



• بہمن ۹۴

بہرآور-دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام



## • فصل ششم

### • طراحی هادی های خطوط انتقال

### • (Conductors)

#### • ۱- کلیات:

- به دلیل افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، خطوط انتقال نیرو دائماً در حال گسترش هستند. زیرا تبادل اصلی و اساسی انرژی در شبکه های سراسری توسط خطوط انتقال انرژی با ظرفیت بالا صورت می گیرد.
- بدون تردید هادی ها مهمترین اجزاء هر شبکه انتقال انرژی محسوب شده و مسیر جریان از طریق آنها برقرار می گردد. تمام تمهیدات نیز در طراحی یک خط فشار قوی صرفاً به منظور انتقال مناسب و مطمئن انرژی الکتریکی از طریق هادی ها صورت می گیرد.



## • ۲- جنس هادی های خطوط انتقال:

- در سال های اولیه، هادی های خطوط انتقال فشار قوی از جنس مس انتخاب می شد و بعدها آلومینیوم نیز برای این کار مورد استفاده قرار گرفت. به علت وزن سبک تر و قیمت کمتر، امروزه دیگر هادی های آلومینیومی کاملاً جایگزین هادی های مسی شده و این جایگزینی نتایج رضایت بخشی نیز به دنبال داشته است.
- در جدول زیر خواص مربوط به دو نوع هادی فوق جهت مقایسه ارائه شده است:



آلومینیوم	مس	موضوع
7/2	9/8	جرم مخصوص ( $\text{Kg} / \text{dm}^3$ )
0303/0	0178/0	مقاومت مخصوص ( $\Omega.\text{mm}^2 / \text{m}$ )
33	56	قابلیت هدایت ( $\text{s.m} / \text{mm}^2$ )
10-7	24-21	استحکام کشش ( $\text{kp} / \text{mm}^2$ )
658	1084	درجه حرارت ذوب ( $^{\circ}\text{C}$ )
023/0	017/1	ضریب انبساط طولی ( $\text{mm} / \text{m.grd}$ )
6/0	1	نسبت هدایت ها برای سطح مقطع مساوی
66/1	1	نسبت سطح مقاطع با مقاومت مساوی
29/1	1	نسبت قطر ها با مقاومت مساوی
1	3/3	نسبت وزن ها برای سطح مقطع مساوی
1	2	نسبت وزن ها با مقاومت مساوی

جدول شماره (1)



• ۳- انواع هادی های خطوط انتقال نیرو:

• هادی های خطوط انتقال نیرو از لحاظ نوع، جنس و کاربرد انواع مختلفی دارند که مهمترین آنها را می توان به صورت زیر خلاصه نمود.

• ۳-۱- هادی تمام آلومینیومی (AAC):

• این هادی تماماً از جنس آلومینیوم (All Aluminium Conductor) و از انواع هادی های رشته ای بوده که دارای درجه خلوصی در حدود ۹۹/۵٪ و مقاومت مخصوص (  $\mu \Omega / \text{cm}$  ) ۸۲۸/۲ در دمای (°C) ۲۰ می باشد.

• همچنین مقاومت مکانیکی آن در حدود (Kg / mm<sup>2</sup>) ۱۶-۱۹ بوده و به علت دارا بودن مقاومت مکانیکی پایین بیشتر در خطوط با اسپن کوتاه استفاده می شود و بیشترین کاربرد آن در خطوط ۲۰ کیلووات است.



### • ۳-۲- هادی آلیاژ آلومینیوم، آملک - آدری

- این هادی دارای درجه خلوصی در حدود  $98/3\%$  بوده و تقریباً  $(75/0 - 65/0)\%$  از وزن آن را منیزیم تشکیل می دهد و بقیه آن یعنی حدود  $(6/0 - 5/0)\%$  از سیلیسیم می باشد. مقاومت مخصوص این هادی در شرایط طبیعی محیط در حدود  $15/3 (\mu \Omega / cm)$  بوده و مقاومت مکانیکی آن نیز بیشتر از نوع قبلی و در حدود  $33 (Kg / mm^2)$  می باشد. این هادی معمولاً در خطوط ۲۰ و ۶۳ کیلووات با اسپن های کوتاه ۱۵۰ تا ۲۰۰ مترو نیز در پست های انتقال به عنوان هادی با سبارها مورد استفاده قرار می گیرد.

### • ۳-۳- هادی آلومینیومی با مغزی فولادی (ACSR):

- قسمت خارجی هادی فوق از جنس آلومینیوم و قسمت مرکزی آن جهت افزایش استقامت مکانیکی از جنس فولاد می باشد و به همین علت ACSR نامیده شده اند. این نوع هادی ها، هم از نظر خواص الکتریکی و هم از لحاظ خواص مکانیکی بر سایر هادی ها برتری داشته و به طور گسترده ای در خطوط انتقال انرژی مورد استفاده قرار می گیرند.



### • ۳-۴. هادی آلومینیومی با مغزی آلیاژی (ACAR):

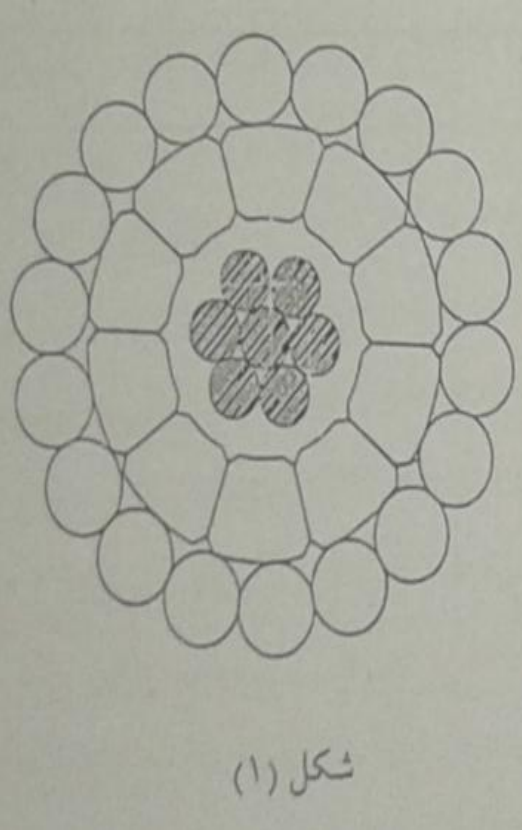
- کاملاً مشابه هادی های ACSR بوده ولی جهت افزایش مقاومت مکانیکی و همچنین کاهش میزان خوردگی هادی در مناطق آلوده در مرکز این هادی ها از آلیاژ مخصوصی به جای فولاد استفاده شده و به همین علت ACAR نامیده شده اند.



### ۳-۵. هادی های با تلفات کم (SLAC):

بررس ها و مطالعاتی که اخیراً صورت گرفته، نشان داده اند که با تغییر شکل رشته ها در هادی های نوع ACSR می توان ظرفیت انتقالی آن را به میزان قابل توجهی افزایش داد. این هادی ها طوری ساخته شده اند که نسبت به هادی ACSR هم قطر و هم وزن مشابه حدود ۱۱ الی ۱۳ درصد مقاومت الکتریکی کمتری دارند.

این هادی ها کاملاً مشابه هادی های ACSR بوده و تنها به خاطر دارا بودن ظرفیت انتقال بالاتر و کم بودن تلفات با نام SLAC (Small Loss ACSR) شناخته شده اند.







### • ۳-۶- هادی GTACSR:

• هادی ACSR با فواصل هوایی را اصطلاحاً GTACSR گویند که اخیراً جهت افزایش قدرت انتقالی در کشور ژاپن ساخته شده است که ضمن دارا بودن کلیه ویژگی های هادی ACSR دارای ظرفیت انتقالی بالاتر و مقاومت بیشتر در برابر خوردگی می باشد.

### • ۳-۷- هادی فولادی را روکش مس (Copper Clad Steel):

• این هادی دارای مقاومت مخصوصی حدود  $7 (\mu \Omega / \text{Cm})$  و مقاومت مکانیکی بین  $(70-100 \text{ Kg/mm}^2)$  می باشد. از این هادی می توان به عنوان سیم محافظ هوایی در خطوط استفاده نموده و یا آن را برای سیستم زمین پای برج ها به کار برد.

### • ۳-۸- هادی فولادی با روکش آلومینیوم (Aluminium Clad Steel):

• مشابه هادی فولادی با روکش مس می باشد با این تفاوت که به جای روکش مس بر روی رشته های فولادی از آلومینیوم استفاده شده که در نتیجه دارای خواص الکتریکی پایین تری نسبت به مورد قبلی بوده ولی در عوض دارای وزن و قیمت کمتری است.



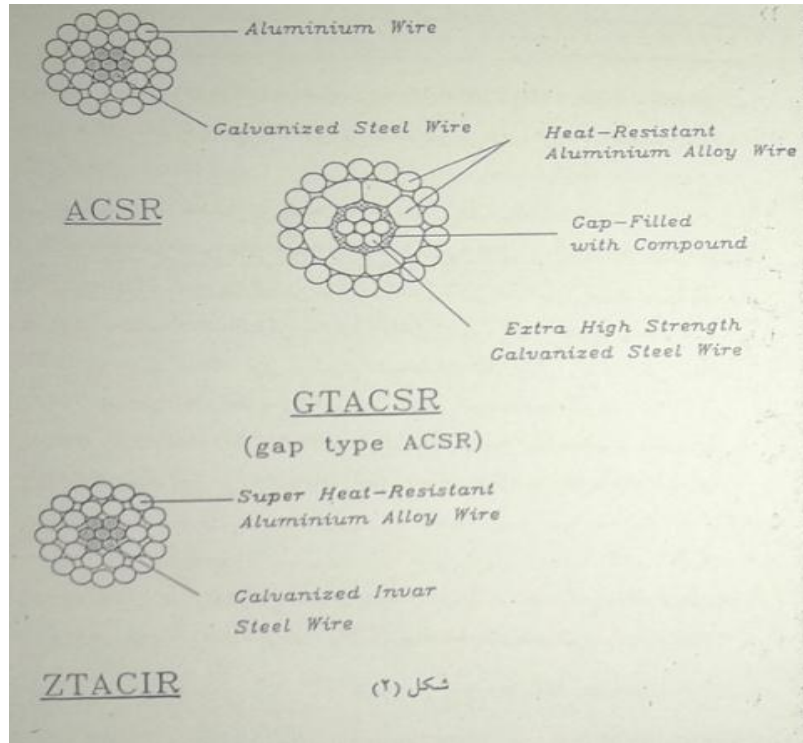
نوع فولاد مورد استفاده می تواند از نوع معمولی دارای مقاومت مکانیکی بین  $120-140 \text{ (Kg / mm}^2\text{)}$  و یا فولاد نوع سخت دارای مقاومت مکانیکی بین  $150-180 \text{ (Kg / mm}^2\text{)}$  باشد.

کاربرد این هادی ها در خطوط هوایی به عنوان سیم محافظ و همچنین برای زمین کردن برج ها می باشد.

شکل (۲) مقطع چند نمونه هادی مورد استفاده در خطوط

هوایی انتقال انرژی و از جمله متداول ترین آنها هادی

(ACSR) را نشان می دهد.





