انتخاب سطح مقطع بهینه با هدف تقلیل کرونا در خطوط کمپکت

چکیده: در کنار ویژگی های مثبتی که خطوط انتقال نیروی کمپکت دارا می باشند، تاثیر سوء آنها بر محیط زیست که منجر به ایجاد کرونا در اطراف هادیهای خطوط انتقال و همچنین افزایش تلفات کرونا و تولید اغتشاشات رادیویی، تلویزیونی و مخابراتی می‌گردد، از جمله آثار منفی این خطوط می باشد. در خطوط انتقال معمولی پدیده کرونا وجود دارد ولی در حالت کمپکت این مساله حادتر می‌گردد و در صورت استفاده از خطوط کمپکت بعلت نزدیک سازی فواصل افقی و عمودی فازها، میزان کرونای ایجاد شده نسبت به خطوط انتقال معمولی بیشتر است.

در یک شرایط مشخص هر چه میزان گرادیان ولتاژ اطراف هادیها بیشتر گردد، میزان تلفات کرونا نیز افزایش می‌یابد. کمپکت سازی خطوط میزان گرادیان ولتاژ را در اطراف هادیها می افزاید. بنابراین برای کاهش میزان گرادیان ولتاژ یا باید میزان قطر هادیها را کاهش داد یا که تعداد هادیهای فرعی هر فاز را زیاد نمود.

هدفی که در این مقاله دنبال می شود انتخاب سطح مقطع مناسب هادیها در هنگامی که در خطوط ساده یا باندل، کمپکت سازی صورت می‌گیرد، می باشد.

واژگان کلیدی: خطوط کمپکت، کرونا، گرادیان ولتاژ، ولتاژ بحرانی، سطح مقطع بهینه

۱- مقدمه

کمپکت‌سازی خطوط به کلیه ترفندها و روش‌هایی اطلاق می‌گردد که در نزدیک‌سازی فواصل افقی و عمودی فازها مؤثر باشند. طبیعی است نزدیک‌سازی فازها خود به عوامل بسیار متعدد دیگری بستگی دارد که در مجموعه دانش‌های متعلق به خطوط انتقال کمپکت جای می‌گیرند. بنابراین حاصل بکارگیری تمام این روش‌ها، تقلیل پهنا و ارتفاع پایه‌ها یا برجها و در نتیجه تقلیل مساحت زمین اشغالی در طول مسیر می‌شوند[۱,۴, ۵].

بطور کلی خطوط انتقال کمپکت به پایه‌ها یا برجهای خاص اطلاق نمی‌شود، بلکه برحسب اینکه هدف از کمپکت‌سازی چه باشد، می‌توان روش‌های مختلفی را بکار گرفت. به عبارت دیگر پهنای برج یا فاصله فازهای کناری که عملاً در محاسبه عرض باند عبور دخالت دارند، بر حسب اینکه خطوط انتقال معمولی یا خیلی کمپکت باشند می‌تواند در محدوده وسیعی تغییر نماید، بنابراین خطوط کمپکت می‌تواند از انواع مختلفی تشکیل گردد که برحسب شرایط جغرافیائی و جوی منطقه و سایر پارامترهای فنی و اقتصادی می‌تواند تغییر نماید. از آنجا که لازمه کمپکت‌سازی خطوط انتقال، بکارگیری طرحهای ویژه و در برخی موارد استفاده از تجهیزات اضافی است، لذا ممکن است در برخی موارد سرمایه‌گذاری لازم جهت احداث آنها در مقایسه با خطوط انتقال معمولی افزایش یابد، اما

اگر در محاسبات اقتصادی قیمت زمین نیز منظور گردد، در اغلب موارد بکارگیری خطوط انتقال کمپکت ضمن دارا بودن مزیت‌های فنی، توجیه اقتصادی نیز خواهد داشت[۷]. خطوط انتقال نیروی کمپکت ضمن اینکه دارای باند عبور کمتری هستند و از نظر الکتریکی نیز دارای برتریهای زیادی نسبت به خطوط ساده می‌باشند اما از نظر اینکه فواصل هادیها را بهم نزدیک می کند کرونای اطراف خطوط را می افزاید و باید در این حالت برای کاهش مقدار کرونا از هادیهای با سطح مقطع بزرگتر استفاده نمود که دراین مقاله به انتخاب سطح مقطع مناسب جهت کاهش کرونا پرداخته می‌شود**[۲]**.

