

تحلیل پایداری خطوط انتقال نیرو تحت اثر هم‌زمان ریزش یخ از روی کابل‌ها و وزش باد

هادی سرمستی^۱، کریم عابدی^۲، محمدرضا چناقلو^{۳*}

^۱ دکتری مهندسی سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۰، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۲/۲۰

چکیده

در مناطق سردسیر، احتمال تشکیل یخ در اثر بارندگی و برودت هوا، روی کابل‌ها و دکل‌های انتقال نیرو وجود دارد. یخ بستن روی کابل‌ها و دکل‌ها یک بارگذاری استاتیکی است، که با انجام تحلیل استاتیکی مقدار تغییرشکل‌های اضافی ایجادشده در خط انتقال نیرو تعیین می‌شود. این بارگذاری و تغییر شکل در طراحی سازه در نظر گرفته شده و لذا از این بابت خط انتقال نیرو ایمن می‌باشد. در اثر عواملی نظیر افزایش دما، وزش باد و ... احتمال ریزش ناگهانی یخ از روی کابل‌های خط انتقال نیرو وجود دارد، که باعث به هم خوردن تعادل نیروی کششی طولی در دهانه‌های طرفین دکل انتقال نیرو می‌شود. علاوه بر این، ارتعاشی که در اثر ریزش یخ، در خط انتقال رخ می‌دهد، بار دینامیکی شدیدی را به خط انتقال وارد می‌کند. در صورتی که این ارتعاش، با ارتعاش ناشی از وزش باد همراه شود، پایداری خط انتقال بیشتر تهدید می‌شود. در این مقاله، بررسی پایداری خط انتقال نیرو، تحت اثر ریزش ناگهانی یخ از روی کابل‌های خط انتقال نیرو و وزش باد مورد توجه قرار می‌گیرد. میزان قطر یخ روی کابل‌ها و سرعت باد براساس آیین‌نامه بارگذاری انتخاب شده است. تحلیل پایداری خط انتقال نیرو نشان می‌دهد، که در اثر یخ با ضخامت در نظر گرفته‌شده در طراحی سازه و ریزش آن در یک دهانه همراه با وزش باد، خط انتقال نیرو پایدار نخواهد بود. ناپایداری به صورت تسلیم در اعضا بالایی دکل انتقال نیرو شروع می‌شود و سپس به اعضا در ارتفاع میانی دکل منتقل شده و در نهایت به قسمت نسبتاً بزرگی از دکل انتقال نیرو گسترش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: دکل انتقال نیرو، تحلیل اجزا محدود، تحلیل تاریخچه زمانی، بار باد، ریزش یخ.

۱- مقدمه

عوامل مذکور شرایط بارگذاری پیچیده‌ای را ایجاد می‌کند که در بررسی پایداری دکل انتقال نیرو باید مدنظر قرار بگیرد. در این ارتباط تحقیقات محدودی در گذشته انجام شده است، که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

Roshan Fekr و McClure (۱۹۹۸) مدلی عددی برای بررسی اثر ریزش یخ در یک سیستم با دو دهانه کابل را ارائه نمودند. پارامترهای مختلفی نظیر تغییرات در طول دهانه‌ها، میزان ریزش یخ و ضخامت‌های متفاوت یخ در این بررسی مدنظر قرار گرفت. مدل مذکور به صورت دوبعدی بود و تغییر شکل‌های خارج صفحه، اندرکنش کابل و دکل، اثر تغییر امتداد خط انتقال و وزش باد در نظر گرفته نشد. Savadjiev و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از بررسی آماری داده‌های هواشناسی و با در نظر گرفتن عواملی نظیر دمای هوا و سرعت و جهت وزش باد، الگوی بارگذاری برای در نظر گرفتن اثر یخ و ریزش آن روی خط انتقال ارائه نمودند. Kalaman

خطوط انتقال نیرو تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی ناشی از عوامل جوی قرار می‌گیرند. یکی از بارگذاری‌های دینامیکی، بار ناشی از ریزش یخ تشکیل شده روی کابل‌ها می‌باشد. دلیل این پدیده، افزایش دمای هوا و ارتعاش کابل‌ها ناشی از وزش باد می‌باشد. تشکیل شدن یخ روی کابل، باعث افزایش تغییر شکل کابل، افزایش سطح جانبی آن و در نتیجه افزایش نیروی جانبی باد روی خط انتقال نیرو می‌شود. علاوه بر این، ریزش ناگهانی یخ از روی کابل‌ها باعث ارتعاش عمودی در کابل می‌شود. در اثر حذف شدن یخ در یک طرف دکل انتقال نیرو، سطح جانبی کابل کاهش یافته و در نتیجه نیروی باد اعمالی به آن کاهش می‌یابد. همچنین بار ثقلی ناشی از وزن یخ نیز کاسته شده و در نتیجه نیروی نامتعادل طولی در کابل و همچنین ارتعاش عمودی و جانبی نامتقارنی در اطراف دکل انتقال نیروی مورد نظر ایجاد می‌شود.

