مقره‌های خطوط هوایی

مقره‌ها یکی از اجزاء مهم خطوط انتقال هوایی می‌باشند. وظایف اصلی مقره‌ها عبارتند از:

۱- تحمل وزن هادی‌های خطوط انتقال و توزیع برای نگهداری آنها روی پایه‌ها و دکلها در بدترین شرایط بار گذاری (توانایی تحمل بیشترین نیروهای مکانیکی وارده بر مقره‌ها).

۲- جداسازی یا عایق بندی هادیها نسبت به زمین (بدنه) و هادی‌ها با یکدیگر تحت ولتاژ نامی و اضافه ولتاژهای سیستم و در شرایط مختلف محیطی.

به طور کلی، مقره‌ها باید دارای خصوصیات زیر باشند:

* استقامت الکتریکی بالا.
* استقامت مکانیکی بالا.
* بدون ناخالصی و حفره‌های داخلی.
* مقاومت در برابر تغییرات درجه حرارت و عدم تغییر شکل در اثر تغییر دما.
* قابلیت اطمینان بالا.
* ضریب تلفات عایقی کم.
* در برابر نفوذ آب و آلودگی ها مقاوم باشد.

مقره‌ها از لحاظ جنس، شکل، سطح ولتاژ و کاربرد به انواع مختلف تقسیم می‌شوند. انواع مقره‌ها از لحاظ جنس تشکیل دهنده آنها به شرح زیر می‌باشند:

الف- مقره‌های سرامیکی یا چینی (Porcelain Type)

مقره‌های چینی از سه ماده مختلف زیر تشکیل می‌شوند:

- کائولین (آلکالین) یا خاک چینی $AL2O3-2SIO2-2H2O$ به مقدار ۴۰ تا ۵۰ درصد.
- سیلیکات آلومینیوم (فلداسپات) $K2O-AL2O3-6SIO2$ به مقدار ۲۵ تا ۳۰ درصد.
- خاک کوارتز $SiO2$ به مقدار حداکثر ۲۵ درصد.

این سه نوع ماده به ترتیب برای بالا بردن استقامت حرارتی، الکتریکی و مکانیکی به کار می‌روند. هر چه فلداسپات بیشتر باشد استقامت الکتریکی مقره افزایش می‌یابد و هر چه مقدار کوارتز و اکسید آلومینیم بیشتر شود، استقامت مکانیکی آن بیشتر شده و با افزایش کائولین، استقامت حرارتی آن بیشتر می شود.

برای تهیه مقره سرامیکی، مواد فوق را با کمی آب خالص مخلوط می‌کنند تا به صورت گل و خمیر در آید. سپس درصد رطوبت گل را پایین می‌آورند و تحت خلاء آن را پرس می‌کنند تا هوا و سایر گازها از داخل آن خارج شود. سپس این گل را در قالبهای معینی شکل داده و در کوره حرارت می‌دهند تا پخته شود و رطوبت آن نیز گرفته شود. پس از پخته شدن آن را به آرامی سرد می‌کنند تا ترکی در آن ایجاد نشود. پس از این مرحله یک لایه لعاب شیشه‌ای بر روی آن می‌ریزند تا سطح آن کاملاً خالی از وجود حبابها و ترک‌های مویین گردد. لعاب شیشه‌ای علاوه بر افزایش استقامت مکانیکی مقره، با ایجاد سطح صاف و صیقلی قدرت چسبندگی گرد و غبار و نفوذ آنها و رطوبت را کاهش می‌دهد. همچنین لعاب باعث افزایش مقاومت سطحی عایق می‌شود. استقامت الکتریکی سرامیک بین ۱۲

WWW.Niasati.Profile.Semnan.ac.ir

تا ۲۸ (kV/cm) می‌باشد. از ویژگی مهم سرامیک، شکل گیری آسان و مقاومت در برابر مواد شیمیایی و تغییرات جوی می‌باشد.

مقره‌های چینی در انواع بشقابی، سنجاقی، یکپارچه و غیره تولید می‌شوند. از مقره‌های بشقابی در تیرهای انتهایی و میانی و مقره سنجاقی و یکپارچه در تیرهای میانی خطوط انتقال استفاده می‌شود.

