. جهت لایه بیرونی بایستی به جهت راست باشد مگر اینکه در زمان خرید جهت دیگر مشخص شده باشد. نسبت لایه برای لایه‌های فولادی با پوشش روی بایستی مطابق زیر باشد:

♦ نسبت لایه برای لایه ۶ رشته‌ای از هسته‌های ۷ و ۱۹ رشته‌ای نبایستی کمتر از ۱۶ و بیشتر از ۲۶ باشد.

♦ نسبت لایه برای لایه ۱۲ رشته‌ای از هسته ۱۹ رشته‌ای نبایستی کمتر از ۱۴ و بیشتر از ۲۲ باشد.

نسبت لایه برای لایه‌های آلومینیمی در انواع هادی‌ها بایستی مطابق شاخص‌های زیر باشد:

♦ نسبت لایه برای لایه بیرونی رشته‌های آلومینیمی نبایستی کمتر از ۱۰ و بیشتر از ۱۴ باشد.

♦ نسبت لایه برای لایه داخلی رشته‌های آلومینیمی نبایستی کمتر از ۱۰ و بیشتر از ۱۶ باشد.

در یک هسته فولادی ۱۹ رشته‌ای، نسبت لایه ۱۲ رشته‌ای نبایستی بزرگتر از نسبت لایه ۶ رشته‌ای باشد. همچنین در یک هادی با چندین لایه آلومینیمی، نسبت لایه هر لایه آلومینیمی نبایستی کمتر از نسبت لایه آلومینیمی زیرین باشد.

کلیه رشته‌های فولادی باید به طور طبیعی در موقعیت خود در هسته فولادی باقی بمانند و در صورتی که هسته بریده شود، انتهای رشته‌ها می‌بایستی در موقعیت خود باقی بمانند و یا اینکه با دست به راحتی بتوان آنها را در وضعیت خود قرار داد و در این وضعیت باقی بمانند. این مسئله در مورد لایه‌های بیرونی رشته‌های آلومینیومی نیز صادق است. قبل از بافته شدن هادی، رشته‌های آلومینیومی و فولادی باید دارای دمای تقریباً یکنواختی باشند.







\_\_\_\_\_



## ۶-۱- موارد عمومی

پرسنل نگهداری و تعمیرات خط بایستی آموزشهای لازم در این باره را گذرانده باشند. بایستی تجهیزات مورد نیاز برای نگهداری و تعمیرات با توجه به ولتاژ و تعداد مدار در دسترس باشد.

## ۶-۲- بازدید، بازرسی، تعمیرات و آزمونها [۱۹]

به منظور نگهداری و تعمیرات بهینه از خطوط نیرو، یک دستورالعمل استاندارد تحت عنوان (دستورالعمل استاندارد انجام بازدیدها، بازرسی‌ها، آزمونها و انجام تعمیرات پیشگیرانه) برای خطوط نیرو توسط شرکت توانیر تهیه گردیده و به کلیه شرکتهای برق منطقه‌ای کشور جهت اجرا ابلاغ شده است.

### الف) بازدیدهای خطوط

- بازدیدهای دوره‌ای: بازدیدهایی است که بایستی هر سه ماه یکبار انجام شود.
- بازدیدهای ویژه: این بازدیدها به منظور بررسی چگونگی وضعیت نگهداری و تعمیرات خطوط انجام می‌شود.
- بازدیدهای اضطراری: این بازدیدها پس از وقوع پدیده‌ای طبیعی مانند بادهای شدید و طولانی، طوفان، سیل، بارش برف سنگین و نظایر آن به منظور کنترل قسمتهای آسیب پذیر خطوط با توجه به سوابق بهره‌برداری آنها انجام می‌گردد.
- بازدیدهای فوق‌العاده: این بازدیدها پس از کسب اطلاع از بروز خرابی یا حادثه در خط انجام می‌شود.