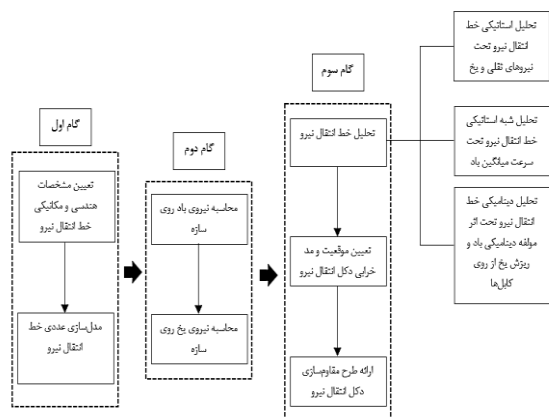
* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۴۵۹۳۲۹

با در نظر گرفتن اندرکنش خط و دکل‌های انتقال نیرو می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این بررسی در نظر گرفتن اثر هم‌زمان ریزش یخ در دهانه‌ای از خط انتقال نیرو و ماندن یخ روی سایر دهانه‌ها به‌همراه وزش باد می‌باشد. با توجه به این‌که خرابی دکل انتقال نیرو هزینه‌های گزافی را به‌صورت انتقال نیرو اعمال می‌کند، این موضوع مهم می‌باشد.

در تحقیق حاضر اثر هم‌زمان افتادن یخ در دهانه‌ای از خط انتقال نیرو و وزش باد با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی و نتایج آن ارائه شده است. خط انتقال نیروی مذکور دارای پنج دکل انتقال و شش دهانه انتقال نیرو، مربوط به خط انتقال نیروی ۴۰۰ کیلوولت نیروگاه خوی - ارومیه می‌باشد. مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدل شده و بار باد با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی گردیده است. به‌منظور تعیین سرعت باد بحرانی برای خط انتقال نیرو، از تحلیل نموی با افزایش گام‌به‌گام سرعت باد استفاده شده است. با استفاده از نتایج این تحقیق، نقاط ضعف دکل انتقال نیرو مشخص گردید. در ادامه تحقیق مقاوم‌سازی دکل انتقال نیرو مدنظر قرار گرفت و پایداری سازه برای بارگذاری باد و ریزش یخ از روی کابل تأمین گردید. نتایج تحقیق حاضر در مقاوم‌سازی دکل‌های موجود و همچنین طراحی خطوط انتقال نیروی جدید می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۲- روش تحقیق

مراحل انجام تحلیل پایداری خط انتقال نیرو، تحت اثر هم-زمان دو بارگذاری باد و ریزش یخ از روی کابل‌ها، مطابق با فلوجارت نشان داده شد در شکل (۱) می‌باشد. در ادامه به شرح گام‌های فرآیند پرداخته می‌شود.



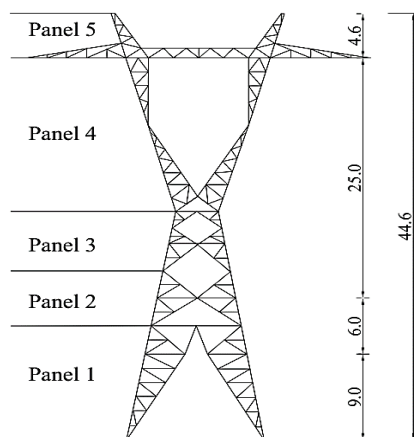
شکل ۱- مراحل انجام تحلیل پایداری خط انتقال نیرو

و همکاران (۲۰۰۷) به‌منظور بررسی اثر ریزش یخ از روی کابل یک دهانه، چهار نوع بارگذاری پالسی را ارائه نمودند. این مطالعه به‌صورت عددی و بدون مدل کردن دکل‌های انتقال نیرو انجام شد. Fengli و همکاران (۲۰۱۰) مدل سه‌بعدی از خط انتقال نیرو را برای بررسی اثر رفتار دکل‌های انتقال نیرو روی دامنه ارتعاش کابل ناشی از ریزش یخ ارائه نمودند. ملاحظه شد که اندرکنش دکل و خط تأثیر چندانی روی دامنه ارتعاش ندارد. به‌هرحال، اثر وزش باد در این مطالعه در نظر گرفته نشد. Meng و همکاران (۲۰۱۱) مدل آزمایشگاهی از کابل یک دهانه را برای بررسی دامنه ارتعاش کابل ارائه نمودند. برای در نظر گرفتن اثر یخ از بارهای متمرکز استفاده شد. سپس مدلی عددی نیز ارائه شد، که نتایج دو روش با هم مقایسه گردید که می‌تواند در طراحی خطوط جدید استفاده شود. به‌هرحال، اندرکنش خط انتقال نیرو و دکل‌های انتقال در این بررسی در نظر گرفته نشد. در ادامه این کار، نویسندگان مقاله، مدل عددی را برای تعیین میرایی خط انتقال نیرو در برابر بار ریزش یخ از روی کابل‌ها ارائه نمودند (Meng و همکاران، ۲۰۱۲). بدین منظور از اندازه‌گیری‌های میدانی استفاده شد، سپس با استفاده از آزمون‌وخطا میزان این میرایی به کمک روش عددی و با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تعیین گردید. Kollar و همکاران (۲۰۱۳) دو نوع بارگذاری برای در نظر گرفتن ریزش یخ از روی کابل‌ها ارائه نمودند. این بارگذاری‌ها بر روی خط انتقال نیرو سه دهانه‌ای اعمال شد. هدف از این بررسی، تأثیر استفاده از فاصله‌نگهدارها در خطوط چندفازی، بر روی دامنه ارتعاش کابل در اثر ریزش یخ بود. مشخص گردید که، استفاده از این ابزار، دامنه ارتعاشی کابل را کاهش می‌دهد. Yan و همکاران (۲۰۱۵) روشی را برای در نظر گرفتن اثر افتادن یخ و وزش باد روی کابل در تحلیل‌های عددی ارائه نمودند. روش مذکور با تغییر چگالی مصالح و در نظر گرفتن نیروی یخ و باد به‌صورت نیروی حجمی عمل می‌نماید. با استفاده از روش ارائه‌شده، دامنه ارتعاش کابل با دهانه‌های مختلف بررسی شد و در نهایت رابطه برای تعیین این دامنه مشخص شد. Wu و همکاران (۲۰۱۶) روشی را براساس معیارهای انرژی برای اندازه‌گیری دامنه ارتعاشی کابل ارائه و با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از روش عناصر محدود، نتایج را صحت‌سنجی نمودند. با مقایسه، دامنه ارتعاشی کابل با استفاده از روش ارائه‌شده و روش‌های سایر محققین مشخص شد، که روش ارائه‌شده توسط این محققین نتیجه دقیق‌تری را ارائه می‌کند.