در یک هادی رشته ای اگر  $X$  تعداد لایه ها و  $N$  تعداد رشته ها در نظر گرفته شود، در این صورت اغلب رابطه زیر برقرار است:

$$N = 3X^2 - 3X + 1$$

البته در رابطه فوق تک رشته مرکز هادی به عنوان لایه شماره ۱ محسوب می شود.  
اگر  $d$  قطر هر رشته در نظر گرفته شود، قطر کلی هادی  $[D]$  از رابطه زیر به دست می آید:



$$D = (2X - 1) d$$

در خطوط انتقال انرژی با ولتاژهای بسیار زیاد (EHV (Extra High Voltage) از ترکیب هادی ها در کنار یکدیگر، جهت کاهش اثرات حاصل از پدیده کرونا استفاده می شود.

۴- روش های نامگذاری هادی های خطوط انتقال:

**الف] استاندارد انگلیسی:**

در استاندارد فوق از نوعی سیستم درجه بندی که در آن فقط سطح مقطع هادی [در اینجا آلومینیوم] بر حسب میل دایره ای [CM] بیان شده استفاده می شود به طوری که:



$$\text{CM} = \text{Circular Mil} = \frac{1}{1973.5} \text{ mm}^2$$
$$\text{MCM} = 10^3 \text{ CM} \cong 0.5067 \text{ mm}^2$$

ب] استاندارد کانادایی:

در استاندارد کانادایی، سطح مقطع فولاد، سطح مقطع آلومینیوم و همچنین سطح مقطع کل بر حسب  $(\text{mm}^2)$  بیان می شود.

ج] استاندارد فرانسوی:

در استاندارد فرانسوی فقط سطح مقطع کل و بر حسب میلیمتر مربع  $(\text{mm}^2)$  بیان می شود.

د] استاندارد آلمانی:

در استاندارد آلمانی (DIN)، هادی ها توسط نسبت سطح مقطع آلومینیوم به سطح مقطع فولاد بیان می شوند.



## هم استاندارد آمریکایی:

در استاندارد آمریکا از اسامی حیوانات مختلف برای نامگذاری هادی های خطوط انتقال نیرو استفاده شده است. در ایران نیز هادی های خطوط انتقال از نوع رشته ای بوده و برای نامگذاری آنها از استاندارد آمریکایی استفاده می شود.

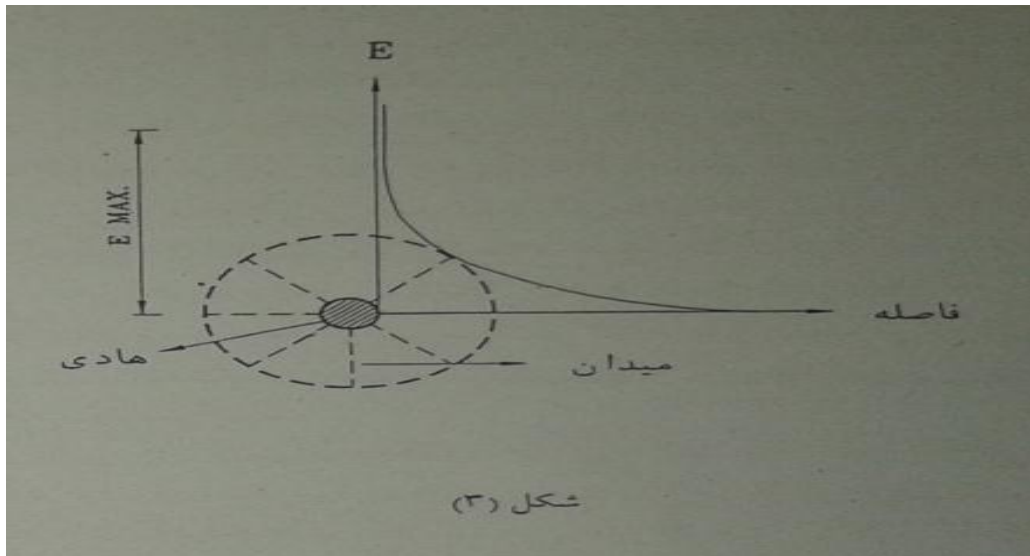


- ۵- پدیده کرونا در خطوط انتقال:
- در خطوط انتقال انرژی الکتریکی، اغلب مقطع مناسب هادی ها با توجه به درجه حرارت مجاز هادی و دانسیته جریان مجاز هادی بر حسب آمپر بر میلیمتر مربع ( $A/mm^2$ ) انتخاب می گردد.
- دانسیته جریان هادی به گونه ای انتخاب می شود تا افت انرژی با افت حرارتی از حدود مجاز و استاندارد فراتر نرفته و با این عمل حداقل مقطع هادی انتخاب می گردد. به همین سبب، دانسیته مجاز جریان با توجه به افت حرارتی مجاز را دانسیته اقتصادی جریان گویند.
- ظهور شدت میدان الکتریکی قابل ملاحظه در سطح هادی، نیروی وارد بر الکترون ها را افزایش داده و از انرژی ارتباط آنان با مولکول ها و اتم های هادی می کاهد.



افزایش بیشتر شدت میدان موجب جدا گشتن الکترون ها از اتم ها و مولکول های خود گردیده و آنان را از سطح هادی خارج نموده و تحت تأثیر میدان الکتریکی به فضای پیرامون هادی وارد می سازند.

شدت میدان الکتریکی در فضای اطراف هادی، متناسب با فاصله از سطح هادی کاهش می یابد. شکل [۳] این مطلب را به خوبی نشان می دهد.







- با افزایش ولتاژ (بدون اینکه تغییری در ابعاد و اندازه های هادی داده باشیم) بر شدت میدان الکتریکی ماکزیمم افزوده شده، فاصله یونیزاسیون پیرامون هادی تا شعاع بیشتری گسترش می یابد. این مرحله از بروز پدیده کرونا که تنها به صورت افت جریان و برقراری جریان جزئی از هادی به فضای یونیزه پیرامون آن ظاهر گردیده، محدود به جریان های تخلیه شعاعی بوده و به نام مرحله «پدیده کرونا با تخلیه جزئی جریان» موسوم است.

- این مرحله که با صدایی مخصوص شبیه صدای جیرجیر (ناشی از جابجایی الکترون ها از هادی به فضای اطراف آن و بالعکس) همراه می باشد غیر قابل اجتناب بوده و در کلیه خطوط انتقال انرژی با ولتاژ  $U_n \geq 230$  کیلو ولت مشاهده می گردد. با این همه شدت میدان الکتریکی ظاهر شده به روش های گوناگون قابل کنترل می باشد.



- با ازدیاد شدت میدان و در حدود مشخصی از آن، سرعت خروج الکترون ها فزونی یافته موجب ظهور هاله ای نورانی در حول هادی می گردد. هاله نورانی در حول هادی به صورت یکنواخت تشکیل نشده و به علت ناصافی سطح هادی و وجود لایه های گرد و غبار و غیره، در برخی فواصل و نقاط به طور قابل ملاحظه شدت یافته، در برخی دیگر تقلیل می یابد. هاله نورانی در هوای رطوبی و شرجی در سرتاسر طول هادی گسترش یافته و به طور یکنواخت ظاهر می گردد. هاله نورانی در شب قابل مشاهده بوده و به ابرکرونا موسوم است.
- شدت میدان مربوط به این مرحله به عنوان شدت میدان بحرانی یا Critical موسوم بوده و با  $E_c$  نشان می دهند.



در این مرحله افت جریان ناشی از پدیده کرونا به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته و از افت حرارتی حاصل از مقاومت اهمی فراتر می رود. تحت این شرایط، در حالی که افت حرارتی حاصل از مقاومت اهمی با انتخاب دانسیته مناسب جریان قابل قبول می باشد، افت ناشی از پدیده کرونا انتقال انرژی را با راندمان نامناسب و غیر قابل قبول همراه می سازد.

به همین علت، همواره شدت میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ اسمی هر فاز  $[U_{ph}]$  کمتر یا برابر با شدت میدان بحرانی  $[E_c]$  انتخاب می گردد. شدت میدان بحرانی یا شدت میدان کرونا بستگی به ابعاد و اندازه هادی ها داشته، برای هر هادی با ابعاد و اندازه مشخص ثابت می باشد. بنابراین شدت میدان حاصل از ولتاژ فاز  $[U_{ph}]$  که با  $E_{ph}$  نشان می دهند را همواره از شدت میدان کرونای هادی  $E_k$  کمتر می گیرند.

$$E_{ph} \leq E_c = E_k$$

یعنی:



در صورت نزدیک بودن شدت میدان ولتاژ فازی خطر ( $E_{ph}$ ) به شدت میدان بحرانی آن ( $E_k$ ) پدیده کرونا تا حدود نزدیک به ظهور هاله ای نورانی روی داده و بهره برداری خط با حداکثر افت کرونا همراه خواهد بود. این حالت با  $E_{ph} \approx E_k$  و یا نسبت  $(E_{ph} / E_k) \approx 1$  نشان داده می شود. به همین علت حداکثر شدت میدان قابل قبول در هادی تعریف شده و آن را با  $E_{acc}$  نشان داده و در حدود ۵% کمتر از شدت میدان شروع پدیده کرونا ( $E_k$ ) در نظر می گیرند، یعنی:

$$E_{acc} \approx 95\% E_k$$



هنگامی که شدت میدان بحرانی  $E_k$  نسبت به شدت میدان اسمی خط  $E_{ph}$  اختلاف قابل

ملاحظه ای داشته باشد،  $[ E_{ph} / E_k \neq 1 ]$  افت حاصل از کرونا حداقل بوده و با

افزایش شدت میدان  $E_k$  از افت کرونا همچنان کاسته می گردد. به طور معمول نسبت

زیر را بین شدت میدان های فوق در نظر می گیرند:

$$(E_{ph} / E_k) \approx (0.7 - 0.9)$$



از آنجایی که ولتاژ با شدت میدان متناسب است می توان نوشت:

$$kU \sim kE \quad , \quad phU \sim phE$$

بنابراین می توان در تمام روابط قبلی به جای نسبت شدت میدان ها از نسبت ولتاژ اسمی خط به ولتاژ حد کرونا به صورت زیر استفاده نمود:

$$\frac{E_{ph}}{E_k} = \frac{U_{ph}}{U_k}$$



- به طوری که خواهیم دید اقتصادی ترین راه جهت افزایش شدت میدان بحرانی هادی ( $E_k$ ) در خطوط انتقال انرژی با ولتاژ بالا، افزایش شعاع هادی ها از طریق دسته ای نمودن آن به صورت هادی های باندل می باشد.
- نکته قابل توجه دیگر تلفات ناشی از کروناست. رابطه تجربی پترسون (که بعداً خواهد آمد) تلفات کرونا در هوای خوب را به دست می دهد. در صورتی که در شرایط جوی دیگر مقدار تلفات ناشی از کرونا به صورت زیر افزایش می یابد:
- تلفات کرونا در هوای خنک و سرد:  $5/2$  برابر تلفات در هوای خوب
- تلفات کرونا در هوای بارانی:  $8/10$  برابر تلفات در هوای خوب
- تلفات کرونا در هوای یخبندان:  $29$  برابر تلفات در هوای خوب
- اعداد فوق نشان می دهند که شرایط جوی تا چه حد بر افزایش تلفات ناشی از کرونا تأثیر می گذارد.