۲- گرادیان ولتاژ[۳]

در خطوط انتقال نیرو گرادیان بحرانی یا حدی از گرادیان ولتاژ که باعث یونیزاسیون و آغاز شکست هوا می گردد، با توجه به ناخالصی هوا، رطوبت، درجه حرارت و ارتفاع منطقه ارقام متفاوتی را به خود اختصاص می دهد. در شرایط استاندارد (فشار هوا = یک اتمسفر ، درجه حرارت = $25^{\circ}C$) مقدار گرادیان ولتاژ موثر ۲۱/۲ کیلوولت بر سانتیمتر می‌باشد و برای شرایط دیگر جوی مقدار آن از روابط زیر بدست می‌آید:

$$g = 21.2\delta = g_0.\delta \qquad (۱)$$

$$\delta = \frac{298P}{T} \qquad (۲)$$

$$P = (1 - \frac{h}{44300})^{5.25} \qquad (۳)$$

که در این رابطه :

g: ولتاژ آغاز شکست هوا یا گرادیان بحرانی در شرایط غیر استاندارد، $\left(KV/_{cm}\right)$

δ:چگالی نسبی هوا

P: فشار هوا (atm)

T: در جه حرارت هوا، درجه کلوین($T_a, T = 273 + T_a$ درجه حرارت محیط بر حسب درجه سانتیگراد)

h: ارتفاع از سطح دریا (m)

۳- گرادیان ولتاژ در سطح هادی [۳]

در شرایط استاندارد و هوای تمیز مقدار گرادیان ولتاژ در سطح یک هادی صاف و لوله ای شکل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$g_c = \frac{V}{r.Ln\left(\frac{GMD}{r}\right)} \qquad (۴)$$

در عمل هادیهای مورد استفاده در خطوط انتقال نیرو رشته‌ای می‌باشند بهمین دلیل لازم است مقدار g_c در حد مقدار گرادیان بحرانی ولتاژ (g_p) مهار گردد. در رابطه زیر مقدار m نشان دهنده ضریب ناصافی هادی باشد:

$$g_p = g_c.m = g_0.\delta.m \qquad (۵)$$

برای کنترل پدیده کرونا لازم است مقطع هادیها طوری انتخاب شوند که مقدار g_c یا گرادیان ولتاژ در سطح هادی از حد معینی که در رابطه (۵) بدان اشاره شده تجاوز ننماید. اگر هدف تعیین حداقل شعاع هادیها برای کنترل پدیده کرونا در شرایط غیر استاندارد باشد، لازم است در رابطه (۴) مقدار g_c با مقدار g_p جایگزین گردد، بنابراین:

$$g_0=\frac{V}{m.\delta.r.Ln(GMD/r)} \qquad (۶)$$

که به کمک رابطه فوق می توان حداقل شعاع هادی (r) را از طریق سعی و خطا طوری انتخاب نمود که g_0 کوچکتر از حد ۲۱/۲ کیلو ولت بر سانتیمتر باشد.

در روابط فوق :

g_c: گرادیان ولتاژ در سطح هادی $\left(KV/cm\right)$

V: ولتاژ فاز به زمین (کیلوولت)

r : شعاع هادی (cm)

m: ضریب ناصافی هادی (برای هادیهای صاف برابر یک و برای هادیهای رشته ای بین ۰/۸ و۰/۸۵ می باشد.)