با توجه به‌مرور تحقیقات پیشین، مشخص می‌شود که تحقیق در زمینه اثر ریزش یخ روی خطوط انتقال نیرو به‌صورت محدود انجام شده است. علاوه بر این، تحقیقات انجام‌شده، عمدتاً روی تعیین دامنه ارتعاشی کابل انتقال تمرکز داشته و اندرکنش کابل و دکل انتقال بررسی نشده است. یکی از مهم‌ترین بررسی‌هایی که در این زمینه می‌توان انجام داد، بررسی پایداری خطوط انتقال نیرو

۲-۱- مشخصات خط انتقال نیرو

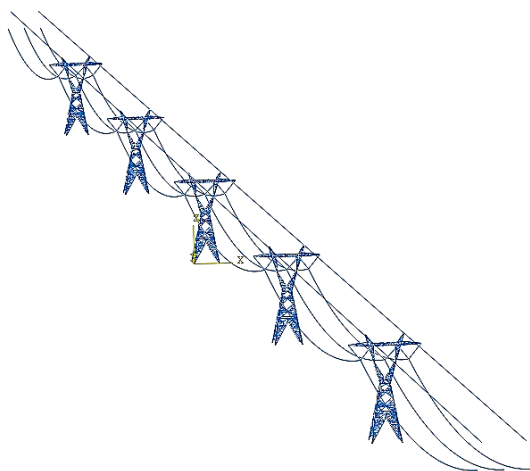
دکل خودایستایی که برای انتقال برق ۴۰۰ کیلوولت طراحی شده است، در نرم افزار ABAQUS مدل شده است. شکل (۲) هندسه دکل از نوع LT را نشان می‌دهد. خط انتقال نیروی مورد بررسی برای انتقال برق بین نیروگاه‌های خوی-ارومیه، واقع در شمال غرب ایران، احداث شده است. خط انتقال نیرو از پنج دکل و شش دهانه ۴۰۰ متری با سه کابل انتقال برق و دو کابل محافظ تشکیل شده است. کابل‌های محافظ از بالای دکل و کابل‌های انتقال برق از ارتفاع ۳۴ متری آویزان شده‌اند. انتهای کابل‌ها در دهانه‌های انتهایی با تکیه‌گاه ساده مفصلی مهار شده‌اند. پایه‌های دکل‌ها به صورت مفصلی به زمین تکیه داده شده‌اند. نقشه‌ها و مشخصات مصالح با توجه به نقشه‌های موجود انتخاب شده‌اند. اعضا نبشی تشکیل دهنده دکل، از فولاد با مقاومت کششی زیاد و با تنش تسلیم ۳۵۰ مگاپاسکال ساخته شده‌اند. از سخت‌شدگی مصالح صرف نظر شده و حالت الاستوپلاستیک^۱ کامل در نظر گرفته شده است. همچنین، مدول الاستیسته فولاد ۲۰۰ GPa و نسبت پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است. معیار فون مایسس به عنوان معیار تسلیم مصالح در نظر گرفته شده است. غیرخطی هندسی با در نظر گرفتن تحلیل با تغییر شکل‌های بزرگ به مدل عددی اعمال شده است. اعضا با استفاده از اجزا تیری سه‌بعدی مدل شده‌اند و اتصالات به صورت صلب فرض شده‌اند. جدول (۱) ابعاد هندسی مقاطع مورد استفاده در این دکل آورده شده است. برای بررسی اثر نیروی باد و همچنین ریزش یخ از روی کابل‌ها، خط انتقال نیرو به همراه دکل‌ها باید در تحلیل مدل شود (شکل (۲)). دو نوع کابل به دکل انتقال نیرو در راستای طولی خط انتقال نیرو متصل شده است که شامل: کابل‌های انتقال^۲ و محافظ^۳. شکل (۳) مدل سه‌بعدی از خط انتقال نیرو، که شامل پنج دکل و شش دهانه هست، را نشان می‌دهد.