ب- مقره‌های شیشه‌ای (Glass Type)

معمولاً شیشه را در درجه حرارت بالا با مخلوطی از مواد مختلف از جمله آهک و پودر کوارتز ذوب کرده و سپس به طور ناگهانی آن را سرد نموده و قالب ریزی می‌کنند. این عمل باعث مستحکم شدن شیشه می‌شود. بدین ترتیب مقره شیشه‌ای با استقامت مکانیکی خیلی زیاد بدست می‌آید که در مقابل لب پریدگی از سرامیکی مقاومتر است و استقامت مکانیکی فشاری آن ۱/۵ برابر چینی می‌باشد. اما استقامت مکانیکی شیشه در برابر نیروهای خمشی، کمتر از سرامیک است. استقامت الکتریکی شیشه خیلی بیشتر از عایق‌های سرامیکی می‌باشد (بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوولت بر سانتی متر).

مزیت دیگر شیشه، کوچک بودن ضریب انبساط حرارتی آن می‌باشد. در نتیجه تغییر شکل نسبی آن در اثر تغییر درجه حرارت، خیلی کم است. همچنین در مقره‌های شیشه‌ای، قبل از بروز ترک، کاملاً خرد می‌شوند و لذا از روی زمین به راحتی می‌توان مقره معیوب را تشخیص داد. برخلاف مقره‌های چینی، در هنگام ساخت مقره‌های شیشه-ای، معمولاً حفره در آن به وجود نمی‌آید و اگر ترک یا حفره‌ای هم باشد به راحتی قابل مشاهده است. به علاوه به علت عبور نور خورشید از شیشه در اثر شفاف بودن، مقاومت آن در برابر نور خورشید بیشتر است.

معایب مقره شیشه‌ای عبارتند از:

۱- رطوبت به راحتی در سطح آن تقطیر می‌شود (تشکل شب نم و قطرات ریز آب روی آن).

۲- به علت تغییر شکل نسبی داخلی پس از سرد شدن، نمی‌توان مقره‌های با ابعاد بزرگ از جنس شیشه ساخت.

۳- گرد و خاک را بیشتر به خود جذب می‌کند.

۴- در برابر ضربات مستقیم، شکننده می‌باشد.

ج- مقره‌های پلاستیکی

این مقره‌ها از جنس پلاستیک و از ترکیبات شیمیائی اتیلن، پروپیلن و رزین می‌باشد. مزیت این مقره‌ها در دفع خوب آب (آب گریزی) می‌باشد زیرا پلاستیک این مزیت را دارد که قطرات آب روی سطح آن جاری نمی‌شود تا با قطرات دیگر ترکیب شده مسیری را برای هدایت قوس فراهم کند. در صورتی که در مقره‌های چینی و شیشه‌ای آب به راحتی روی سطح مقره جاری می‌شود.

د- مقره‌های کامپوزیتی یا ترکیبی

مقره‌های کامپوزیت یا ترکیبی از دو ماده عایقی مختلف، یکی به عنوان پوسته یا روکش پلیمری برای تأمین خواص الکتریکی و دیگری به عنوان هسته کامپوزیت برای تأمین خواص مکانیکی آن، ساخته می‌شوند. از مزیت‌های مقره-های مقره‌های کامپوزیتی می‌توان به وزن سبک و مقاومت در برابر خرابکاری (تخریب توسط انسان) نام برد. به طور کلی، مقره‌های کامپوزیتی دارای سه بخش زیر می‌باشند:

۱- هسته (میله) کامپوزیت: هسته کامپوزیت یک میله پلیمری تقویت شده با فیبر (FRP)[۱] می‌باشد که ضمن تامین استقامت عایقی لازم، وظیفه تحمل بار کششی وارد شده از طرف هادی به دکل را بر عهده دارد.

۲- روکش (چتر) پلیمری: روکش پلیمری[۲] روی هسته مقره قرار می‌گیرد و وظیفه آن حفاظت هسته از هوازدگی، اثرات مخرب رطوبت و شرایط جوی و همچنین افزایش ولتاژ لازم برای شکست الکتریکی و ایجاد جرقه، می‌باشد.

۳- یراق آلات: هسته مقره کامپوزیت از دو انتها دارای یراق آلات[۳] لازم برای برقراری ارتباط مکانیکی و انتقال بار مکانیکی از هادی به دکل می‌باشد.