GMD: فاصله متوسط هندسی فازها (cm)

۴- گرادیان ولتاژ در خطوط باندل[۳]

در صورت استفاده از خطوط باندل گرادیان ولتاژ در سطح هادی ها کاهش می یابد و هر چه تعداد هادیهای فرعی هر فـاز افزوده گردد از مقدار گرادیان ولتاژ و در نتیجه تلفات کرونا و اغتشاشات مخابراتی و محیط زیستی خطوط انتقال کاسته می گـردد. در چنین شرایطی مقدار ماکزیمم گرادیان ولتاژ در سطح هادیها از روابط زیر بدست می آید :

$$g_{av}=\frac{V}{n_s.r.Ln\left(\frac{GMD}{r_b}\right)} \qquad (۷)$$

$$g_{\max}=K.g_{ave} \qquad (۸)$$

$$K=1+\frac{2r.(n_s-1).\sin(\frac{\pi}{n_s})}{d_s} \qquad (۹)$$

در این روابط :

$g_{\max}$ =ماکزیمم گرادیان ولتاژ در سطح هادی ها KV/cm

g_{ave} = متوسط گرادیان ولتاژ در سطح هادی ها KV/cm

n_s= تعداد هادیهای فرعی در هر فاز

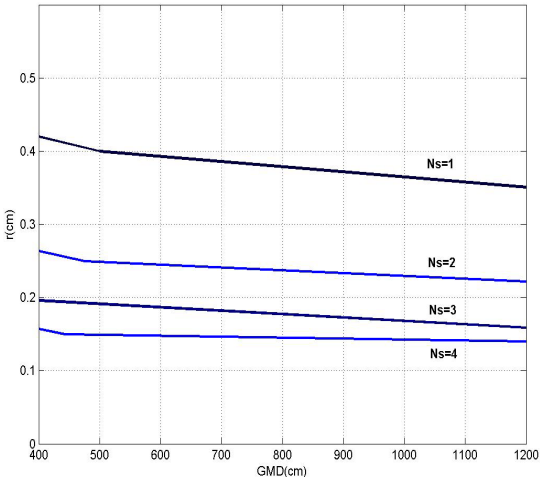
d_s= فاصله هادیهای فرعی از یکدیگر (cm)

r_b= شعاع معادل هادیهای باندل

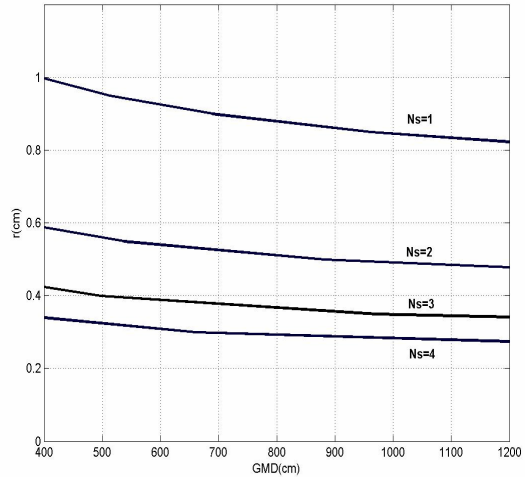
برای کنترل پدیده کرونا لازم است تعداد و مقطع هادیهای طوری انتخاب شوند که $g_{\max}$ در شرایط مسیر از حـد مقـدار g_p که از رابطه (۵) بدست می آید، تجاوز نکند.

۵. تعیین حداقل مقطع مناسب هادیها

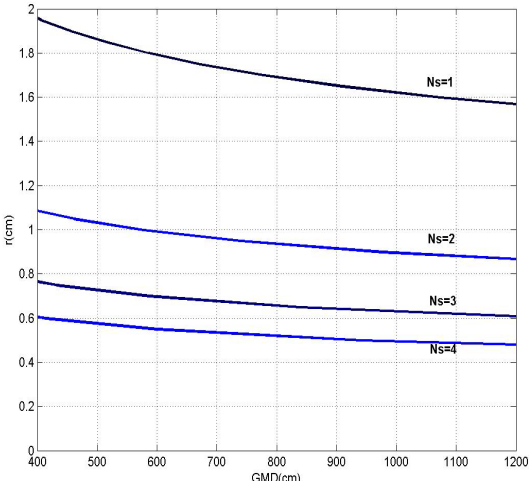
با توجه به آنچه گفته شد، برای اینکه اغتشاشات رادیویی، تلویزیونی، مخابراتی ، نویز و تلفات کرونا در خطوط انتقال نیرو در حد استاندارد و معمولی محدود شوند لازم است سطح مقطع هادیها در هر سطحی از ولتاژ از یک میزان حداقل کمتر نباشد. برای سطح ولتاژهای ۴۰۰ ، ۲۳۰ ۱۳۲ و۶۳ کیلوولت در GMD های مختلف، مقدار شعاع هادیها با توجه به روابط ارائه شده در بخشهای قبل، استخراج شده است(شکلهای (۱)، (۲)، (۳)و (۴)). میزان گرادیان ولتاژ برای شرایط استاندارد برابر ۲۱/۲ کیلوولت بر سانتیمتر در نظر گرفته شده است؛ همچنین فرض شده که نوع هادیهایی که در خط بکار می‌روند هادی رشته ای با ضریب ناصافی ۰/۸۵ باشند.البته باید توجه داشت که شعاع هادیهای محاسبه شده، فقط برای قید کرونا می‌باشد و در شرایط کلی برای محاسبه سطح مقطع مجاز هادیها پارامترهای دیگری از قبیل جریان مجاز هادیها، جریان اتصال کوتاه، تلفات انرژی، مقاومت مکانیکی هادی و شرایط جوی و محیطی مسیر نیز موثر می‌باشند.