- ۶- هادی های گروهی (باندل):
- جهت انتقال توان های زیاد به مسافتات طولانی از طریق خطوط هوایی انتقال انرژی و توسط سیستم های سه فاز، استفاده از ولتاژهای بالا (H.V) و نیز ولتاژهای فوق بالا (E.H.V) اجتناب ناپذیر می باشد.
- با افزایش ولتاژ هادی ها از مقداری مشخص پدیده ای که قبلاً ذکر شد موسوم به پدیده کرونا ( Corona Phenomenon) ظاهر شده و عوامل نامطلوبی به همراه دارد.
- اصلی ترین نکات منفی پدیده کرونا را می توان ب صورت زیر برشمرد.
- ۱- ایجاد تلفات انرژی در سیستم انتقال.
- ۲- تولید سر و صدا.
- ۳- تداخل در سیستم های مخابراتی.
- البته هرچه شرایط جوی بدتر شود، تلفات حاصل از پدیده کرونا نیز به مراتب بالاتر خواهد رفت. بررسی ها و مطالعات صورت گرفته نشان داده اند که با افزایش تعداد هادی ها در هر فاز ضمن بالاتر بردن ظرفیت انتقال می توان تلفات حاصل از کرونا را به طور قابل ملاحظه ای کاهش داد.





• به طور کلی عوامل زیر در کاهش اثرات ناشی از پدیده کرونا مؤثرند.

• ۱- تعداد هادی های تشکیل دهنده بانل در هر فاز.

• ۲- فاصله بین هادی های تشکیل دهنده بانل در هر فاز.

• ۳- فواصل فازهای مختلف از یکدیگر.

• اکنون دیگر استفاده از یک هادی در هر فاز برای خطوط با ولتاژ سمی بیش از ۳۰۰ کیلووات عملاً امکان پذیر نبوده و یا حداقل این کار از نظر اقتصادی توجیه پذیر نمی باشد.

• خطوط ۲۳۰ کیلووات به طور معمول محدود به یک هادی در هر فاز می باشند و در صورت افزایش جریان اسمی خط، از ۲ یا ۳ یا تعداد بیشتری هادی در هر فاز استفاده می شود.

• در سیستم بانل مقدار GMR (شعاع متوسط هندسی) افزایش می یابد و هرچه تعداد هادی های بانل بیشتر شود، GMR نیز بیشتر شده و در نتیجه اندوکتانس به طور قابل ملاحظه ای کاهش خواهد یافت و افزایش ظرفیت و توان خط انتقال را به دنبال خواهد داشت.



- همان طور که اشاره شد، شروع پدیده کرونا، ناشی از افزایش قابل ملاحظه شدت میدان الکتریکی در سطح هادی می باشد. شدت میدان الکتریکی در سطح هادی نیز بستگی به شعاع و نوع هادی خواهد داشت. البته شدت میدان الکتریکی قابل قبول در سطح هادی به ارتفاع نصب آن از زمین بستگی دارد.
- هنگامی که از یک هادی در هر فاز استفاده می شود، شدت میدان ظاهر شده در کلیه نقاط سطح خارجی هادی یکنواخت بوده و پدیده کرونا ظاهر می گردد. در صورت استفاده از هادی های متعدد در هر فاز، شدت میدان ظاهر شده در سطح خارجی هادی ها یکسان نبوده در قسمتی از سطح هادی کاهش یافته در قسمت دیگر آن فزونی می یابد. عدم برابری شدت میدان در سطح هادی های فرعی موجب کاهش اثرات سوء ناشی از پدیده کرونا می گردد.



• در خطوط با ولتاژ اسمی کمتر از ۱۱۰ کیلووات حداکثر شدت میدان حاصل از ولتاژ اسمی به طور قابل ملاحظه ای کمتر از شدت میدان شروع پدیده کرونا می باشد. یعنی:

$$U_{ph} \ll U_k$$

• بنابراین شرایط بروز پدیده کرونا فراهم نخواهد آمد و لذا استفاده از یک هادی در هر فاز امکان پذیر خواهد بود.

• در خطوط ۲۳۰ کیلووات و در صورت استفاده از هادی با مقطع آلومینیوم فولاد به نسبت (۷۲/۶۰۰) و یا بیشتر، استفاده از یک هادی در هر فاز مناسب بوده و اینکار منجر به افزایش شدت میدان از مقدار مجاز و استاندارد نخواهد گردید.

• در صورت استفاده از هادی با مقطع محدودتر، شدت میدان ظاهر شده در سطح هادی از شدت میدان مجاز تجاوز نموده، شرایط بروز پدیده کرونا با افت غیر قابل قبول آن فراهم می گردد. به همین علت از تعداد دو هادی در هر فاز استفاده می گردد. استفاده از سه هادی در ولتاژ فوق نیز ممکن است بنا به دلایل مختلف از جمله افزایش ظرفیت انتقال خط طراحی و مورد استفاده قرار گیرد.



- ۷- تأثیر ابعاد و اندازه دسته هادی ها در طرح خطوط انتقال:
- می توان با تغییر تعداد هادی های فرعی، شعاع آنان و سایر ابعاد و اندازه های دسته هادی ها، ولتاژ شروع پدیده کرونا  $U_k$  را تأمین ساخت. زیرا ولتاژ اسمی هر فاز ( $U_{ph}$ ) ثابت بوده و می توان نسبت  $U_{ph} / U_k$  که شدت بروز پدیده کرونا و افت ناشی از آن را معین می نماید، در حد قابل قبول نگهداشت.
- همواره سعی ما بر آنست که نسبت  $(U_{pk} / U_k) < 1$  را حفظ نماییم.
- در صورتی که  $U_k = U_{pk}$  باشد، پدیده کرونا در شرایط عادی تحت ولتاژ اسمی خط روی داده و با حداکثر افت کرونا همراه خواهد بود.
- انتخاب  $U_k$  آنچنان که افت کرونا معادل صفر گردد نیز مستلزم تأمین شدت میدان بالای  $U_k$  بوده و شعاع بالای هادی و یا تعداد قابل ملاحظه آنان را ایجاب می نماید.
- در این صورت دانسیته جریان مقدار اقتصادی را دارا نگهداشته، مشخصات آن غیر اقتصادی خواهد بود.



- مقدار مناسب همان طور که قبلاً گفته شد  $(U_{ph} / U_k) = (0.7 - 0.9)$  می باشد مقدار ایده آل نسبت فوق با توجه به مشخصات خط، جریان بار، دانسیته جریان و شرایط جوی منطقه احداث خط برآورد می گردد.
- انتخاب حد پایین نسبت فوق  $(U_{ph} / U_k) = 0.7$  مستلزم افزایش هادی های فرعی بوده، سرمایه گذاری خطوط را فزونی می بخشد. انتخاب حد بالای نسبت فوق  $(U_{ph} / U_k = 0.9)$  سرمایه گذاری خط را تقلیل داده ولی هزینه ناشی از افت کرونا را افزایش می دهد.
- با افزودن بر تعداد هادی های فرعی، سطح اختلالات رادیویی نیز تقلیل می یابد. اگرچه بروز پدیده در هر یک از هادی های فرعی از نظر تأثیر در اختلالات رادیویی و امواج فرکانس بالا قابل ملاحظه می باشد، با این همه هادی های فرعی به مانند پرده ای حفاظتی محسوب گردیده مانع از انتشار امواج با فرکانس بالا ناشی از کرونا می گردند.



۸- تئوری پیدایش هادی های باندل:

همان گونه که اشاره شد کاهش تلفات ناشی از کرونا مستلزم محدود ساختن حداکثر شدت میزان الکتریکی در سطح هادی ها می باشد. اگر هادی ها را به صورت استوانه فرض نماییم، شدت میدان الکتریکی ظاهر شده در سطح استوانه با بار  $q$  به شعاع آن  $(r_0)$  بستگی داشته و به صورت زیر نوشته می شود.

$$E = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_0}$$



شدت میدان فوق در سطح هادی های خط برای یک سیستم سه فاز تحت ولتاژ خطی  $[U_L]$  به صورت زیر نوشته می شود:

$$E = \frac{0.355 U_L}{r_0 \text{ Log } (D_{cr} / r_0)}$$

که در آن:

$E$ : شدت میدان (کیلوولت بر سانتی متر).

$r_0$ : شعاع هادی های فرعی (سانتی متر).

$U_L$ : ولتاژ خطی (کیلوولت).

$\epsilon_0$ : ثابت دی الکتریک هوا.



و  $D_{cr}$ : فاصله هندسی بین فازها می باشد که به صورت زیر بر حسب سانتی متر به دست می آید:

$$D_{cr} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$$

در این رابطه  $D_{12}$ ،  $D_{23}$  و  $D_{31}$  فاصله بین مراکز هادی ها می باشد.





- با توجه به روابط فوق، شدت میدان در سطح هادی ها به شعاع هادی و ولتاژ خط ( $U_L$ ) بستگی دارد. همزمان با افزایش ولتاژ اسمی، مقدار آن در سطح هادی فزونی می یابد و در ردیف ولتاژهای بالای ۲۳۰ کیلوولت از حد مجاز فراتر رفته و پدیده کرونا ظاهر می گردد.

- کمیات مؤثر در کنترل شدت میدان ( $E$ ) و کاهش آن را می توان به صورت زیر برشمرد:

- ۱- فاصله هندسی بین فازها ( $D_{cr}$ ):

- فاصله هندسی بین فازها با فاصله ایزولاسیون بین آنها مرتبط است و افزایش فاصله بین فازها از شدت بروز پدیده کرونا می کاهد. ولی از طرف دیگر این کار موجب کاهش ظرفیت خط و افزایش مقاومت مکانیکی و هزینه احداث خط خواهد گردید.

- در صورتی که جهت افزایش ظرفیت خط، همواره کاهش فاصله بین هادی ها در فازهای مختلف مدنظر ماست، روش فوق برای کاهش مقدار شدت میدان الکتریکی در سطح هادی مناسب نبوده و هرگز توصیه نمی گردد.