مزایای مقره‌های کامپوزیتی:

وزن کمتر، انعطاف پذیری عملکرد و طول عمر بهتر حتی در شرایط آلودگی سنگین و آب و هوای بد، ضایعات کمتر در مراحل تولید، استقامت بهتر در برابر فشارهای خمشی، بارهای زیاد ناگهانی (بارهای ضربه‌ای) و نیز تخریب انسانی، خاصیت عایقی بهتر نسبت به انواع مرسوم، پایینتر بودن حجم سرمایه گذاری اولیه به منظور ساخت مقره کامپوزیت نسبت به انواع چینی.

مقره‌های سیلیکونی از انواع مقره‌های کامپوزیتی و دارای خاصیت آبگریزی[۴] می‌باشند. خاصیت آبگریزی از تشکیل نوار آب بر روی سطح سیلیکون جلوگیری می‌کند و آب بر روی آن به صورت قطره قطره باقی می‌ماند و مانع کاهش شدید مقاومت سطحی مقره می‌شود. از اینرو برای مناطق با آلودگیهای مختلف و زیاد و یا غبارآلود استفاده از پوششهای سیلیکونی یکی از روشهای مناسب می‌باشد. استفاده از مقره‌های سیلیکونی باعث کم شدن هزینه شست‌وشو و نگهداری می‌شود. مزیت دیگر مقره‌های سیلیکونی نسبت به سایر مقره‌های کامپوزیت مقاومت بسیار خوب در برابر اشعه ماوراء بنفش خورشید است که باعث شده عمر مفید پوششهای سیلیکونی در مقایسه با سایر پوششها طولانی‌تر باشد. قابل انعطاف‌بودن مقره‌های سیلیکونی از شکستگی و پارگی آنها و آسیب‌پذیر بودن در برابر ضربات مکانیکی جلوگیری می‌کند.

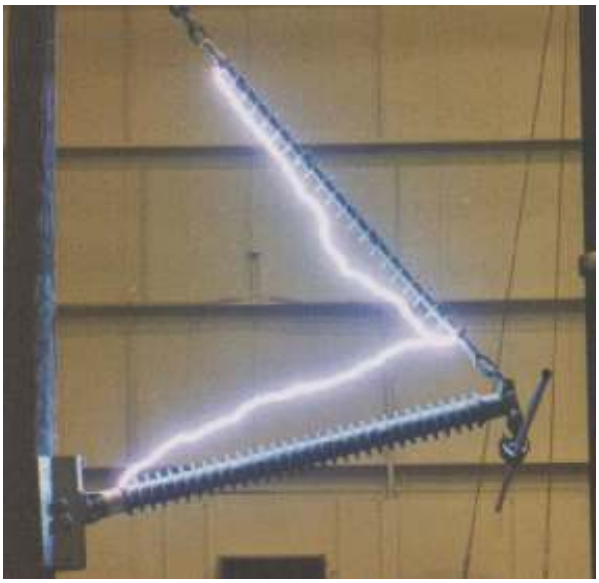
شکست الکتریکی در مقره‌ها:

ولتاژ اعمالی بر مقره‌ها و عملکرد آن در مقابل اضافه ولتاژها شکل و ساختار آنها را تعیین می‌نماید. شکست الکتریکی بر روی مقره‌ها به دو شکل زیر صورت می‌گیرد:

* در داخل مقره جرقه‌ای زده شده و موجب سوراخ شدگی (پانچ) و از بین رفتن خاصیت عایقی مقره می‌شود.
* تخلیه در سطح عایق صورت می‌گیرد و جرقه‌هایی در سطح آن زده می‌شود و به این ترتیب ارتباط الکتریکی در طرفین عایق برقرار می‌شود؛ که رطوبت و آلودگی در سطح مقره در این نوع تخلیه تأثیر گذارند.