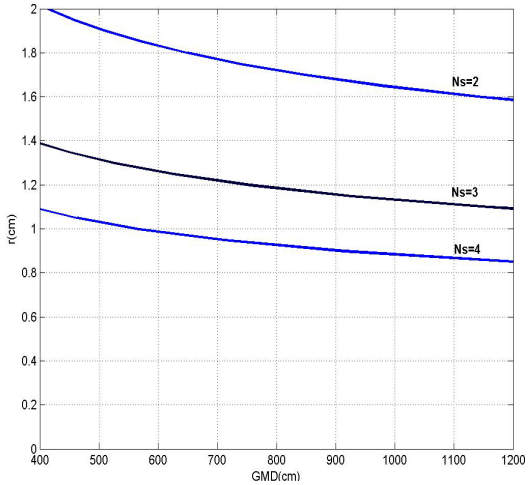
شکل(۱):تاثیر فاصله متوسط هندسی فازها بر سطح مقطع‌هادیهای خط ۶۳ کیلوولت برای تعداد هادیهای فرعی مختلف



شکل(۲):تاثیر فاصله متوسط هندسی فازها بر سطح مقطع هادیهای خط ۱۳۲ کیلوولت برای تعداد هادیهای فرعی مختلف



شکل(۳):تاثیر فاصله متوسط هندسی فازها بر سطح مقطع هادیهای خط ۲۳۰ کیلوولت برای تعداد هادیهای فرعی مختلف



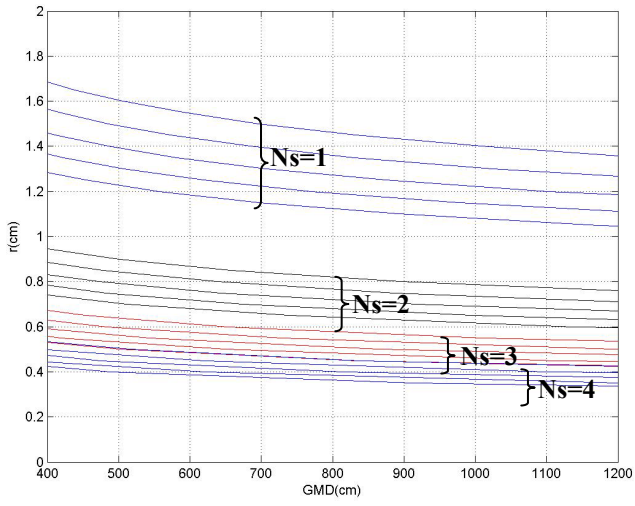
شکل(۴):تاثیر فاصله متوسط هندسی فازها بر سطح مقطع هادیهای خط ۴۰۰ کیلوولت برای تعداد هادیهای فرعی مختلف