شکل ۲- هندسه دکل

جدول ۱- مقاطع اعضا دکل انتقال نیرو

عضو	ابعاد (mm)		
	مقطع	عرض بال	ضخامت
پایه	HL۱۳۰×۱۳۰×۱۰	۱۳۰	۱۰
	HL۱۲۰×۱۲۰×۱۰	۱۲۰	۱۰
	HL۱۱۰×۱۱۰×۸	۱۱۰	۸
	HL۹۰×۹۰×۷	۹۰	۷
	HL۱۱۰×۱۱۰×۸	۱۱۰	۸
مهاربندی	HL۹۰×۹۰×۷	۹۰	۷
	HL۱۱۰×۱۱۰×۸	۱۱۰	۸
	HL۹۰×۹۰×۶	۹۰	۶
	HL۸۰×۸۰×۶	۸۰	۶
	HL۷۵×۷۵×۶	۷۵	۶
	HL۶۵×۶۵×۵	۶۵	۵
	L۴۵×۴۵×۴	۴۵	۴



شکل ۳- مدل سه‌بعدی خط انتقال نیرو

در این تحقیق، رفتار کابل‌ها به صورت الاستیک در نظر گرفته شده‌اند و از رفتار غیرخطی آن‌ها صرف نظر شده است. جدول (۲) مشخصات کابل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی کابل‌های خط انتقال نیرو

عضو	چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیسته (GPa)	قطر (mm)	مقاومت نهایی (MPa)
کابل انتقال	۳۳۵۰	۷۳/۲	۳۱/۷۷	۱۶۲۰۰
کابل محافظ	۷۸۵۰	۱۹۰	۱۱	۱۰۴۵۰۰
مقره	۱۱۴۱/۵	۷۶/۵	۱۹/۵	۶۷۰۰۰

1. Elasto-Plastic
2. Conductor cable

۳- بارگذاری خط انتقال نیرو

۳-۱- بارگذاری باد بر اساس آیین نامه انجمن عمران آمریکا
به منظور تعیین نیروی باد اعمالی به خط انتقال نیرو، می توان
از رابطه (۱) استفاده نمود.

$$F = \gamma_w Q K_z K_{zt} (V_{50})^2 G C_f A \quad (1)$$

که، F نیروی باد، γ_w ضریب بار (برای دوره بازگشت ۵۰ ساله مقدار این ضریب ۱ هست)، K_z ضریب بادگیری، K_{zt} ضریب اثر توپوگرافی منطقه، Q ثابت عددی، V_{50} سرعت پایه باد برای دوره بازگشت ۵۰ ساله، شامل ۳ ثانیه اغتشاش باد، G ضریب اثر فروجهشی، C_f ضریب نیرو و A سطح تصویر شده روی صفحه عمود بر راستای وزش باد می باشد. در این رابطه سرعت بر حسب متر بر ثانیه و مساحت بر حسب مترمربع در نظر گرفته می شود. برای کابل با قطر d و ضخامت یخ t ، برای واحد طول کابل $A = d + 2t$ در نظر گرفته می شود، در صورتی که یخ روی کابل نباشد، این مقدار برابر با قطر کابل خواهد بود.

۳-۱-۱- مدل سازی سرعت باد

سرعت باد را می توان به دو بخش جدا کرد: سرعت میانگین^۴ و سرعت اغتشاشی (جهشی)^۵. سرعت میانگین مؤلفه استاتیکی آن است که در ارتفاع متغیر هست ولی نسبت به زمان متغیر نیست. برخلاف سرعت میانگین، سرعت اغتشاشی باد نسبت به زمان و مکان متغیر بوده و مؤلفه دینامیکی باد محسوب می شود. نوسان سرعت باد، در طراحی خطوط انتقال نیرو در نظر گرفته نمی شود. به نظر می رسد که در نظر نگرفتن این موضوع، با وجود اعمال ضرایب اضافه بار و اطمینان، دلیل اصلی خرابی خطوط انتقال نیرو در اثر نیروی باد می باشد.

سرعت مبنای باد که توسط آیین نامه ها مشخص می شود، نشان دهنده سرعت میانگین در بازه زمانی طولانی (معمولاً ۱۰ دقیقه) و سرعت اغتشاش باد در مدت زمان کوتاه، (معمولاً ۳ ثانیه) می باشد. همان طور که قبلاً اشاره شد، مؤلفه اغتشاشی باد نسبت به زمان متغیر است. لذا برای محاسبه دقیق تر نیروی باد نسبت به روش های آیین نامه ای مرسوم، این مؤلفه از سرعت باد باید به صورت تاریخچه زمانی مدل شود. به منظور تعیین سرعت کل باد، دو مؤلفه سرعت میانگین و اغتشاشی با هم جمع بسته می شوند.

$$V = \bar{V} + V' \quad (2)$$

که V ، سرعت کل باد، \bar{V} سرعت میانگین باد و V' سرعت اغتشاشی باد می باشد.