۱- Fiber Reinforced Polymeric Rod
۲- Polymeric Housing or Polymeric Sheds
۳- End-Fittings
۴- Hydrophobic

سوراخ شدن مقره در اثر اضافه ولتاژها



بروز قوس الکتریکی روی دو سر مقره

* در ساخت و انتخاب مقره سعی موارد زیر باید مد نظر قرار گیرند:

** سطح مقره باید کاملاً صاف و صیقلی باشد تا امکان نشستن گرد و غبار و آلودگی روی آن به حداقل برسد.

** سطح مقره باید این قابلیت را داشته باشد که هنگام ریزش باران شسته شود و باران روی آن نماند.

** جهت جلوگیری از جریان نشتی لازم است طول خزشی[۵] مقره‌ها زیاد باشد. طول خزشی مقره عبارت است از کوتاهترین مسیری که لازمست جرقه برای رسیدن از ابتدا تا انتهای مقره طی کند. هر چه این مسیر طولانی‌تر باشد امکان ایجاد قوس کمتر می‌شود. افزایش این مسیر موجب سنگین شدن مقره می‌شود، بنابراین مقره را به صورت دندانه دندانه می‌سازند و به این ترتیب طول مقره کوتاهتر بوده ولی مسیر عایقی آن افزایش می‌یابد.

** چون سوراخ شدن یا پانچ مقره موجب از بین رفتن آن می‌شود باید به هر شکل ممکن از آن جلوگیری نمود. برای این کار باید فاصله بین قسمت‌های فلزی بالا یا کلاهک و سوزن فلزی پایین مقره، بطوری انتخاب شود که قبل از وقوع جرقه در داخل مقره، جرقه سطحی زده شود و از تولید جرقه در داخل مقره جلوگیری گردد.

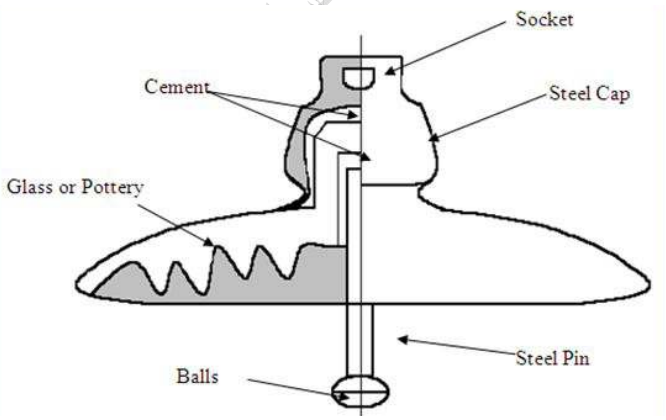
** نوع مقره باید با توجه به شرایط محیطی انتخاب شود و همچنین مسائل اقتصادی نیز در نظر گرفته شود.

مقره‌ها با توجه به کاربرد و سطح ولتاژ، در انواع مختلف مثل مقره چرخی، سوزنی، بشقابی (معمولی، ضد مه، آئرودینامیک، زنگوله‌ای شکل)، یکپارچه، مقره عبوری (بوشینگ)، مقره اتکائی (پست) تولید و استفاده می‌شوند. عموما از مقره‌های سوزنی، بشقابی، یکپارچه و استوانه‌ای (کامپوزیتی) در خطوط هوایی استفاده می‌شوند. با توجه به اینکه مقره‌های بشقابی رایجترین نوع مقره‌های خطوط انتقال هوایی می‌باشد، در ادامه به بررسی این مقره پرداخته می‌شود.

۵- Creepage distance

مقره‌های بشقابی (Disc Type Insulators)

مقره‌های بشقابی از رایجترین نوع مقره‌ها در خطوط انتقال، توزیع و همچنین پستهای برق می‌باشند. عموما این نوع مقره‌ها به صورت تکی (شبکه‌های توزیع فشار متوسط) یا چندتایی و به صورت زنجیر مقره (Insulator String) مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعداد مقره‌های بشقابی در زنجیر مقره بستگی به سطح ولتاژ، شرایط محیطی محل نصب (آلودگی، ...) و سطح اضافه ولتاژهای سیستم دارد. ارتباط مقره‌های بشقابی زنجیر مقره با یکدیگر توسط دو قطعه فلزی که با پودر سیمان و شیشه و چسب مخصوص به مقره محکم می‌شود، صورت می‌گیرد. هر مقره بشقابی از یک صفحه بشقاب از جنس چینی یا شیشه تشکیل شده است که در قسمت بالایی آن، یک کلاهک (cap) چدنی گالوانیزه توسط سیمان مخصوصی به نام آلومینا که دارای استقامت الکتریکی و مکانیکی و قدرت چسبندگی بالایی می‌باشد به شیشه یا چینی متصل می‌گردد. در قسمت پایین مقره نیز یک میله (pin) فولادی گالوانیزه به وسیله سیمان آلومینا به مقره متصل می‌شود. همچنین مسیر زیر بشقابها به صورت موج دار است تا طول مسیر جریان نشتی افزایش یابد. پین فولادی هر مقره در داخل حفره کلاهک مقره پایینی قرار گرفته و با زدن گیره اطمینان (اشپیل Split-Pin) اتصال پین و کلاهک محکم می‌شود. استقامت مکانیکی مقره‌ها معمولاً بین ۴۰ تا ۳۰۰ کیلونیوتن می‌باشد.