۵-۱- بررسی تغییرات شعاع هادیها براساس تغییرات GMD و چگالی نسبی هوا

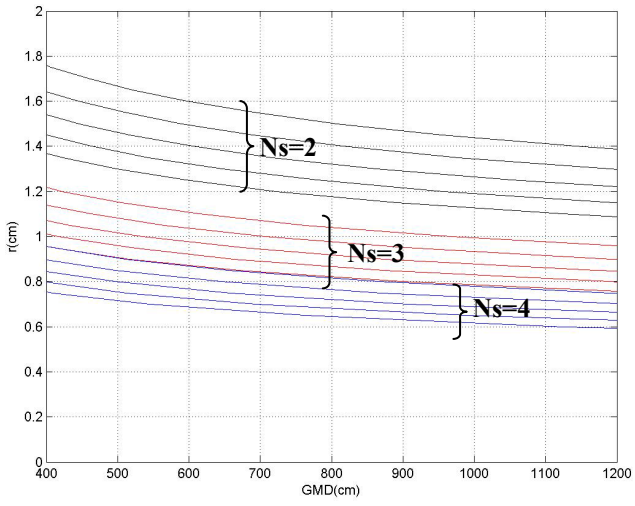
همانطور که در نمودارهای (۱) تا (۴) دیده می شود، با افزایش فاصله متوسط هندسی هادیها، مقدار شعاع هادی خط مدنظر کاهش می یابد، این بدان معنی است که هر چه فاصله متوسط هندسی هادیها زیادتر گردد، گرادیان ولتاژ سطح هادی کاهش می‌یابد، بعبارتی هر چه فاصله متوسط هندسی هادیها زیادتر گردد، گرادیان ولتاژ سطح هادی کاهش می‌یابد در نتیجه میزان کرونا کاهش می یابد. همچنین در نمودارهای فوق، هر چه تعداد هادیهای فرعی افزایش می یابد، در یک GMD یکسان شعاع هادی کاهش می یابد، این نشان دهنده این نکته است که افزایش تعداد هادیهای فرعی در هر فاز منجر به کاهش تلفات کرونا می‌گردد. بنابراین، با توجه به این نکته که در کمپکت سازی خطوط، فواصل افقی و عمودی فازها به هم نزدیک می‌گردند یا بعبارتی GMD فازها کاهش می‌یابد، گرادیان ولتاژ و بدنبال آن کرونا در اطراف فازها زیاد می‌گردد، پس توصیه می شود که در خطوط کمپکت از تعداد هادیهای فرعی بیشتری در هر فاز استفاده گردد تا تاثیر نزدیک‌سازی فازها بر میزان کرونا کاهش یابد.

در سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت، استفاده از خطوط تک‌باندله معمول نمی‌باشد. در این شکل نیز دیده می‌شود که برای سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلو ولت، در رنج هادیهای معمول، هادی مناسبی برای انتقال توان بصورت تک‌باندله یافت نمی‌شود.

اگر نمودارهای (۵) و (۶) ملاحظه گردد، دیده می شود که در شرایط جوی مختلف (برای چگالی های مختلف هوا) برای تعداد هادیهای فرعی متفاوت، گاهی اوقات همپوشانی وجود دارد مثلاً درخط ۲۳۰ کیلوولت، شرایط سطح مقطع یک خط سه باندل در چگالی نسبی هوا برابر یک، با یک خط چهار باندل با چگالی نسبی هوا برابر ۰/۸۵ یکسان می باشد. همچنین این حالت در منحنیهای خط ۴۰۰ کیلوولت نیز مشاهده میگردد. این نکته نشان می دهد که شرایط آب و هوایی یک منطقه در میزان کرونا و نوع آرایش هادیها در هر فاز تاثیر بسزایی دارد، چنانکه در شرایط آب وهوای مرطوب، میزان گرادیان ولتاژ از ۲۱/۲ کیلوولت بر سانتیمتر به حدود ۵ تا ۱۵ کیلوولت تغییر می‌یابد و طبیعی است که در این حالت باید از سطح مقطع بیشتری برای جبران تاثیر چگالی هوا استفاده نمود که این مساله سرمایه گذاری بیشتری را نیز طلب می‌کند.