### ب) تعمیرات:

- تعمیرات دوره‌ای: اینگونه تعمیرات طبق برنامه از قبل تعیین شده و با انجام هماهنگیهای قبلی انجام می‌شوند. گروههای تعمیرات نسبت به انجام تعمیرات و رفع عیوب مشاهده شده در بازدیدها اقدام می‌نمایند.
  - تعمیرات اضطراری: به محض وقوع هر نوع خرابی منجر به خروج خط از سیستم، گروههای تعمیرات با برنامه‌ریزی و هماهنگیهای ضروری، سریعاً به محل عیب مراجعه و تعمیرات لازم را برای به مدار آوردن مجدد خط انجام می‌دهند.
  - تعمیرات پیشگیرانه: به محض مشاهده نقصی در خط که احتمال توسعه آن و اختلال در عملکرد خط محتمل باشد، گروه تعمیرات با انجام برنامه‌ریزیها و هماهنگیهای لازم نسبت به رفع نقص مشاهده شده اقدام می‌نمایند.
- در صورت نیاز به تعمیر، چگونگی انجام تعمیرات در فرم کنترل تعمیرات هادی‌ها، سیم‌های محافظ و ملحقات آنها مطابق جدول (۶-۱) ثبت می‌گردد.

جدول ۶-۱: فرم کنترل تعمیرات هادی‌ها، سیم‌های محافظ و ملحقات آن‌ها

نام شرکت						
نام خط:..... ولتاژ:..... شماره دیسپاچینگ:..... شماره دکل:.....						
شرح کار	تعمیر کامل	تعمیر ناقص	کیفیت کار	کارهای انجام شده	مدت و نفرساعت	روش انجام کار تعمیر یا تعویض
کشش و فلش						
پارگی رشته‌ها						
بادکردگی						
خوردگی و فرسایش						
آچارکشی اتصالات جمپرها						
خرابی تعمیرها						
خرابی فضاها						
خرابی آرموررادی						
افست غیرمجاز						
کنترل ترموویژن						
اتصالات						
تاب هادی‌های باندل						
گوی اخطاردهنده						
هزینه عملیات اجرائی:	ساعت خاموشی خط برای تعمیرات:					
هزینه اقلام دیگر:	بار متوسط عبوری از خط قبل از خاموشی:					
کنترل کننده	سمت:	تاریخ:	امضاء:			

## ج) بازرسی :

منظور از بازرسی، بازدید دقیق کلیه اجزاء تشکیل دهنده خط از نزدیک است که به منظور یافتن عیوب احتمالی انجام می‌گیرد. دوره‌های بازرسی باتوجه به شرایط کاری سوابق عملکرد و طول مدت بهره‌برداری (عمر سپری شده خط) تعیین می‌گردد. بازرسی هادی فاز و سیم‌های محافظ و ملحقات آن‌ها برای خطوط ۶۳، ۱۳۲، ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت باید طبق جدول (۶-۲) انجام شود.

جدول ۶-۲: نوبت بازرسی هادی‌ها و سیم‌های محافظ

نوبت بازرسی	طول عمر بهره‌برداری	تجهیزات مورد بازرسی	ردیف ولتاژ به کیلوولت
۲ سال یک بار	۱۰ تا ۲۰ سال	هادی‌های فاز و ملحقات	۴۰۰
			۲۳۰
هر سال یک بار	۲۰ تا ۳۰ سال	سیم‌های محافظ و ملحقات	۱۳۲
۳ سال یک بار	۱۰ تا ۲۰ سال	هادی‌های فاز و ملحقات	۶۳
			سیم‌های محافظ و ملحقات
۲ سال یک بار	۲۰ تا ۳۰ سال	سیم‌های محافظ و ملحقات	

موارد بازرسی برای هادی‌ها فرسودگی، خوردگی و پارگی رشته‌ها و برای ملحقات آن‌ها لقی پیچ‌های اتصالات نگهدارنده، شکستگی یا ترک در کلمپ‌ها آویزی و کششی (انتهایی)، خرابی یا شکستگی دمپرها و فضاها و یا لقی اتصالات و نظایر آن و تغییرات غیر مجاز فلش و کشش می‌باشد. نتایج بازرسی باید در بخشی از جدول نتایج بازرسی خطوط مطابق جدول (۶-۳) درج شود.