مزایای استفاده از مقره‌های بشقابی عبارتند از:

۱- هرچند هر واحد مقره بشقابی برای یک ولتاژ نامی پایینی (در حدود ۱۱ کیلو ولت) طراحی می‌شود. اما متناسب با ولتاژ خط می‌توان به تعداد دلخواه از این بشقابها را به هم متصل نمود تا یک زنجیره آن بتواند ولتاژ خط را تحمل کند (قابلیت افزایش طول زنجیر مقره با افزایش تعداد مقره‌ها متناسب با سطح ولتاژ).

حداقل تعداد مقره‌های بشقابی در زنجیر مقره خطوط توزیع و انتقال (به طور نمونه)

ولتاژ کاری سیستم (کیلوولت)	حداقل تعداد مقره بشقابی در هر زنجیر مقره	
	زنجیر مقره آویزی	زنجیر مقره کششی
۱۱	۱	۱
۳۳	۲	۳
۶۶	۵	۶
۱۳۲	۹	۱۰
۲۲۰	۱۴	۱۵
۴۰۰	۲۱	۲۲

WWW.Niasati.Profile.Semnan.ac.ir

۲- اگر هر یک از بشقابهای یک زنجیر مقره، آسیب یا صدمه ببیند فقط لازم است همان یک بشقاب تعویض شود و نیازی به تعویض کل زنجیر مقره نیست (اقتصادی بودن مقره).
۳- در زنجیر مقره‌های آویزی، چون زنجیر مقره به بازوی دکل خط آویزان است و می‌تواند به صورت آزادانه حرکت نماید، حداقل فشار مکانیکی بر مقره‌ها وارد می‌شود.
۴- اگر بار مکانیکی خط زیاد باشد (در فواصل طولانی بین دو دکل مجاور، هنگام عبور خطوط انتقال از روی رودخانه‌ها، دره‌ها، اتوبان‌ها،...) می‌توان از زنجیر مقره‌های دوتایی یا بیشتر استفاده نمود.
۵- نسبت به سایر انواع مقره‌ها در شرایط و سطح ولتاژ یکسان، قیمت مقره‌های بشقابی (زنجیر مقره) کمتر می‌باشد.
۶- مقره‌های بشقابی (زنجیر مقره) دارای انعطاف پذیری بیشتر در برابر انواع نیروهای مکانیکی می‌باشند.
۷- مقره‌های بشقابی در کلیه سطوح ولتاژی قابل استفاده می‌باشند.

*انواع مقره‌های بشقابی:

الف- از لحاظ جنس: مقره‌های سرامیکی یا چینی و مقره‌های شیشه‌ای.

مقره بشقابی شیشه‌ای

مقره بشقابی سرامیکی

ب- از لحاظ کاربرد:

۱- مقره استاندارد (Standard Type)

این مقره دارای انواع مقره‌های نوع کلاهکی[۶] و مقره‌های نوع شیار و زبانه[۷] می‌باشند. از این نوع مقره‌ها برای مناطق معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲- مقره بشقابی ضد مه (Anti-Fog Type)

از این مقره‌ها در مناطق آلوده و مه آلود که به فاصله خزشی بیشتری نیاز دارند استفاده می‌شود. در این مقره شیارهای پایین بزرگتر از شیارهای مقره‌های معمولی می‌باشد. ولی وزن آنها زیادتر بوده و موجب افزایش بار مکانیکی روی دکلها می‌شود.