شکل(۵): تاثیر چگالی هوا بر سطح مقطع مجاز هادیها در خطوط ۲۳۰ کیلوولت



شکل(۶): تاثیر چگالی هوا بر سطح مقطع مجاز هادیها در خطوط ۴۰۰ کیلوولت

۵-۲- انتخاب سطح مقطع مناسب هادیها با توجه به قید گرادیان ولتاژ مجاز

جداول (۱)و(۲) حداقل مقطع مناسب هادیها را در چهار سطح ولتاژ استاندارد کشور نشان می دهند. در این محاسبات مقادیر GMD برای خطوط انتقال ۶۳و۱۳۲و۲۳۰و۴۰۰ کیلوولت به ترتیب ۴ و۶ و۸ و۱۰ متر در نظر گرفته شده است.هادیهای انتخاب شده که در جدول آمده است، از هادیهای استاندارد کشور انتخاب شده اند. واضح است که اگر نوع هادیها از میان استانداردهای مختلف جهانی انتخاب گردد قطعاً نتایج متفاوتی خواهد بود.

همانطور که در قسمت قبل نیز اشاره گردید مقطع مناسب هادی از دیدگاه کرونا همواره به معنی مناسب بودن هادی از تمام جهات نمی باشد. مثلاً در جدول(۱)و(۲) هادیها مورد استفاده در مقطع ۱۲۳و۶۳ کیلو ولت از دیدگاه کرونا، مناسب می باشند در صورتیکه سطح مقطع این هادیها کوچکتر از حدی است که بطور معمول در خطوط انتقال کشور مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین در برخی موارد، مقاطع هادیهای مورد استفاده در سطح ۲۳۰و ۴۰۰ کیلوولت از سطح مقطع هادی های بکار گرفته شده در شبکه بیشتر می باشند. در روزهای بارانی و مرطوب، گرادیان ولتاژ از حد ۲۱/۲ کیلو ولت بر سانتی متر ممکن است تا مقادیر بین ۵ تا ۱۵ کیلو ولت بر سانتی متر کاهش یابد. حال اگر در این شرایط بخواهیم سطح مقطع هادیها را انتخاب کنیم مقادیر به صورت آنچه در جدول (۳) آمده است تغییر خواهد نمود.

جدول(۱): حداقل مقطع هادی، بر مبنای گرادیان مجاز ۲۱/۲ کیلوولت بر سانتیمتر و $\delta = 0.9$

$n_s = 4$	$n_s = 3$	$n_s = 2$	$n_s = 1$	GMD(m)	ولتاژ(KV)
Fox	Fox	Fox	Fox	۴	۶۳
Fox	Fox	Mink	Dog	۶	۱۳۲
Fox	Mink	Hyena	Drake	۸	۲۳۰
Dog	Oriole	Drake	*	۱۰	۴۰۰

جدول(۲): حداقل مقطع هادی، بر مبنای گرادیان بحرانی ۲۱/۲ کیلوولت بر سانتیمتر،
درجه حرارت محیط $45^{\circ}C$ و ارتفاع $h = 1500m$

$n_s = 4$	$n_s = 3$	$n_s = 2$	$n_s = 1$	GMD(m)	ولتاژ(KV)
Fox	Fox	Fox	Fox	۴	۶۳
Fox	Fox	Mink	Partridge	۶	۱۳۲
Mink	Dog	Oriole	Cardinal	۸	۲۳۰
Partridge	Hawk	Canary	*	۱۰	۴۰۰

جدول(۳): حداقل مقطع هادی، بر مبنای گرادیان مجاز۱۵ کیلوولت بر سانتیمتر

$n_s = 4$	$n_s = 3$	$n_s = 2$	$n_s = 1$	GMD(m)	ولتاژ(KV)
Fox	Fox	Fox	Mink	۴	۶۳
Fox	Fox	Mink	Oriole	۶	۱۳۲
Mink	Dog	Hyena	Martin	۸	۲۳۰
Oriole	Hawk	Martin	*	۱۰	۴۰۰

۶- نتیجه گیری

با توجه به ضرورت انتقال توان بیشتر در خطوط انتقال نیرو، کمپکت سازی خطوط انتقال یکی از روشهای بهینه‌ای است که اخیرا مورد توجه کارشناسان و محققین صنعت برق قرار گرفته است. همانطور که گفته شد در این تکنولوژی از ترفندها و روشهای خاصی جهت نزدیک سازی فواصل فازی خطوط استفاده می شود. بنابراین طبیعی است که ولتاژ شکست عایقی هوا در این شرایط، کمتر خواهد شد.