## • ۲- شعاع هادی ( $r_0$ ):

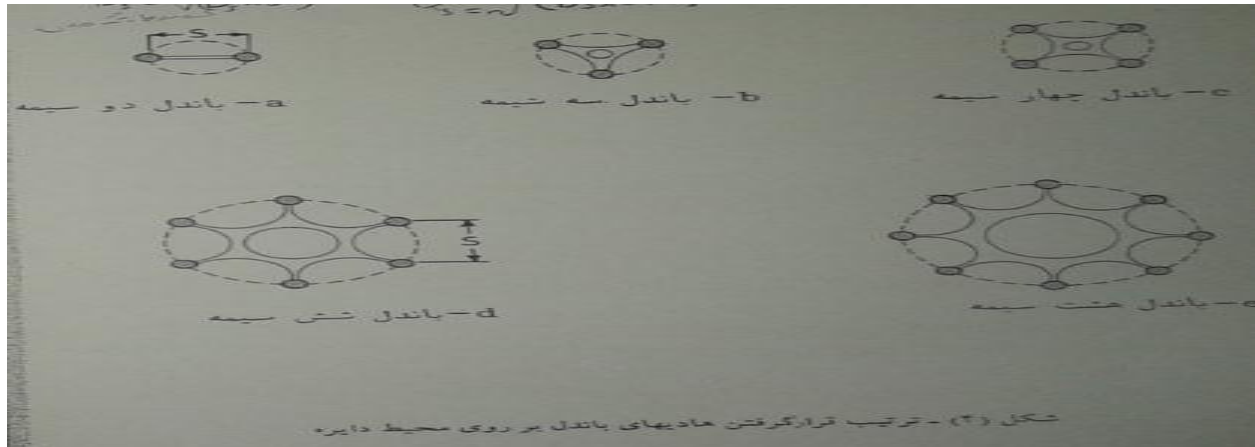
- طبق رابطه ارائه شده، شعاع هادی در میزان شدت میدان الکتریکی بسیار مؤثر است. به طوری که افزایش آن شدت میدان الکتریکی را به طور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد.
- افزایش شعاع هادی ها تا بیش از چند سانتیمتر خارج از حدود و اندازه هادی های معمول و استاندارد، با مسائل تکنیکی و مکانیکی فراوان همراه بوده و غیر ممکن می باشد.
- مشکلات ناشی از ساخت، حمل، نصب، وزن، مقاومت مکانیکی مورد نیاز برج ها، افزایش نیروی باد و تشکیل لایه های برف و یخ و غیره، استفاده از هادی های با قطر بالا را دشوار ساخته است.
- تنها راه ممکن جهت افزایش شعاع  $r_0$ ، پیش بینی هادی های متعدد در هر فاز می باشد. استفاده از هادی های متعدد با شعاع استاندارد در مجاورت یکدیگر، به مانند هادی فرعی با شعاع فرض  $R_c$  عمل می نماید.



در ایران حداکثر ولتاژ خطوط انتقال انرژی ۴۰۰ کیلووات بوده و تعداد هادی های فرعی مورد نیاز در هر فاز در ردیف ولتاژهای فوق بین [۲-۴] هادی در هر فاز می باشد.

در ردیف ولتاژهای بالاتر تا سطح ۷۵۰ کیلوولت از [۴-۵] هادی در هر فاز و در خطوط ۱۲۰۰ کیلوولت از حدود [۸-۱۰] هادی در هر فاز استفاده می شود.

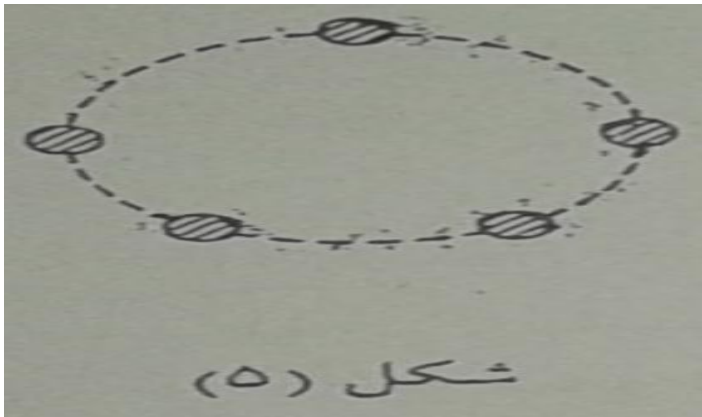
شکل [۴] نحوه قرار گرفتن هادی های فرعی در هر فاز و در محیط دایره به فواصل مساوی از یکدیگر را نشان می دهد.





موقعیت هادی های فرعی نسبت به یکدیگر در سرتاسر طول خط حائز اهمیت بوده و لازم است از جابجایی فازها تحت تأثیر نیروی باد غیره جلوگیری به عمل آید تا فاصله ثابت بین هادی های فرعی همواره حفظ گردد.

حفظ فاصله بین هادی های فرعی به طور ثابت، توسط جدا کننده ها [Spacers] صورت می گیرد. جدا کننده ها فلزی بوده و در فواصل مناسب از یکدیگر در طول خط نصب می گردند. نصب هادی های فرعی به صورت نامتقارن نیز می تواند صورت گیرد. مطالعات اخیر نشان داده که با نصب هادی های فرعی به صورت نامتقارن [مانند شکل ۵] می توان از بروز صدای ناشی از پدیده ای موسوم به Audible – Noise تا حد مناسبی کاست.



• بهمن ۹۴



- صدای ناشی از پدیده فوق در ردیف ولتاژهای بالا و خیلی بالا تا حد ناراحت کننده ای افزایش می یابد و از نظر زیست محیطی نیز می بایست از حدود مشخص فراتر رود.
- ۹- تأثیر دسته هادی های فرعی در مشخصات الکتریکی خطوط:
- در خطوط مجهز به دسته هادی های فرعی [باندل] مشخصات الکتریکی خط شامل اندوکتانس [L] و خاصیت خازنی [C] با استفاده از همان روابط مربوط به خطوط مجهز به یک هادی و با قرار دادن شعاع معادل  $r_c$  به جای  $r_0$  حاصل می گردد.



بین شعاع یک هادی  $[r_o]$  و شعاع فرضی هادی های باندد  $[r_c]$  رابطه زیر برقرار است.

$$r_c = \sqrt[n]{r_o \cdot n \left[ S / \left( 2 \sin \pi / n \right) \right]^{n-1}}$$

که در آن:

$r_c$  شعاع فرضی هادی های باندد  $[Cm]$

$N$ : تعداد هادی های باندد در هر فاز.

$S$ : فاصله بین مراکز هادی های باندد در هر فاز  $[Cm]$ .

و  $r_o$ : شعاع یک هادی  $[Cm]$  می باشد.



- با توجه به شعاع معادل  $r_c$  نتایج زیر حاصل می گردند:
- ۱- خاصیت اندوکتانسی خط مجهز به دسته هادی های فرعی، با افزایش شعاع معادل  $r_c$  و یا شعاع هادی های فرعی  $r_o$  تقلیل می یابد.
- ۲- با کاهش فاصله بین فازها اندوکتانس خط تقلیل می یابد.
- کاهش خاصیت القایی (L) در خطوط انتقال انرژی با ولتاژ بالا دارای اهمیت فراوانی است. این کار موجب تقلیل امپدانس موجی خط، تقلیل زاویه اختلاف فاز ولتاژها در دو انتهای خط، افزایش توان انتقالی خط و کاهش حجم تجهیزات متعادل کننده می گردد.
- با توجه به تأثیر ابعاد و اندازه دسته هادی ها در کاهش خاصیت القایی، انتخاب ابعاد و اندازه دسته هادی ها در مشخصات الکتریکی خط دارای اهمیت بسیاری است.
- تغییرات خاصیت خازنی خط (C) تحت تأثیر شعاع معادل  $r_c$  و فاصله بین فاز - فاز هادی ها، به عکس تغییرات خاصیت القایی (L) می باشد.



به همین علت هر گونه تغییر در ابعاد و اندازه دسته هادی ها به منظور کاهش خاصیت القایی [L] منجر به افزایش خاصیت خازنی [C] شده و تغییرات امپدانس موجی را طبق رابطه زیر:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

در یک جهت سبب می گردد و توان انتقالی خط، به دلیل کاهش بیشتر امپدانس موجی باز هم بالاتر خواهد رفت.

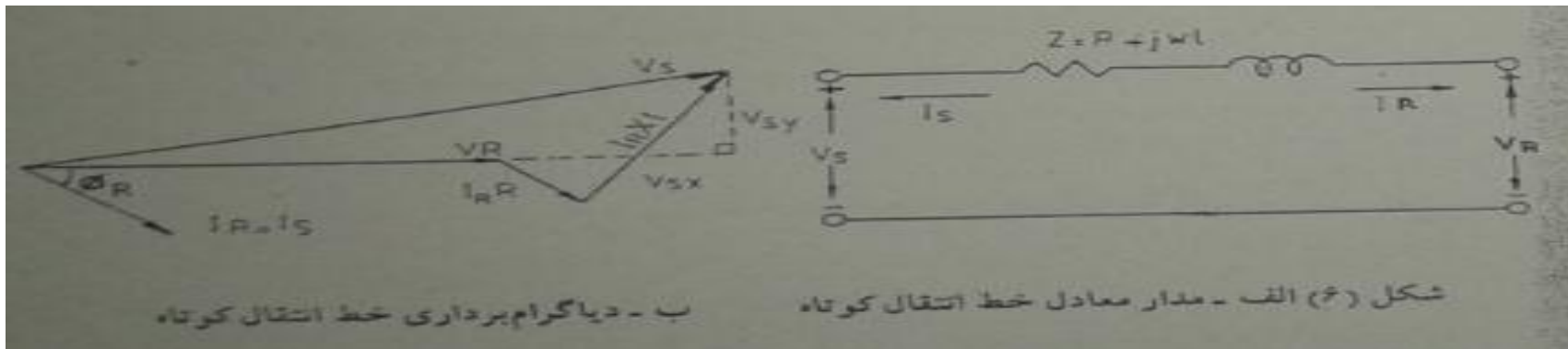




- ۱۰- مدل های خطوط انتقال انرژی:
- در این قسمت، قبل از آغاز مبحث «تعیین مقطع هادی های خطوط انتقال نیرو» به دلیل نیاز به مشخصه های الکتریکی خط در روابط آتی، لازم است ضمن آشنایی مختصر با انواع مدل های خطوط انتقال نیرو با مدار معادل هر یک از آنها نیز آشنا شویم.
- به طور کلی خطوط انتقال انرژی را از لحاظ طول خط به سه دسته زیر طبقه بندی می نمایند.
- ۱- خطوط انتقال کوتاه.
- ۲- خطوط انتقال متوسط.
- ۳- خطوط انتقال بلند.

## ۱-۱۰- خطوط انتقال کوتاه:

اگر طول خط کمتر از ۱۰۰ کیلومتر باشد، خط انتقال را کوتاه می نامند و می توان از ادمیتانس مربوط به کاپاسیتانس خط در فرکانس [Hz] ۵۰ صرف نظر نموده و تنها مقاومت اهمی و القائی سری خط را در نظر گرفت. جریان ورودی در ابتدای خط معادل جریان در انتهای خط می باشد و این جریان در تمامی قسمت های خط یکسان است. R و L را می توان به طور متمرکز در نظر گرفت. شکل [۶] مدار معادل و دیاگرام برداری خط کوتاه را برای یک فاز نشان می دهد.