۶- Ball & Socket Type Insulator
۷- Tongue & Clevis Type Insulator

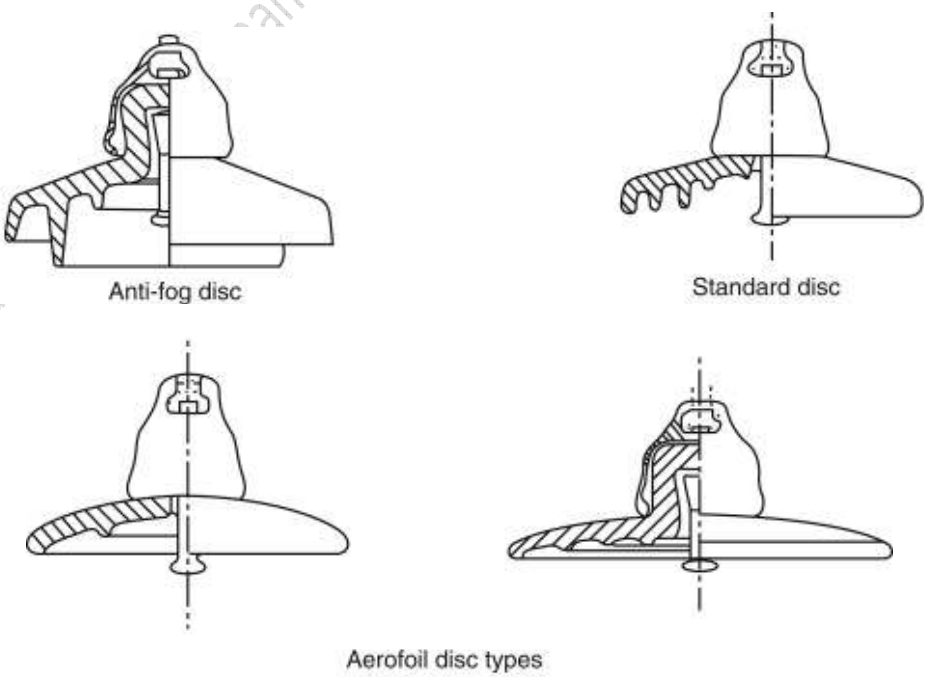
۳- مقره بشقابی ضد آلودگی یا زنگوله‌ای (Anti-Pollution Type)

مقره‌های ضد آلودگی یا زنگوله‌ای[۸] به شکلی ساخته می‌شوند که امکان نشستن گرد و خاک و آلودگی روی آنها حداقل باشد. این نوع مقره‌ها دارای سطح با شیب بیشتر و همچنین دارای فاصله خزشی بلندتر می‌باشند. در این نوع مقره‌ها به دلیل افزایش فاصله خزشی و مقاومت سطحی، جریان نشتی کاهش یافته و دیرتر جرقه سطحی زده می‌شود. همچنین به دلیل سطح شیبدار، سطح این نوع مقره‌ها در اثر بارندگی بهتر تمیز می‌شوند. از این مقره‌ها در مناطق دارای آلودگی صنعتی یا آلودگی شدید و بارندگی کم که به فاصله خزشی بیشتری نیاز است استفاده می‌شود.

۴- مقره‌های بشقابی آئرودینامیک (Aerofoil Insulator)

از این مقره‌ها در مناطق بادگیر استفاده می‌شود زیرا سطح بادگیر کمتری نسبت به دیگر مقره‌ها دارند و در زنجیر مقره انحراف زاویه کمتری داشته و نیروهای وارده به دکل کم می‌شود. به علت فاصله خزشی کم این نوع مقره‌ها، جهت حفظ سطح استقامت عایقی در زنجیر مقره از تعداد بیشتری از آنها استفاده می‌شود که منجر به افزایش هزینه خط می‌گردد.

مقره استاندارد مقره ضد مه مقره ضد آلودگی



Aerofoil disc types

۸- Bell Type Insulator

***انواع زنجیر مقره‌های خطوط انتقال:**

زنجیر مقره‌های خطوط انتقال برحسب نوع طراحی دکلها، نیروهای وارده، شرایط محیطی و غیره دارای انواع مختلف زیر می‌باشند.

الف- زنجیر مقره آویزی (Suspension Type)

۱- زنجیر مقره I شکل (تک زنجیره و چند زنجیره)

*** زنجیر مقره I شکل تکی (I - String):** این زنجیر مقره‌ها در مواردی استفاده می‌شوند که نیروی مکانیکی چندان زیاد نباشد. معمولاً در هادی‌های تک سیمه یا باندل دوتایی از آنها استفاده می‌شود.