در خطوط انتقال معمولی پدیده کرونا وجود دارد ولی در حالت کمپکت این مساله حادتر می‌گردد و در صورت استفاده از خطوط کمپکت بعلت نزدیک سازی فواصل افقی و عمودی فازها، میزان کرونای ایجاد شده نسبت به خطوط انتقال معمولی بیشتر است.

تلفات کرونا یکی از پارامترهای مهم و موثر در انتخاب قطر و تعداد هادیها در هر فاز می باشد، که در ولتاژهای بالای ۲۳۰ کیلو ولت اهمیت آن بیشتر می باشد چون که در این سطوح از ولتاژ اگر گرادیان ولتاژ در سطح هادی از حد شکست هوای اطراف هادیها تجاوز نماید باعث ایجاد حرارت و واکنشهای شیمیایی می‌گردد که در برخی موارد نیز با تولید نور و صدا در اطراف هادی همراه است. با توجه به این نکته که گرادیان ولتاژ و ولتاژ بحرانی در سطح هادیها به پارامترهای مختلفی چون ولتاژ خط انتقال، درجه حرارت، ارتفاع منطقه، قطر هادی، تعداد هادیهای فرعی در هر فاز، فواصل فازها و شرایط سطحی هادیها بستگی دارند، بنابراین می توان با تنظیم و کنترل این پارامترها، میزان کرونا را محدود کرد.

در این مقاله به بحث و بررسی جهت انتخاب سطح مقطع بهینه برای هادیها در شرایط مختلف با توجه به قید گرادیان ولتاژ مجاز پرداخته شد و در انتها نیز برای چند خط مختلف، میزان سطح مقطع بهینه در هادیهای استاندارد و مرسوم ایران محاسبه شد.

البته همانطور که در مقاله نیز اشاره شد، برای انتخاب سطح مقطع مناسب جهت هادیها، پارمترهای دیگری از قبیل جریان مجاز هادیها، میزان جریان اتصال کوتاه، مقاومت مکانیکی، شرایط جوی و محیطی مسیر و تلفات انرژی نیز دخیل هستند که باید در طراحی‌ها مد نظر قرار گیرند. بنابراین توصیه می گردد که در مطالعات آتی به بررسی نقش هر کدام از عوامل فوق در انتخاب سطح مقطع مناسب پرداخته شود.

۷- مراجع

[۱] قدرت اله حیدری، مازیار حیدری، *"نقش زمین در آرایش هادیها، شکل برجها و ولتاژ خطوط انتقال نیرو"*، پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران-آبان ۱۳۷۸.

[۲] قدرت اله حیدری، فرامرز رهبر ، " تعیین حداقل مقاطع هادیها از دیدگاه پدیده کرونا" ، دهمین کنفرانس مهندسی برق ایران (ICEE-2002) ، تبریز ، دانشگاه تبریز ، اردیبهشت ۱۳۸۱

[۳] قدرت اله حیدری، *"کتاب طراحی الکتریکی خطوط انتقال نیرو"*، انتشارات تابش برق - بهمن ۱۳۷۹.

[۴] گزارش پروژه *"استفاده از خطوط انتقال کمپکت باندل جهت استفاده از حریم موجود برای انتقال توان بالاتر"*، شرکت متن (بخش انتقال و توزیع)- بهار ۱۳۸۳.

[5] F. Sganzerla , J.A.A. Casagrande , D.B. Galiano," Electronate Brazila-500 kV and 230 kV Compact Lines : Design and Mechanical Aspects",CIGRE Symposium, Saint Petersburg , Russia,June. 1991.

[6] Gh. Heidari , G.N.Alexandrov, “ Increasing line voltage or subconductors number in each phase “,CIGRE, Paris, France, Sept.1996.

[7] Gh. Heidari , M. Heidari ,” Effect of land price on transmission line design “,CIGRE, Paris, France, Sept. 2002.