جدول ۶-۳: نتیجه بازرسی هادی‌ها فاز و سیم‌های محافظ

نتایج بازرسی								تجهیز مورد بازرسی
دمپر	آرمورراد	کلمپ	فضاساز	فلش	سائیدگی	خوردگی	فرسودگی	هادی‌ها فاز، ملحقات و اتصالات
گویی	آرمورراد	کلمپ	فضاساز	فلش	سائیدگی	خوردگی	فرسودگی	سیم‌های محافظ، ملحقات و اتصالات

**(د) آزمونها :**

به منظور حصول اطمینان از کیفیت و کارایی تجهیزات بکار رفته در خطوط نیرو لازم است طبق برنامه زمانی مشخص، آزمونهای لازم انجام می‌پذیرد که انجام تعدادی از آنها در محل و بدون برداشتن قطعه‌ای از خط امکان پذیر و بعضی دیگر با نمونه‌برداری‌های لازم و در آزمایشگاه انجام می‌گیرد و براساس نتایج حاصله اقدامات تعمیراتی، باسازی یا تغییرات لازم انجام می‌گیرد. علاوه بر بازدید، بازرسی و آزمون و تعمیرات، هرگونه اقدام دیگری را که برای افزایش کارایی و طول عمر مفید خطوط مقتضی باشد بایستی انجام گیرد.

باید توجه داشت که نباید در دوران بهره‌برداری جریان غیر مجاز از خطوط عبور داده‌شود و در صورت اضطراری نباید مقدار جریان و زمان عبور آن از هادی به اندازه‌ای باشد که موجب افزایش غیر مجاز حرارت هادی گردد. در طول عمر مفید پیش بینی شده برای



## منابع و مراجع

- [1] IEC 61089, "Round Wire Concentric Lay Overhead Electrical Stranded Conductors", First Edition 1991-06.
- [2] IEC 60889, "Hard-Drawn Aluminum Wire For Overhead Line Conductors", First Edition 1987-00-00.
- [3] IEC 60888, "Zinc-Coated Steel Wires For Stranded Conductors", First Edition 1987-00-00.
- [4] IEC 60104, "Aluminum-Magnesium-Silicon Alloy Wire For Overhead Line Conductors", Second Edition 1987-12.
- [5] ISO 6892, "Metallic Materials-Tensile Testing at Ambient Temperature", Second Edition 1998-03-01.
- [6] ISO 7802, "Metallic Materials-Wire-Wrapping Test", First Edition Replaces ISO R145, 1983-00-00.
- [7] IEC 60468, "Method of Measurement of Resistivity of Metallic Materials", First Edition , 1974-11.
- [8] IEEE 524, "IEEE Guide to the installation of overhead transmission line conductors" 1992.

[۹] استاندارد هادی‌های خطوط انتقال نیرو، مهندسين مشاور نیرو، ۱۳۷۷

[۱۰] بررسی اقتصادی خطوط انتقال ۶۳ الی ۴۰۰ کیلوولت با استفاده از هادی‌های استاندارد، مهندسين مشاور نیرو، شهریور ۱۳۸۱.

[۱۱] فاز صفر تهیه نرم افزار طراحی خطوط انتقال نیرو، پژوهشگاه نیرو، فروردین ۱۳۸۰

[۱۲] یونگ هواسونگ، آلن، تی، جانز، سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر (FACTS) AC، ۱۳۷۹.

[13] Transmission line reference book, 345 kv and above, epri, 1982

[۱۴] آئین نامه و استاندارد انتخاب هادی‌های خطوط انتقال نیرو، شرکت سهامی خدمات مهندسی برق (مشانیر)، اسفند ۱۳۷۵

[۱۵] تجدیدنظر هادی‌های استاندارد ایران (پایان نامه کارشناسی)، روح‌الله نوری‌نژاد، عبدالرضا فتوحی، اردیبهشت ۱۳۷۱.

[۱۶] طراحی خطوط انتقال نیرو، علیمحمد رنجبر، ۱۳۶۴

[۱۷] دیدگاه‌های مهندسی در طراحی خطوط انتقال انرژی، محسن پور رفیع عربانی، پرویز اسلام‌زاده، ۱۳۷۷

[۱۸] طراحی الکتریکی خطوط انتقال نیرو، قدرت الله حیدری، ۱۳۷۹

[۱۹] استاندارد برنامه‌های بازدید، بازرسی، آزمایش و تعمیرات پیشگیرانه، توانیر





## 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 -  
های فوط انتقال نیرو (جلد دوم)»  
مشمول بر شش فصل می باشد. مطالب مورد  
بمٹ شامل کلیات و تعاریف انواع های  
فوط انتقال نیرو، تنوع زدایی از های  
فوط، طرامی و انتخاب های، الزامات و  
آزمونها، بازرسی ها و تعمیرات در دوره  
بهره برداری می باشد.