۳-۱-۱-۱- سرعت میانگین باد

به منظور تعیین تغییرات سرعت میانگین با ارتفاع از رابطه لگاریتمی می توان استفاده نمود. تابع لگاریتمی به صورت زیر بیان می شود (Kareem و Tamura، ۲۰۱۳):

$$\bar{V} = \frac{V_*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (3)$$

که V_* ، سرعت اصطکاکی است و با استفاده از رابطه (۴) تعیین می شود. k ثابت کارمن^۶ می باشد که تقریباً برابر با ۰/۴ در نظر گرفته می شود. z ارتفاع از سطح زمین، z_0 ضریبی برای در نظر گرفتن اثر ناهمواری زمین است که برای نواحی باز ۰/۱ در نظر گرفته می شود. d نیز ثابتی عددی و برای زمین باز ۰/۱ می باشد.

$$V_* = k \bar{V}(z) / \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

۳-۱-۱-۲- سرعت جهشی باد

مؤلفه اغتشاشی سرعت باد، یک پارامتر نوسانی تصادفی^۸ است (Kadaba، ۱۹۸۸). انرژی هر پدیده تصادفی، نظیر باد، معمولاً با کمیتی تحت عنوان "طیف چگالی انرژی" (PSD)^{۱۱} بیان می شود. طیف چگالی انرژی، نشان دهنده انرژی مؤلفه اغتشاشی برای فرکانس های مختلف می باشد (Kadaba، ۱۹۸۸). به منظور انجام تحلیل عددی تاریخچه زمانی، طیف تحلیلی انرژی باد باید به صورت عددی مدل شود. یکی از روش های کلاسیک برای مدل سازی پدیده های ارتعاش تصادفی مانند باد، برهم نهی توابع مثلثاتی با زوایای فاز تصادفی است (Jan و Shinozuka، ۱۹۷۲)، که معمولاً با استفاده از مفهوم طیف انرژی ارائه می گردد (Kadaba، ۱۹۸۸). با افزایش تعداد جملات برهم نهی، دقت مدل سازی بالا می رود (Kareem و Tamura، ۲۰۱۳). روش مذکور با افزایش تعداد متغیرها، به سرعت واگرا می باشد. لذا، به منظور بهبود عملکرد آن از تبدیل فوریه سریع (FFT) استفاده می شود (Sinha و Wittig، ۱۹۷۵). به منظور بهبود عملکرد و بالا بردن سرعت روش تبدیل فوریه سریع، از تجزیه طیف چگالی انرژی استفاده می شود (Kareem و Tamura، ۲۰۱۳). محبوب ترین تجزیه برای این قضیه، تجزیه چولسکی^{۱۲} می باشد (Shinozuka و Jan، ۱۹۷۲). با استفاده از روش مذکور، طیف چگالی انرژی که

8. Zero-plane displacement
9. Random fluctuation
11. Power Spectral Density
12. Cholesky decomposition

4. Mean wind speed
5. Gust Wind
6. Karman constant
7. Roughness length

۳-۲- بارگذاری یخ

بار یخ به صورت یک بار ثقلی به کابل‌ها اضافه می‌شود. در محاسبه وزن یخ، چگالی آن در حدود چگالی آب در نظر گرفته می‌شود. در تحقیق حاضر، ضخامت یخ روی کابل همه دهانه‌ها یکسان و ریزش روی یک دهانه در نظر گرفته شده است. ریزش‌های نامتقارن یخ، در نظر گرفته نشده و می‌تواند در تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.

برای اعمال بار باد و یخ، می‌توان از بارگذاری متمرکز در نقاط گرهی استفاده نمود. انجام این نوع بارگذاری علاوه بر این‌که، نیاز به حجم محاسباتی بالا برای تعیین اندازه بارهای متمرکز دارد، میزان سرعت انجام تحلیل را به شدت می‌کاهد. در ضمن احتمال خطا در تعیین و اعمال بار متمرکز نیز وجود دارد. به علاوه این‌که، تعیین تعداد مناسب بارگذاری متمرکز نیز مسئله‌ای است، که باید با احتیاط تعیین شود، تا پاسخ حاصل از تحلیل دارای دقت مناسبی باشد.

با توجه به موضوعاتی که مطرح شد، بار باد و یخ را می‌توان به صورت بار حجمی به جای بار متمرکز اعمال نمود. بار حجمی به صورت گسترده بوده و نیاز به محاسبات پیچیده تعیین مقدار بارگذاری ندارد. بار حجمی به صورت حاصل ضرب چگالی در شتاب تعیین می‌شود. با توجه به این‌که چگالی را در زمان انجام تحلیل در نرم‌افزار نمی‌توان تغییر داد، شتاب به صورت متغیر برای در نظر گرفتن اثر افتادن یخ روی بار باد و یخ در نظر گرفته می‌شود. بدین منظور روابط زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Kequan, Bo, Yan, Chen, Ming Liang, Yueming Guo, ۲۰۱۵). چگالی معادل برای کابل، برای در نظر گرفتن اثر یخ:

$$\rho_e = \frac{W_{cable} + W_{ice}}{A} \quad (7)$$

چگالی معادل برای کابل، با در نظر گرفتن اثر افتادن یخ:

$$\rho_a = \frac{W_{cable} + W_{ice}(1-\beta)}{A} \quad (8)$$

شتاب معادل قبل از افتادن یخ، برای دهانه با در نظر گرفتن افتادن یخ:

$$g_e = \frac{W_{cable} + W_{ice}}{W_{cable} + W_{ice}(1-\beta)} g \quad (9)$$

در شکل (۵)، شتاب اعمالی برای نیروی یخ قبل و بعد از حذف شدن آن را نشان می‌دهند.

درواقع یک تابع تحلیلی پیوسته می‌باشد، به صورت تابعی عددی و گسسته^{۱۳} بیان می‌شود.

طیف چگالی انرژی توسط محققین مختلفی مانند (Von Karman (۱۹۴۸)، Kaimal (۱۹۷۲)، ارائه شده است. در این تحقیق، از طیف Kaimal، برای مدل کردن مؤلفه اغتشاشی سرعت باد استفاده شده است، که به صورت رابطه (۵)، بیان می‌شود.