با توجه به دیاگرام برداری فوق می توان نوشت:

$$V_s = [ ( V_R + I_R R \cos \varphi_R + I_R X_L \sin \varphi_R )^2 + ( I_R X_L \cos \varphi_R - I_R R \sin \varphi_R )^2 ]^{1/2}$$



چون  $I_R X_L$  و  $I_R R$  خیلی کمتر از  $V_R$  هستند، ولتاژ  $V_{SY}$  در مقایسه با ولتاژ بزرگ  $V_{SX}$  کوچک است لذا:

$$V_S \approx V_R + I_R R \cos \varphi_R + I_R X_L \sin \varphi_R$$



بنابراین تنظیم ولتاژ خط کوتاه به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta V = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100 = \frac{I_R R \cos \varphi_R + I_R X_L \sin \varphi_R}{V_R} \times 100$$



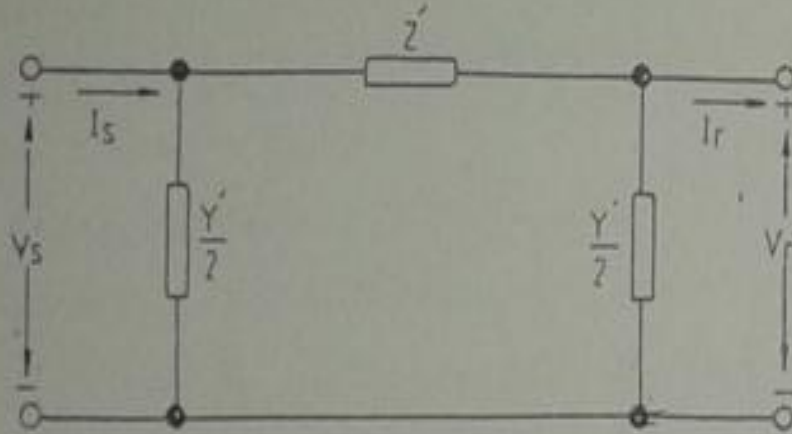
## • ۱۰-۲- خطوط انتقال متوسط و بلند:

- خطوط انتقال انرژی بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ کیلومتر را خطوط متوسط و خطوط بالای ۲۵۰ کیلومتر را خطوط انتقال بلند یا طولانی گویند.
- با افزایش طول و ولتاژ خط انتقال، جریان ناشی از ظرفیت خط نسبت به زمین قابل ملاحظه شده و اثر آن را باید در نظر گرفت. لذا در خطوط انتقال با طول متوسط ادمیتانس موازی در محاسبات وارد می شود. اگر اмпیدانس خط را به طور متمرکز در نظر بگیریم و ادمیتانس خط را به دو قسمت تقسیم کنیم و در ابتدا و انتهای خط قرار دهیم، مدار اسمی  $\pi$  به دست می آید.
- با این وجود مدار اسمی  $\pi$  نمی تواند جهت مشخص نمودن خط بلند مورد استفاده قرار گیرد: زیرا حالت گسترده بودن پارامترها را به طور یکنواخت در طول خط نمی توانند منظور نمایند. برای تعیین مدار معادل یک خط بلند، یک مدار  $\pi$  مشابه شکل زیر را در نظر می گیریم، با این تفاوت که به جای  $Z$  از  $Z'$  و به جای  $Y$  از  $Y'$  استفاده می نماییم.  $Z'$  و  $Y'$  به ترتیب اмпیدانس سری و ادمیتانس موازی خط انتقال بلند در مدار معادل  $\pi$  می باشند.



$$Z' = Z \frac{\sinh \gamma L}{\gamma L} = Z_c \sinh \gamma L$$

$$Y' / 2 = Y / 2 \frac{\tanh \gamma L}{\gamma L / 2} = \frac{1}{Z_c} \tanh \frac{\gamma L}{2}$$



شکل (۷) - مدار اسمی  $\pi$  خط انتقال

که در آن:

$L$ : طول خط

$\gamma = \sqrt{zy}$ : ثابت انتشار

و  $Z_c = \sqrt{z/y}$ : امپدانس مشخصه خط

می باشد.



در مدار معادل  $\pi$  خط انتقال داریم:

$$V_s = \left( \frac{ZY}{2} + 1 \right) V_r + Z I_r$$

$$I_s = \left( 1 + \frac{ZY}{4} \right) Y V_r + \left( \frac{ZY}{2} + 1 \right) I_r$$





اگر معادلات را به صورت کلی بنویسیم:

$$V_s = A V_r + B I_r$$

$$I_s = C V_r + D I_r$$

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1$$

$$B = Z \quad , \quad C = Y \left( 1 + \frac{ZY}{4} \right)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

• بهمن ۹۴

بهرآور-دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام



در شرایط بی باری با قرار دادن  $I_r = 0$  در رابطه فوق  $V_{r0} = \frac{V_s}{A}$  و در نتیجه رابطه درصد تنظیم ولتاژ برای خط انتقال به صورت زیر نوشته می شود.

$$\Delta V \% = \frac{\frac{1}{|A|} |V_s| - |V_r|}{|V_r|} \times 100$$

درصد تنظیم ولتاژ



در اینجا جهت آشنایی با چگونگی استفاده از روابط فوق مثالی حل می کنیم:

مثال: در یک خط انتقال  $230 \text{ [kV]}$  طول  $200 \text{ [Km]}$  راکتانس خط  $0.399/\text{Km} \text{ [}\Omega\text{]}$ ،

مقاومت آن  $0.132/\text{Km} \text{ [}\Omega\text{]}$  و ادمیتانس موازی خط  $2.84 \times 10^{-6} \text{ [}\Omega^{-1}\text{]}$  است (از

کندوکتانس صرف نظر شده است). بار انتهای خط قدرت  $150 \text{ [MW]}$  را در ولتاژ  $230 \text{ [kV]}$

و ضریب قدرت  $0.85$  پس فاز جذب می نماید.

ولتاژ ابتدای خط و درصد تنظیم ولتاژ را محاسبه کنید.

$$Z = (0.132 + j 0.399) \times 200 = 84 \angle 71.7^\circ \quad \Omega$$

$$Y = j 2.84 \times 10^{-6} \times 200 = j 5.68 \times 10^{-4} \quad \Omega^{-1}$$

$$V_r = \frac{230}{\sqrt{3}} \angle 0 = 132.8 \angle 0 \quad \text{kV}$$

$$| I_r | = \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 230 \times 0.85} = 443 \quad \text{A}$$



$$I_r = 443 \angle -\cos^{-1} 0.85 = 443 \angle -31.8^\circ \text{ A}$$

$$V_s = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_r + ZI_r = \left(1 + \frac{5.68 \times 10^{-4} \angle 90^\circ \times 84 \angle 71.7^\circ}{2}\right)$$

$$\times 132.8 \angle 0 + 84 \angle 71.7^\circ \times 443 \times 10^{-3} \angle -31.8^\circ = 160.23 \angle 8.92^\circ$$

• بهمن ۹۴

بهرآور-دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام



ولتاژ در ابتدای خط برابر است با:

$$|V_s| = 160.23 \sqrt{3} = 277.5 \text{ kV}$$

برای محاسبه درصد تنظیم ولتاژ، ابتدا ولتاژ انتهای خط را در بی باری محاسبه می کنیم:

• بهمن ۹۴

بهرآور-دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام



$$A = 1 + \frac{ZY}{2} = 0.977 \angle 0.44^\circ$$
$$\text{درصد تنظیم ولتاژ} = \frac{\frac{277.5}{0.977} - 230}{230} \times 100 = 23.4 \%$$

مطلوبی که ذکر آن لازم به نظر می رسد محاسبه قدرت طبیعی خط قبل از شروع محاسبات مربوط به خط می باشد

که ایده خوبی در مورد میزان قدرت منتقله به طراح می دهد.



قدرت طبیعی خط طبق تعریف عبارتست از قدرتی که خط منتقل خواهد کرد چنانچه هر فاز به مقاومتی برابر با امپدانس مشخصه خط ختم شود.

$$SIL = P_c = \frac{V^2}{Z_c} \quad , \quad Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

که در آن  $V$  ولتاژ برحسب  $kV$ ،  $Z$ ، امپدانس مشخصه خط برحسب اهم و  $P_c$  قدرت طبیعی خط برحسب  $MW$  می باشد. قدرت طبیعی خط انتقال از نقطه نظر افت ولتاژ و پایداری عامل مهمی است. هرگاه قدرت انتقالی یک خط به اندازه قدرت طبیعی انتخاب گردد، افت ولتاژ به حداقل ممکن نزول می نماید.



• ۱۱- تعیین مقطع هادی های خطوط انتقال نیرو:

• - مقدمه:

• یکی از گام های اساسی در آغاز طراحی هر خط انتقال انرژی انتخاب مقطع مناسب برای هادی می باشد. عوامل متعددی در تعیین مقطع هادی مؤثرند که مهمترین آنها عبارتند از:

• ۱- توان انتقالی.

• ۲- تلفات اهمی.

• ۳- جریان اتصال کوتاه.

• ۴- کرونا و تلفات ناشی از آن.

• ۵- عوامل اقتصادی.

• ۶- شرایط مکانیکی.





## • ۱-۱۱-۱- توان انتقالی:

• قدرت قابل انتقال توسط خطوط انتقال انرژی به عنوان ظرفیت انتقال یا توانایی خط موسوم است. ظرفیت خطوط انتقال انرژی با توجه به مشخصات الکتریکی و خصوصیات ساختمانی آنها تعیین می‌گردد. قدرت انتقالی خطوط، معادل ظرفیت اسمی آنها یا ظرفیت در نظر گرفته شده جهت طرح خط می‌باشد. قدرت انتقالی می‌تواند تا حدودی از ظرفیت اسمی خط تجاوز نماید. طرح خط و انتخاب قدرت اسمی با محدودیت‌هایی به شرح زیر برحسب ولتاژ اسمی همراه می‌باشد.

## • ۱-۱-۱۱- حد حرارتی:

• حد حرارتی خطوط انتقال انرژی محدودیت ناشی از افزایش جریان بار هادی‌ها را در پی افزایش درجه حرارت آنها مشخص می‌سازد. با افزایش تدریجی جریان بار هادی‌ها، افت انرژی حرارتی حاصل در مقاومت اهمی خط به صورت  $P = RI^2$  ظاهر گردیده، افزایش درجه حرارت هادی‌ها را نسبت به درجه حرارت محیط سبب می‌گردد.



- درجه حرارت مجاز و استاندارد هادی با انتخاب سطح مقطع مناسب و دانسیته اقتصادی جریان امکان پذیر می گردد. دانسیته قابل قبول حداکثر جریان برقرار شده در واحد سطح هادی، مربوط به درجه حرارت مجاز می باشد. هنگامی که دانسیته جریان از مقدار مجاز تجاوز نماید، درجه حرارت هادی از حدود استاندارد تجاوز خواهد نمود. در فصل سرما با توجه به تبادل حرارت هادی با محیط اطراف خود دانسیته جریان می تواند از مقدار مجاز بیشتر شود، به همین علت اضافه بار هادی بیش از مقدار اسمی در فصل سرما تا حدودی امکان پذیر می باشد.
- برای محاسبه حد ظرفیت حرارتی هادی، ابتدا شبکه را از لحاظ بار و نیازهای منطقه ای برنامه ریزی نموده و سپس برای مدت زمان برنامه ریزی شده با در نظر گرفتن رشد بار متناسب سالانه، مقدار بار و جریان انتقالی از هادی را به کمک روابط زیر محاسبه می نماییم:



که در آن:

$P_0$  (MW): بار برنامه ریزی شده فعلی.

$P$  (MW): بار انتقالی در سال  $n$ .

$V$  (kV): ولتاژ خط.