*** زنجیره مقره آویزی دوتایی (II - String):** در این حالت برای افزایش استقامت مکانیکی، از دو ردیف زنجیر مقره به موازات یکدیگر و به شکل II مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً در هادی‌های باندل از این نوع استفاده می‌شود. در صورت نیاز به استقامت مکانیکی بالاتر، ممکن است بیش از دو زنجیر مقره موازی هم استفاده شود.

۲- زنجیر مقره آویزی V شکل (تک زنجیره و چند زنجیره در هر بازو)

*** زنجیره مقره آویزی V شکل (V - String)**

در مناطق با سرعت باد زیاد، نوسانات بوجود آمده بر روی زنجیر مقره و در نتیجه انحراف بیش از حد آن می‌تواند منجر به کاهش فاصله عایقی گردد. جهت جلوگیری از این مشکلات در این مناطق از زنجیر مقره V شکل استفاده می‌شود تا از نوسانات زنجیره مقره جلوگیری شود. در زنجیره مقره V شکل معمولا طول دو بازو برابر می‌باشد. اما در مواردی که به دلیل زاویه خط نیاز به بازوهای متفاوت باشد، می‌توان با کاهش و یا افزایش طول یک بازو به این حالت دست پیدا کرد. معمولاً زاویه بین دو بازو در زنجیره مقره بین ۹۰ تا ۱۰۰ درجه می‌باشد.

***- زنجیره مقره آویزی V شکل (Double V - String)**

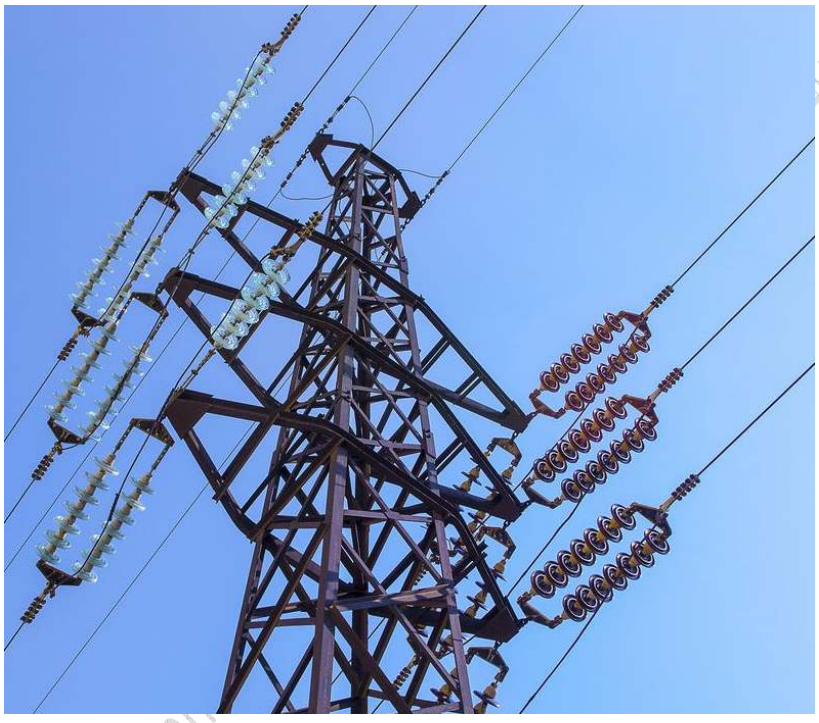
برای داشتن استقامت مکانیکی بیشتر، زنجیره مقره V شکل می‌تواند به صورت دوتایی و بیشتر نصب شود.