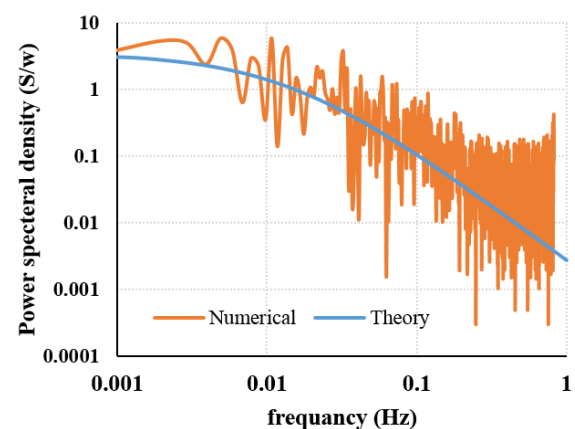
$$S(z, \omega) = \frac{1}{2} \frac{200}{2\pi} V_*^2 \frac{z}{\bar{V}(z)} \frac{1}{[1 + 50 \frac{\omega z}{2\pi \bar{V}(z)}]^{5/3}} \quad (5)$$

که V_* سرعت اغتشاشی برحسب متر بر ثانیه، z ارتفاع برحسب متر، $\bar{V}(z)$ سرعت میانگین باد در نقطه با ارتفاع z برحسب متر بر ثانیه و ω فرکانس برحسب رادیان بر ثانیه می‌باشد. طیف مدل شده را با استفاده از سری رابطه (۶)، می‌توان در حوزه زمان بیان نمود (Deodatis, ۱۹۹۶)، درحالی‌که در آن $N \rightarrow \infty$.

$$V_p(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^N |H_{pi}(\omega_j)| \sqrt{2\Delta\omega_j} \cos[\omega_j(t) - \theta_{pi}(\omega_j) + \phi_j] \quad (6)$$

که p تعداد کل نقاط استفاده شده در مدل‌سازی سرعت باد، N تعداد نقاط گسسته‌سازی سرعت اغتشاشی باد، H ماتریس حاصل از تجزیه چولسکی ماتریس طیف، θ آرگومان ماتریس^{۱۴} H ، زاویه فاز تصادفی^{۱۵} در بازه 0 تا 2π می‌باشند.

به منظور شبیه‌سازی سرعت باد در نقاط با مختصات مختلف از کدنویسی در محیط MATLAB استفاده شده است. با استفاده از کد مذکور، سرعت میانگین و جهشی باد به کمک روابط ارائه شده در بحث‌های مربوطه در بالا، تعیین شده است. به عنوان نمونه سرعت باد در ارتفاع ۹ متری با استفاده از مدل ارائه شده، استخراج شده است. به منظور اطمینان از صحت نتایج کدنویسی، نتایج عددی و تئوری در شکل (۴) با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۴- مقایسه طیف چگالی نیروی باد به صورت تحلیل عددی

15. Independent random phase angle

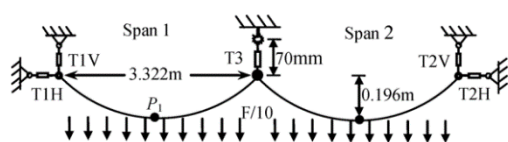
13. Discrete function

14. Argument

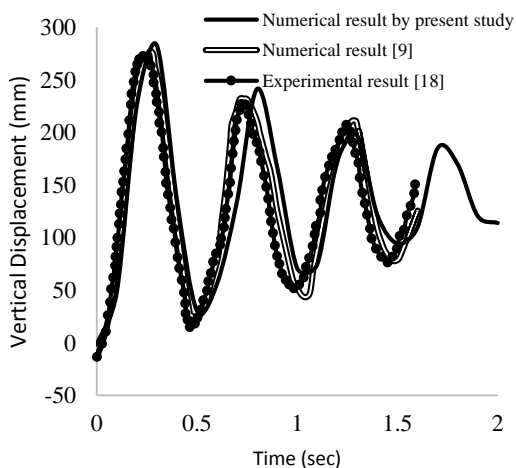
مدل بارگذاری برای در نظر گرفتن نیروی باد قبل و بعد از حذف یخ نیز در شکل (۶)، آورده شده است. که در روابط بالا، W_{cable} وزن واحد طول کابل، W_{ice} وزن یخ در واحد طول کابل، A سطح مقطع کابل، β نسبت افتادن یخ، g شتاب ثقل، p نیروی جانبی باد قبل افتادن یخ در واحد طول کابل، p_a نیروی جانبی باد بعد از افتادن یخ در واحد طول کابل، g_w شتاب جانبی دهانه با بار یخ، برای در نظر گرفتن بار باد، g_{wb} شتاب جانبی دهانه با افتادن یخ، قبل از افتادن یخ، g_{wa} شتاب جانبی دهانه با افتادن یخ، بعد از افتادن یخ.