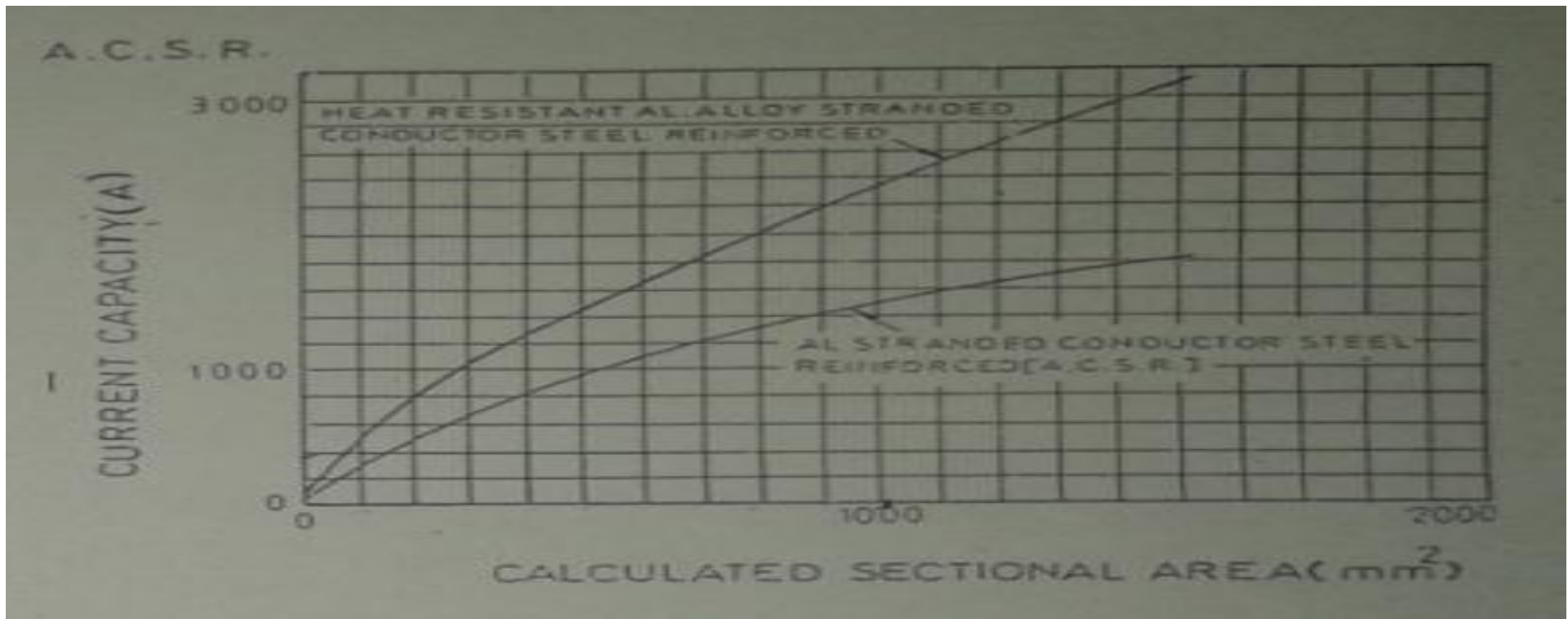
$I$  (kA): جریان خط.

$\alpha$ : نرخ رشد بار سالانه.

$n$ : مدت زمان برنامه ریزی شده.

$\cos \phi$ : ضریب توان خط می باشد.

در این مرحله با استفاده از جداول یا منحنی های «مقطع – جریان» هادی ها که توسط کارخانجات سازنده آنها ارائه می شود و با داشتن جریان  $I$  مقطع لازم هادی به دست خواهد آمد.



شکل [۸]- نمونه ای از منحنی مقطع - جریان» برای هادی های ACSR و TACSR که در دمای محیط  $40^{\circ}\text{C}$  و سرعت باد  $0.5 \text{ m/s}$  رسم شده است.



## • ۱۱-۲- تلفات اهمی:

- هنگامی که خطی مورد طراحی قرار می گیرد بایستی تلفات قدرت را دقیقاً مورد بررسی قرار داد. این مطالعه پس از تعیین و برآورد میزان بار خط مزبور، توسط محاسبات مربوط به پخش بار ممکن می گردد. صرف نظر از بررسی کلی فوق می توان خط را مستقل از شبکه با فرض ولتاژ ثابت در ترمینال های ورودی و خروجی آن از نقطه نظر تلف قدرت بررسی نمود. لازم به ذکر است که در طرح خطوط انتقال با توجه به محاسبات، مقطع هادی باید چنان انتخاب گردد که تلف قدرت از حدود ۵ درصد توان انتقالی تجاوز ننماید.
- - از رابطه زیر می توان قدرت تلف شده در اثر مقاومت اهمی را برای خطوط انتقال کوتاه (خطوط با طول کمتر از ۱۰۰ Km) به دست آورد.



که در آن:

I: جریان خط

$V_L$ : ولتاژ خط

S: قدرت ظاهری

$\cos \phi$ : ضریب توان

$$\Delta P = 3 R_{ac} |I|^2$$
$$\Delta P \% = \frac{3 R_{ac} |I|^2}{P} \times 100 = \frac{100 S R_{ac}}{|V_L|^2 \cos \phi} \times 100$$



و  $R_{ac}$ : مقاومت ac بوده که از رابطه زیر به دست می آید.

$$R_{ac} = K R_{dc}$$



که در این رابطه  $R_{dc}$  مقاومت معمولی یا مقاومت dc هادی می باشد و ضریب  $K$  با توجه به  $X$  از جدول صفحه بعد به دست می آید.

$$X = 0.063598 \sqrt{\mu F / r}$$

$\mu$  پرماییلیته ( $\mu \approx 1$ )

$F$ : فرکانس سیستم

$r$ : مقاومت dc هادی بر حسب ( $\Omega / \text{mile}$ )

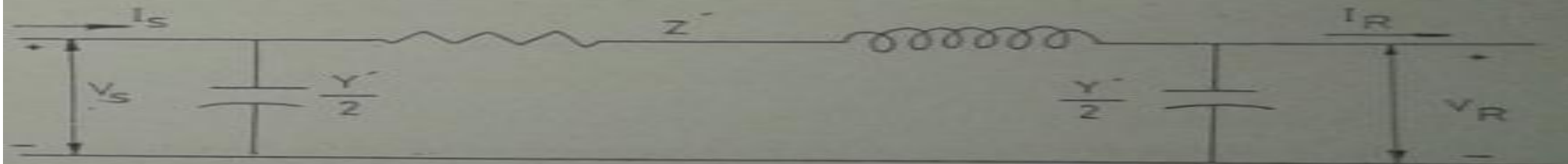
برای محاسبه مقدار تلفات اهمی در خطوط انتقال متوسط و طویل از مدار معادل  $\pi$  استفاده می شود.





X	K	X	K	X	K	X	K
0.0	1.00000	1.0	1.00519	2.0	1.07816	3.0	1.31809
0.1	1.00000	1.1	1.00758	2.1	1.09375	3.1	1.35102
0.2	1.00001	1.2	1.01071	2.2	1.11126	3.2	1.38504
0.3	1.00004	1.3	1.01470	2.3	1.13069	3.3	1.41999
0.4	1.00013	1.4	1.01963	2.4	1.15207	3.4	1.45570
0.5	1.00032	1.5	1.02582	2.5	1.17538	3.5	1.49202
0.6	1.00067	1.6	1.03323	2.6	1.20056	3.6	1.52879
0.7	1.00121	1.7	1.04205	2.7	1.22753	3.7	1.56587
0.8	1.00212	1.8	1.05240	2.8	1.25620	3.8	1.60314
0.9	1.00340	1.9	1.06440	2.9	1.28644	3.9	1.64051

جدول شماره (۳)



شکل (۹) - مدار معادل  $\pi$  خط انتقال



در این محاسبات برای خطوط متوسط داریم

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \quad , \quad Z' = Z$$
$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\tan h \gamma L / 2}{\gamma L / 2}$$
$$Z' = Z_e \sin h \gamma L = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sin h \gamma L = Z \frac{\sin \gamma L}{\gamma L}$$

و برای خطوط بلند داریم:



که در آن  $\gamma_L = \sqrt{ZY}$  ثابت انتشار و  $Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$  میپدانس مشخصه می باشد:

$$\begin{aligned} I &= I_R + V_R (Y' / 2) \\ I_R &= |I_R| e^{j\phi_R} \\ I &= I_R \cos \phi_R + j |V_R| |Y' / 2| + |I_R| \sin \phi_R \\ Y' / 2 &= j Y / 2 \end{aligned}$$



نتیجتاً تلفات قدرت به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta P = 3R_{AC} |I|^2 = 3R_{AC} (|I_R|^2 + |V_R| |I_R| Y' \sin \phi + |V_R|^2 \times |Y'/2|^2)$$



مثال: مطلوبست بررسی میزان تلف قدرت در یک خط  $230 \text{ kV}$  به طول  $200 \text{ Km}$  در صورتی که جریان خروجی  $I_R = 40 \text{ A}$  و  $\cos \phi_R = 0.85$  پس فاز باشد. مشخصات هادی به صورت زیر است:

$$r = 0.08 \Omega / \text{Km} \quad , \quad X_L = 0.5 \Omega / \text{Km} \quad , \quad X_C = 0.4 \text{ M}\Omega \times \text{Km}$$



برای تمام طول خطوط داریم:

$$Z = R + jX = 16 + j100 \Omega$$
$$Y = 5 \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega}$$



$$\phi = \cos^{-1} 0.85 = 31.79^\circ$$

$$V_R = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.79 \text{ kV}$$

$$I_R = 40 (\cos 31.79^\circ - j \sin 31.79^\circ) = 34 - j 21 \text{ A}$$

$$\Delta P = 3 R \left[ |I_R|^2 + |V_R| |I_R| |Y| \sin \phi + |V_R|^2 \times \left| \frac{Y}{2} \right|^2 \right]$$

$$\Delta P = 3 \times 16 \left[ 40^2 \times 10^{-6} + 132.79 \times 40 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-4} \times 0.527 + (132.79)^2 \times \left( \frac{5 \times 10^{-4}}{2} \right)^2 \right]$$

$$\Delta P = 0.197 \text{ MW}$$

$$P = 3 V_R I_R \cos \phi_R = 13.54 \text{ MW}$$

$$\Delta P \% = \frac{0.197}{13.54} \times 100 = 1.45 \%$$

ملاحظه می شود که تلفات توان ۴۵/۱ درصد بوده و چون کمتر از حد تلفات مجاز (۵ درصد) می باشد، لذا هادی به کار رفته از نظر تلفات مناسب می باشد.

• بهمن ۹۴

بهرآور-دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام



## • ۱۱-۳- جریان اتصال کوتاه:

• بررسی اختلالات شدید و ناگهانی تحت عنوان خطاها در سیستم های قدرت اهمیت ویژه ای دارد که انواع اتصال کوتاه ها و باز شدن (یا پاره شدن) خطوط انتقال از مهمترین خطاها به ترتیب میزان شدت، به صورت زیر طبقه بندی می شوند:

• ۱- اتصال کوتاه سه فاز متقارن:

• این اتصال کوتاه بر اثر اتصال و یا برخورد سه فاز به یکدیگر به وجود می آید.

• ۲- اتصال کوتاه دو فاز:

• در این صورت باید دو حالت را مورد بررسی قرار داد. در حالت اول تنها دو فاز به یکدیگر وصل می شوند و در حالت دوم، دو فاز همزمان به زمین نیز متصل می گردند.

• ۳- اتصال کوتاه یک فاز به زمین.

• ۴- از هم گسیختگی و یا پاره شده هادی های خط انتقال.