زنجیر مقره آویزی I شکل

زنجیر مقره آویزی V شکل

ب- زنجیر مقره کششی (Tension Type)

از زنجیر مقره کششی در جاهایی که نیروی کشش افقی زیادی به مقره وارد می‌شود استفاده می‌گردد. از این مقره ها در دکلهای ابتدایی و انتهایی خطوط انتقال و توزیع و در پایه‌هایی که در مسیر خط از حالت مستقیم خارج شده و یا نسبت به افق، زاویه پیدا می‌کنند (دکلهای زاویه‌ای)، استفاده می‌شوند. این زنجیر مقره‌ها به صورت افقی و سری با هادی خط نصب می‌شوند و باید نیروی کششی خط را در پایه‌ها تحمل نمایند. لذا برای تحمل نیروی کششی زیاد، استقامت مکانیکی آنها نسبت به زنجیر مقره‌های آویزان بیشتر است. این زنجیر مقره‌ها می‌توانند به صورت دوتایی یا بیشتر مورد استفاده قرار گیرند که انتخاب آن بستگی به تعداد هادی‌های هر فاز و همچنین شرایط بارگذاری و نوع مقره دارد.



زنجیر مقره کششی چندتایی (با دو زنجیر موازی برای افزایش استحکام مکانیکی)

ج- زنجیره مقره جامپر (Jumper Insulator String)

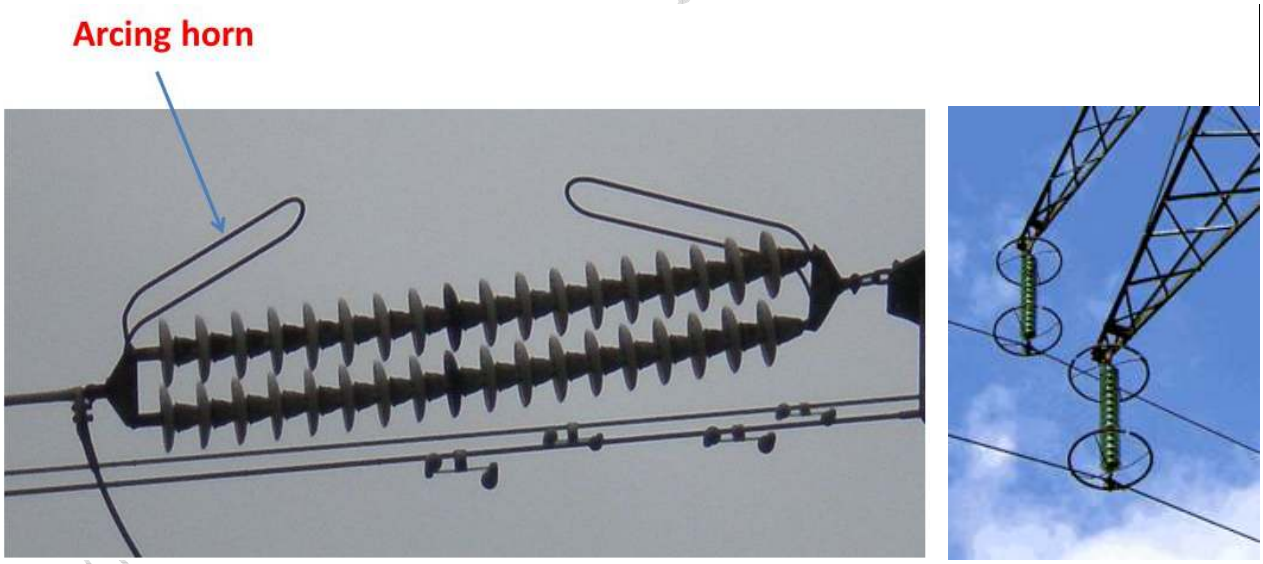
این زنجیر مقره، سیم جامپر ارتباطی فازها را در برج کششی به صورت آویزی نگه داشته و از حرکت جانبی آن جلوگیری می‌کند. نیروی مکانیکی وارده به این نوع زنجیر مقره چندان قابل ملاحظه نیست.

WWW.Niasati.Profile.Semnan.ac.ir

نمونه‌هایی از زنجیر مقره کششی و جامپر

عیب اصلی زنجیر مقره‌ها

عیب اصلی زنجیر مقره‌ها، عدم توزیع یکنواخت و یکسان ولتاژ روی مقره‌ها می‌باشد. استفاده از حلقه کرونا[۹]، شاخکهای جرقه زن[۱۰] ویا حلقه‌های حفاظتی[۱۱]، باعث یکنواختر شدن ولتاژ روی مقره‌های زنجیر مقره می‌شود.



حلقه کرونا و شاخک جرقه زن روی زنجیر مقره

[۹]- Corona ring
[۱۰]- Spark gap
[۱۱]- Protective ring