۳-۳- صحت‌سنجی روش تحلیل ریزش بار یخ

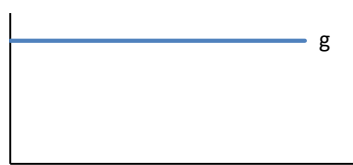
به‌منظور اطمینان از روش مدل‌سازی بار یخ، کابل دو دهانه‌ای مطابق شکل (۷) که توسط Jamaledine و همکاران (۱۹۹۳) مورد آزمایش و همچنین توسط Yan و همکاران (۲۰۱۵) مدل‌سازی شده است، به‌عنوان مدل صحت‌سنجی انتخاب شده است. طول دهانه کابل ۳/۳۲۲ متر، قطر آن ۴/۷۶ میلی‌متر با وزن واحد طول ۰/۰۹۳۶ کیلوگرم بر متر، با کشش اولیه ۶/۶۱ نیوتن می‌باشد. ضخامت یخ در نظر گرفته شده ۹/۵۲ میلی‌متر با ۱۰ بار متمرکز در هر دهانه در آزمایشگاه مدل شده است. میرایی کابل ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. شکل (۸)، نتایج ناشی از تحلیل را با نتایج تجربی و عددی موجود مقایسه می‌کند. مقایسه نتایج، نشان‌دهنده دقت مناسب روش مدل‌سازی می‌باشد. تفاوت در نتایج می‌تواند به دلیل تعیین نشدن دقیق میزان میرایی کابل‌ها باشد.



شکل ۷- کابل دو دهانه مورد استفاده برای صحت‌سنجی



شکل ۸- مقایسه نتایج ناشی از مدل عددی با نتایج قبلی



(الف)



(ب)

شکل ۵- شتاب در نظر گرفته‌شده در برای بارگذاری یخ: (الف) قبل از ریزش یخ، (ب) بعد از ریزش آن

برای در نظر گرفتن بار باد:

$$g_w = \frac{p}{W_{cable} + W_{ice}} \quad (10)$$

$$g_{wb} = \frac{p}{W_{cable} + W_{ice}(1-\beta)} \quad (11)$$

$$g_{wa} = \frac{p_a}{W_{cable} + W_{ice}(1-\beta)} \quad (12)$$



(الف)



(ب)

شکل ۶- شتاب در نظر گرفته‌شده در برای بارگذاری باد: (الف) قبل از ریزش یخ، (ب) بعد از ریزش آن

می‌شود. میرایی آیرودینامیک کابل با استفاده از رابطه (۱۶) تعیین می‌شود (Kadaba, ۱۹۸۸).

$$\xi = 0.000048 \left(\frac{\bar{V}}{f_0 d} \right) c_f \quad (16)$$

در رابطه بالا، \bar{V} سرعت متوسط باد، f_0 فرکانس مد غالب ارتعاش آزاد (مطابق رابطه (۱۷))، d قطر کابل و c_f ضریب نیرو کابل می‌باشد.

$$f_0 = \sqrt{\frac{g}{32S}} \quad (17)$$

که در رابطه بالا g شتاب ثقل و S میزان شکم‌دادگی کابل می‌باشد. تغییرات زمانی تحلیل دینامیکی، حداکثر ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است، که به اندازه کافی از تغییرات زمانی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی نیروی باد (۰/۷۸ ثانیه) کوچک‌تر می‌باشد. در نتیجه مقادیر حداکثر سرعت باد در مدل‌سازی به خوبی در تحلیل دینامیکی در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به آیین‌نامه بارگذاری مشانیر، سرعت باد در منطقه ساخت خط انتقال، ۲۰ متر بر ثانیه با ضخامت یخ ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق، از روش تحلیل دینامیکی افزایشی برای اعمال باد استفاده شده، تا سرعت بحرانی باد که باعث ایجاد خرابی در خط انتقال می‌شود، تعیین گردد. روش مذکور قبلاً توسط Sarmasti و همکاران (۲۰۲۰)، برای تعیین پایداری خط انتقال در برابر نیروی باد استفاده شده است. پایداری خط انتقال تحت اثر سرعت نموی باد در نزدیکی این سرعت باد انجام شده است، تا کفایت خط انتقال و سرعت باد بحرانی آن مشخص گردد.

۴- نتایج

۴-۱- تعیین مد خرابی دکل انتقال نیرو

در این بخش نتایج تحلیل‌های انجام شده، ارائه شده است. باد به صورت عمود بر خط انتقال وارد می‌شود و جهت‌گیری باد در نظر گرفته نشده است. خرابی خط انتقال نیرو در دکل‌های خط انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده توسط آیین‌نامه طراحی خط انتقال در منطقه طراحی شده، تحلیل خط انتقال برای این سرعت و سرعت کم‌تر و بیشتر از آن انجام شده است، تا وضعیت خط انتقال در این محدوده سرعتی مشخص شود. با توجه به تحلیل انجام شده خرابی خط انتقال نیرو، در ناحیه بالایی دکل‌های انتقال به صورت هم‌زمان در اعضای بالایی دکل‌ها شروع می‌شود. شکل (۱۰)، آغاز خرابی در خط انتقال را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، خطوط انتقال در قسمت بالایی دچار ضعف هستند. خرابی

۳-۴- تحلیل پایداری خط انتقال

در ابتدا تحلیل استاتیکی، تحت بار ثقلی به منظور در نظر گرفتن غیرخطی‌های هندسی نظیر فلش کابل و تغییر شکل ناشی از وزن یخ انجام شده است. سپس با استفاده از تحلیل شبه-استاتیکی بارگذاری ناشی از سرعت متوسط باد روی دهانه‌ها انجام می‌شود. در این تحقیق فرض شده است که بار ریزش یخ، به‌طور هم‌زمان با باد در مرحله جهشی و به‌صورت کامل در یک دهانه رخ دهد. به‌منظور اعمال این بارگذاری و تحلیل رفتار سازه، از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به روش نیومارک^{۱۶} استفاده شده است. میرایی دکل‌ها با استفاده از روش رایلی^{۱۷} (Chopra, ۲۰۱۲) تعیین و اعمال شده است. رابطه (۱۳) نحوه تشکیل این ماتریس به کمک ماتریس‌های جرم و سختی را نشان می‌دهد.