اغلب اتصال کوتاه ها در سیستم های قدرت [بیش از ۷۵٪] از نوع اتصال کوتاه یک فاز به زمین می باشند که معمولاً بر اثر شکست الکتریکی و ایجاد جرقه روی مقره ها پدید می آیند. احتمال وقوع اتصال کوتاه دو فاز نیز بیشتر از اتصال کوتاه متقارن می باشد. گرچه احتمال وقوع اتصال کوتاه متقارن بسیار کم [حدود ۵٪] می باشد، لیکن بسیاری از محاسبات کلاسیک سیستم ها بر مبنای جریان های اتصال کوتاه متقارن بنا شده اند.

با توجه به محاسبات اتصال کوتاه شبکه [ماکزیمم جریان اتصال کوتاه سه فاز و یا تک فاز هر کدام که تعیین کننده باشد] و مدت زمان تداوم آن [زمان عملکرد کلید]، سطح مقطع هادی از رابطه زیر به دست می آید:

$$I_{sc} = \frac{K}{\sqrt{t}}$$

• بهمن ۹۴



A: سطح مقطع هادی بر حسب میلیمتر مربع

$I_{sc}$ : جریان اتصال کوتاه بر حسب آمپر.

t: زمان رفع خطا بر حسب ثانیه.

K: ضریب ثابت که مقدار آن برای هادی های مختلف برابر است با:

ACSR .....	K = 85
AAC .....	K = 111
AAAC .....	K = 93
GALVANIZED STEEL .....	K = 49
ALUMINIUM CLAD STEEL .....	K = 92

جدول شماره (۴)



## • ۱۱-۴- کرونا و تلفات ناشی از آن:

• موضوع فوق تحت عناوین زیر مورد بررسی قرار می گیرد.

### • ۱۱-۴-۱- کرونا:

- یکی از عوامل تعیین کننده حداقل قطر هادی در ولتاژهای بالا پدیده کرونا می باشد. در حین عبور جریان از سیم، یک میدان الکتریکی در اطراف هادی به وجود می آید که چنانچه مقطع سیم کافی نباشد، شدت میدان به وجود آمده باعث شکست مقاومت الکتریکی هوای اطراف هادی و در نتیجه وقوع پدیده کرونا می گردد. با افزایش ولتاژ اسمی هادی ها از حدود ۲۲۰ کیلوولت به بالا در حالی که مقطع هادی با توجه به دانسیته اقتصادی جریان و جریان اسمی بار، به طور مناسب انتخاب گردد، شدت میدان الکتریکی در سطح خارجی هادی، مقدار قابل ملاحظه ای را دارا می گردد و چنانچه گرادیان ولتاژ بر روی سطح یک هادی بیش از قدرت شکست الکتریکی هوا گردد باعث تخلیه الکتریکی در هوای اطراف هادی می شود. این تخلیه در هوای اطراف هادی سبب ایجاد هاله ای نورانی به رنگ بنفش، نویز صوتی، نویز رادیویی و لرزش هادی شده و از آنجایی که گرادیان ولتاژ محیط اطراف هادی در روی سطح هادی بیشترین مقدار خود را دارا می باشد، تخلیه الکتریکی از سطح هادی شروع می گردد.

• بهمن ۹۴



• ضخامت هوای یونیزه اطراف هادی بستگی به مقدار ولتاژ دارد. در حالتی که فواصل بین هادی ها کم باشد کرونا ممکن است باعث ایجاد جرقه و بروز اتصال کوتاه گردد. کرونا صرف نظر از تلف قدرت و تداخل رادیویی و دیگر اثرات نامطلوب خود، در مواقعی که موج های ولتاژ ضربه ای (در اثر کلید زنی و یا رعد و برق) در خط ایجاد گردد، سبب کاهش دامنه موج های مذکور می شود. همچنین در اثر پدیده کرونا ضریب کوپلاژ بین هادی و سیم زمین افزایش می یابد و این خود باعث می شود چنانچه موج ولتاژی در اثر رعد و برق روس سیم و یا برج پدید آید، مقدار ولتاژ در سر ایزولاتورها و در نتیجه احتمال جرقه در دو سر ایزولاتور کاهش یابد.

• افت کرونا به عوامل مختلفی از جمله موقعیت هادی ها، فرم و سطح هادی و شرایط جوی بستگی دارد. برای هوای صاف در شرایط معمول در سطح دریا (  $760 \text{ mm Hg}$  و درجه حرارت  $25^\circ \text{ C}$  ) گرادیان ولتاژ بحرانی (گرادیان ولتاژی که به ازاء آن یونیزاسیون شروع می شود) برابر با  $g_0 = 30 \text{ (kV / Cm)}$  می باشد و چنانچه مقدار مؤثر ولتاژ منظور شود قدر مؤثر گرادیان بحرانی  $g_{\text{eff}} = \frac{30}{\sqrt{2}} = 21.21 \text{ (kV / Cm)}$  خواهد بود.



مقدار گرادیان ولتاژ بحرانی متأثر از ضریب چگالی هوا و در نتیجه درجه حرارت و فشار هوا خواهد بود و برای دیگر شرایط جوی از نقطه نظر درجه حرارت و فشار از رابطه  $g = \delta g_0$  محاسبه می شود. در این رابطه  $\delta$  ضریب چگالی هوا بوده و عبارتست از:

$$\delta = \frac{273 + 25}{273 + t} \times \frac{P}{76 \text{ cm Hg}} = \frac{3.92 P}{273 + t}$$



که در این رابطه  $P$  فشار هوا بر حسب سانتیمتر جیوه و  $t$  درجه حرارت بر حسب درجه سانتیگراد می باشد. معمولاً در طراحی خطوط انتقال، گرادیان ولتاژ را پایین تر از حد شروع کرونا [معمولاً  $17 \text{ kV / Cm}$ ] در نظر می گیرند و گرادیان ولتاژ روی سطح هادی را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد. که در آن:

$$E_{\max} = \frac{V}{n \cdot r \cdot \ln(D/r_c)} \left[ 1 + \frac{2(n-1)r}{s} \sin \frac{\pi}{n} \right]$$
$$r_c = \left[ r n \left( \frac{s}{2 \sin \frac{\pi}{n}} \right)^{n-1} \right]^{1/n}$$

$D$ : فاصله متوسط هندسی فازها [بر حسب  $\text{Cm}$ ].

$S$ : فاصله بیت مراکز هادی ها در هر فاز [بر حسب  $\text{Cm}$ ].

$n$ : تعداد هادی ها در هر فاز.

$r$ : شعاع هر هادی [بر حسب  $\text{Cm}$ ].

$r_c$ : شعاع معادل هادی های هر فاز [بر حسب  $\text{Cm}$ ].

$V$ : ولتاژ فازی مؤثر شبکه [بر حسب  $\text{kV}$ ] می باشد.



برای مشابه سازی حالت بانند با حالت تک هادی، در حالت بانند شعاع مؤثر  $r_e$  تعریف می شود. به طوری که در حالت بانند نیز رابطه زیر صدق نماید.

$$E_{\max} = \frac{V_e}{r_e \ln(D/r_e)}$$
$$r_e = \frac{ns}{\frac{s}{r} + 2(n-1)\sin\frac{\pi}{n}} \times \frac{\ln\frac{D}{r_e}}{\ln\frac{D}{r_e}}$$

$r_e$  به صورت زیر تعریف می شود:

در حالت بانند به دلیل افزایش شعاع مؤثر بانند نسبت به شعاع هادی، از شدت میدان الکتریکی در سطح هادی کاسته خواهد شد.



## ۱۱-۴-۲- تلفات کرونا:

تلفات کرونا همانند ولتاژ بحرانی کرونا، به شرایط جوی و مشخصات خط انتقال بستگی دارد. در طراحی هادی تلفات کرونا را در هوای خوب در حد معینی محدود می کنند که مقادیر آن برای ولتاژهای مختلف به صورت زیر می باشد. لازم به ذکر است که در ولتاژهای پایین تر از 132 (kV) اصولاً کرونا به وجود نیامده و یا بسیار ناچیز است.

### جدول شماره (۵)

ولتاژ نامی (kV)	تلفات مجاز (KW / KM / 3 φ)
132	0.06
230	0.6
400	1





ولتاژ بحرانی نسبت به زمین و  $V_{cr}$  برقرار باشد (  $V_{ph}/V_{cr} > 1.8$  ) در شرایطی که نسبت ولتاژ فاز)، از رابطه تجربی پیک برای محاسبه قدرت تلف شده ناشی از کرونا  $V_{ph}$  میتوان استفاده نمود.

$$P_c = 3 \times 244 \left( \frac{f + 25}{\delta} \right) \sqrt{\frac{r}{D}} \times (V_{ph} - V_{cr})^2 \times 10^{-5} \text{ (KW/Km/3 } \delta \text{)}$$

- که در آن:
- $f$  : فرکانس (بر حسب HZ)
- $D$  : فاصله هندسی فازها (بر حسب cm)
- $r$  : شعاع هادی (بر حسب cm)
- $\delta$  و ضریب چگالی هوا میباشد.



- باشد از رابطه تجربی پترسون برای محاسبه تلفات کرونا  $V_{ph}/V_{cr} < 1.8$  در صورتیکه در هوای خوب استفاده میشود.

$$P_c = 3 \times 21,1 \times f \times F \left( \frac{V_{ph}}{\log\left(\frac{D}{r}\right)} \right)^2 \times 10^{-5} \text{ (KW/Km/3 } \delta \text{)}$$

که در آن:

$f$ : فرکانس (برحسب HZ)

$V_{ph}$ : ولتاژ فاز نسبت به زمین (برحسب kV)

$V_{cr}$ : ولتاژ بحرانی شروع کرونا (برحسب kV)

$D$ : فاصله هندسی فازها (برحسب cm)

$r$ : شعاع هادی (برحسب cm)

$F$ : ضریب ثابتی است متناسب با  $V_{ph}/V_{cr}$



$V_{ph} / V_{cr}$	F	$V_{ph} / V_{cr}$	F	$V_{ph} / V_{cr}$	F	$V_{ph} / V_{cr}$	F
1.00	0.037	1.26	0.120	1.52	1.10	1.78	4.72
1.02	0.039	1.28	0.136	1.54	1.80	1.80	4.95
1.04	0.042	1.30	0.154	1.56	1.59	1.82	5.17
1.06	0.046	1.32	0.176	1.58	1.88	1.84	5.39
1.08	0.048	1.34	0.200	1.60	2.20	1.86	5.60
1.10	0.052	1.36	0.220	1.62	2.52	1.88	5.81
1.12	0.057	1.38	0.260	1.64	2.83	1.90	6.01
1.14	0.063	1.40	0.30	1.66	3.13	1.92	6.21
1.16	0.069	1.42	0.39	1.68	3.42	1.94	6.41
1.18	0.075	1.44	0.48	1.70	3.70	1.96	6.61
1.20	0.082	1.46	0.63	1.72	3.97	1.98	6.81
1.22	0.092	1.48	0.74	1.74	4.25	2.00	7.00
1.24	0.105	1.50	0.90	1.76	4.48		

جدول شمارہ (۶)



ولتاژ بحرانی شروع کرونا  $[V_{cr}]$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_{cr} = 21.1 m \times \delta^{2/3} \times r_e \times \ln \frac{D}{r}$$



$\delta$  ضریب چگالی هوا است که با توجه به شرایط فشار و دما از رابطه زیر به دست می آید.  
که در آن:

$$\delta = \frac{3.92 P}{273 + t}$$

P: فشار هوا [برحسب Cm-Hg].

t: درجه حرارت [برحسب °C].

و m: ضریب ثابت متناسب با سطح هادی که برای هادی های رشته ای بین [0.83-0.88] فرض می شود:

توجه به این مطلب ضروری است که چون یک خط انتقال از مناطقی با ارتفاع و شرایط جوی مختلف عبور می کند، در هنگام محاسبه کرونا با توجه به اینکه ولتاژ بحرانی  $V_{cr}$  برحسب ارتفاع و شرایط جوی متغیر است، تلفات قدرت کرونا را برای واحد طول خط در نقاط مختلف حساب نموده و بر اساس آن تلفات کل را به تناسب طول خط که از مناطق مختلف می گذرد محاسبه می کنیم.



پس از این محاسبات در صورتی که مقدار تلفات از مقادیر مجاز فراتر رود بایستی مقطع هادی را یک نرم بالاتر برد و یا به تعداد باندل ها افزود و محاسبات را مجدداً تکرار نمود تا جایی که هادی مورد نظر از لحاظ کرونا مناسب باشد.

### • ۱۱-۵- سطح مقطع اقتصادی:

- با توجه به اینکه انتخاب هادی تابع پارامترها و عوامل متعددی می باشد و به دست آوردن یک رابطه که بتواند با در نظر گرفتن همه عوامل و پارامترها، سطح مقطع بهینه را مشخص نماید، کاری بس مشکل می باشد و از طرفی منظور کردن تمام پارامترها به طور دقیق مشکل می باشد، لذا امروزه برای تعیین سطح مقطع اقتصادی هادی بیشتر از روش مقایسه (قانون کلوین) استفاده می شود. به طور کلی در خطوط انتقال هزینه یک هادی عمدتاً متشکل از دو قسمت می باشد که عبارتند از:
  - الف) هزینه سرمایه گذاری مربوط به خرید و نصب هادی.
  - ب) هزینه انرژی تلف شده ناشی از مقاومت اهمی.



واضح است که برای یک مسیر با طول مشخص، وزن و در نتیجه هزینه مس یا آلومینیوم، متناسب با سطح مقطه می باشد. در نتیجه مقدار بهره سالیانه و استهلاک نیز متناسب با سطح مقطع بوده و عبارت خواهد بود از:  
که در آن:

$$S_1 = K_1 \cdot A \quad (\text{ریال})$$

$S_1$ : بهره سالیانه.

$A$ : سطح مقطع هادی.

و  $K_1$ : ضریب ثابت می باشد.



از طرف دیگر مقاومت متناسب با  $1/A$  می باشد. در نتیجه برای شرایط معین بارگیری در طول سال، تلفات انرژی در هادی متناسب با مقاومت و در نتیجه متناسب با  $1/A$  خواهد بود. بنابراین هزینه سالانه تلفات را می توان به صورت زیر نوشت که  $K_2$  ضریب ثابت است.

$$S_2 = K_2 / A \text{ (ریال)}$$





البته برای تعیین هزینه تلفات سالانه مقدار متوسط جریان سالانه باید مشخص باشد. با صرف نظر کردن از تلفات غیر اهمی داریم:

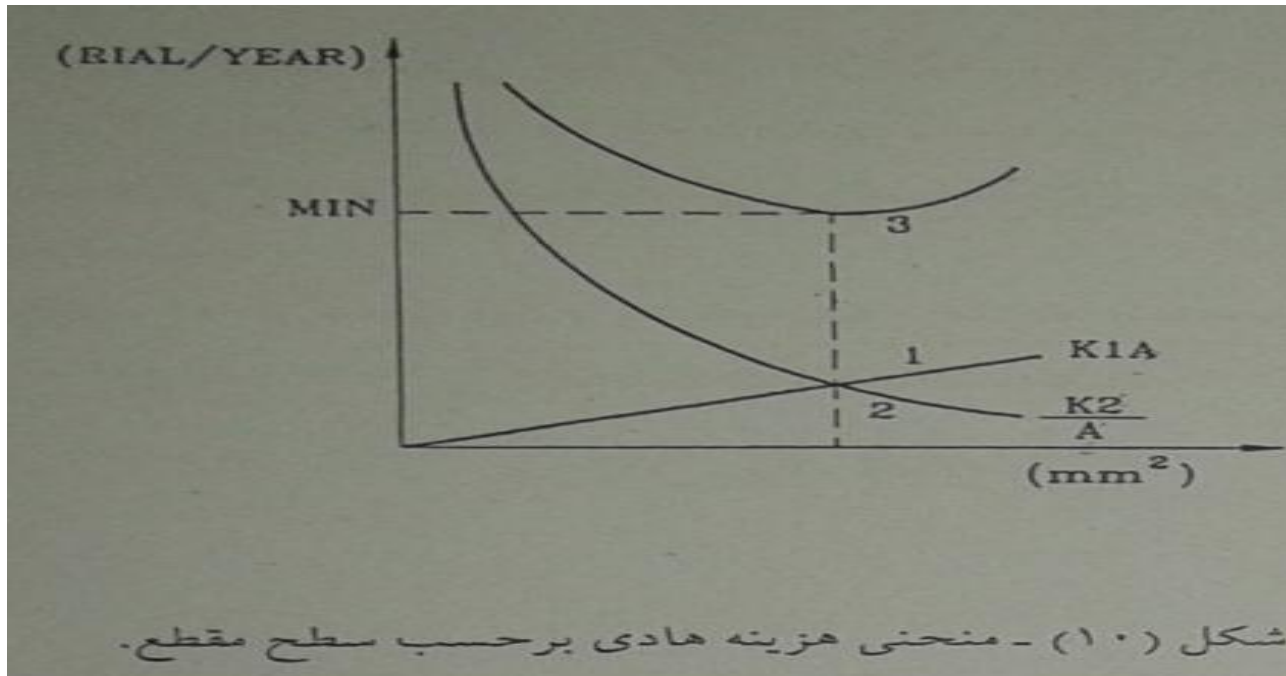
$$S = (K_1 \cdot A + K_2 / A) \quad (\text{ریال}) \quad \text{هزینه سالانه}$$

چنانچه بخواهیم این هزینه حداقل باشد.  $dS/dA$  بایستی صفر باشد.



روش فوق را می توان با استفاده از منحنی های هزینه مربوط به سرمایه گذاری [منحنی ۱] و هزینه تلفات سالیانه [منحنی ۲] بر حسب سطح مقطع هادی نمایش داد. هزینه کل که با منحنی ۳ نمایش داده شده است دارای یک مینیمم به ازای سطح مقطع  $A$  مربوط به نقطه تقاطع منحنی

های ۱ و ۲ می باشد. [شکل ۱۰]





## • ۱۱-۶- عوامل مکانیکی:

- پس از بررسی شرایط الکتریکی هادی و حصول اطمینان از داشتن مشخصه های الکتریکی مناسب، باید شرایط مکانیکی هادی نیز مورد بررسی قرار گیرد. به عبارت دیگر هادی ها بایستی بتوانند نیروهای کششی و بارهای اضافی ناشی از عوامل جوی را در شرایط مختلف تحمل نمایند و کشش آنها از محدوده مجاز که باعث تغییر شکل سیم و خارج شدن از حد الاستیک می شود، تجاوز ننماید.
- با توجه به ویژگی های مناسب فلز آلومینیوم، این فلز به عنوان هادی جریان در خطوط انتقال نیرو انتخاب گردیده، لیکن در ولتاژهای بالاتر از (kV) ۳۵ به علت فاصله بیشتر بین برج ها، وزن و نیروی کششی بالاتری به هادی ها تحمیل شده و مقاومت مکانیکی بالاتر هادی را طلب می کند. در این حالت مقاومت مکانیکی فلز آلومینیوم جهت تأمین نیروی کششی ظاهر شده در هادی ها کافی نبوده، از آلومینیوم همراه با فولاد استفاده می شود.



- فولاد در قسمت مرکزی هادی به عنوان هسته یا مغزی پیش بینی شده و نیروی کششی و مقاومت مکانیکی مورد نیاز را تأمین می سازد. این نوع هادی ها با عنوان هادی های آلومینیوم فولاد (ACSR) موسوم می باشند.
- با افزایش ولتاژ اسمی خط، فاصله بین برج ها باز هم فزونی یافته و نیروی کششی بیشتری در هادی ها ظاهر شده و لذا هادی با مقاومت مکانیکی بالاتری مورد نیاز می باشد.
- به همین علت مقطع فولادی نیز متناسب با افزایش ولتاژ و فاصله بین برج ها فزونی می یابد.
- در نقاط سردسیر به علت تشکیل حجم قابل ملاحظه یخ و برف بر روی هادی از هادی های با مقطع فولاد بیشتر استفاده می شود. بدین ترتیب بر حسب نیروی کششی مورد نیاز، مقطع هسته فولادی و نسبت آن به مقطع رشته های آلومینیوم در انواع گوناگون هادی ها متفاوت خواهد بود.



در برخی استانداردها از نسبت فولاد به آلومینیوم جهت مشخص نمودن هادی ها استفاده شده و حاصل این نسبت را ضریب استفاده نامیده اند و به صورت زیر نشان می دهند:

$$K = \frac{S_s}{S_A}$$

که در آن:

$S_A$ : سطح مقطع آلومینیوم در هادی.

$S_s$ : سطح مقطع فولاد در هادی.

و  $K$ : ضریب استفاده می باشد.



- هادی مخصوص که در آن سطح مقطع فولاد با سطح مقطع آلومینیم برابر باشد  $K = 1$  در مناطق بسیار خاص و محدود به هنگام عبور از خط از دره های عمیق، عرض رودخانه های بزرگ و فواصل فوق العاده زیاد برج ها به کار می رود.
- به طور کلی در شرایط معمولی نصب خطوط، نسبت آلومینیم به فولاد برابر با ۸، در شرایط دشوار ۶ و در مناطق سردسیر با حجم قابل ملاحظه یخ نزدیک به ۴ می باشد. اصولاً طراحی طوری صورت می گیرد که نیروی وارد شده به هادی ها در شرایط مختلف بارگذاری از مقادیر زیر که توسط استانداردهای مختلف توصیه شده تجاوز ننماید.



حداکثر مناسب حداقل	کشش هادی
( 45 ---- 50 ---- 55 ) % ( U.T.S ) *	کشش ماکزیمم هادی
( 18 ---- 20 ---- 22 ) % ( U.T.S )	حداکثر کشش روزمره ( E.D.S ) **
( 22 ---- 25 ---- 28 ) % ( U.T.S )	حداکثر کشش مجاز در دمای مینیمم
( 35 ---- 40 ---- 45 ) % ( U.T.S )	حداکثر کشش در یخ و باد ترمال

جدول شماره (۷)

[توضیح اینکه U.T.S حد گسیختگی هادی ها بوده و از جداول مشخصه آنها به دست می آید.]  
در صورتی که کشش هادی های خط بیش از حد مجاز باشد عمر مکانیکی هادی و ضریب اطمینان خط کاهش می یابد و استفاده از هادی ها با کشش کم نیز از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.



• بهمن ۹۴

بهر آور- دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام





• بهمن ۹۴

بهر آور- دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام



• بهمن ۹۴

بهر آور- دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام



• بهمن ۹۴

بهر آور- دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام



• بهمن ۹۴

بهر آور- دانشکده مهندسی برق دانشگاه یادگار امام