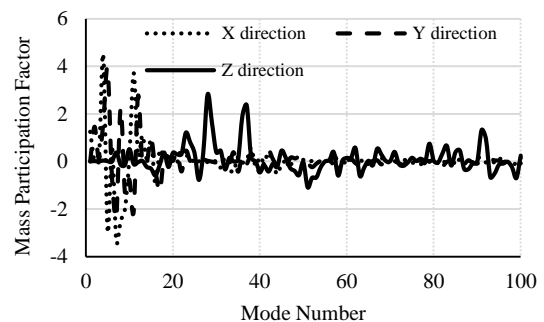
$$C = \alpha_m M + \beta_s K \quad (13)$$

ضرایب ماتریس رایلی با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) تعیین می‌شود.

$$\alpha_m = \frac{2\omega_i \omega_j (\xi_i \omega_j - \xi_j \omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (14)$$

$$\beta_s = \frac{2(\xi_j \omega_j - \xi_i \omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (15)$$

در روابط بالا، α_m ضریب ماتریس جرم، M ماتریس جرم، β_s ضریب ماتریس سختی، K ماتریس سختی می‌باشد. ω_i ، ω_j ، ξ_i و ξ_j به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و میرایی مدهای i و j می‌باشند. به‌منظور تعیین این مدها در ابتدا یک تحلیل ارتعاش آزاد برای دکل انتقال نیرو بدون در نظر گرفتن کابل‌ها انجام شده است. مدهای انتخابی براساس مدهای غالب در ارتعاش سازه می‌باشند. در شکل (۹) مدهای غالب نمایش داده شده است.



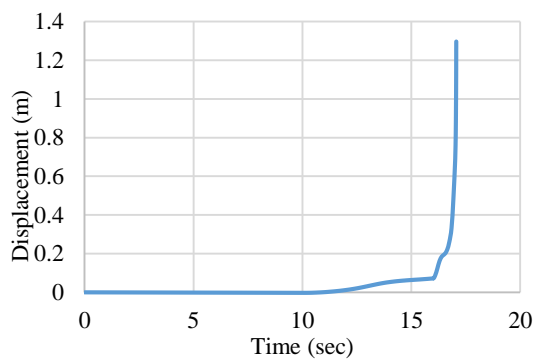
شکل ۹- مدهای غالب در ارتعاش سازه

برای کابل‌های سازه‌های کابلی مانند خطوط انتقال نیرو، اندرکنش کابل و باد به صورت میرایی آیرودینامیک^{۱۸} تعریف

18. Aerodynamic damping

16. Newmark method

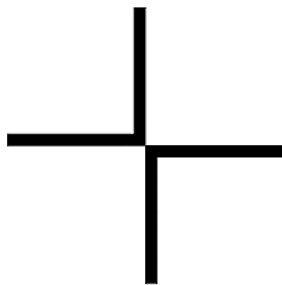
17. Rayleigh method



شکل ۱۲- تغییرات جابه‌جایی نقطه جایی بالایی دکل انتهایی خط انتقال نیرو

۴-۲- مقاوم‌سازی خط انتقال نیرو

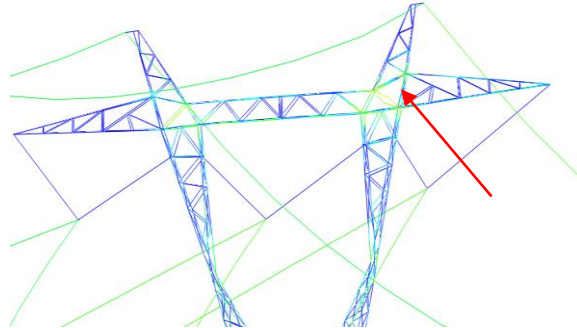
در قسمت قبل، تحلیل خط انتقال نیرو برای بارگذاری باد و یخ یک ناحیه ضعیف در بالا و میانه ارتفاع دکل انتقال نیرو را مشخص کرد. با توجه به نتایج این تحلیل، این دو قسمت از دکل انتقال نیرو نیازمند تقویت می‌باشد. در اینجا با توجه به این که خرابی اولیه در اعضای بالایی دکل انتقال نیرو، به صورت موضعی باقی می‌ماند و خرابی قسمت میانی، به صورت پیش‌رونده می‌باشد، لذا قسمت میانی دکل انتقال نیرو، در ابتدا تقویت می‌شود. در صورتی که نتایج تحلیل نیاز به تقویت در قسمت‌های دیگر را نشان دهد، تقویت انجام می‌شود. به منظور تقویت این قسمت از دکل انتقال نیرو، از تقویت پشت‌به‌پشت اعضای نبشی با استفاده از نبشی هم‌اندازه آن استفاده می‌شود. به صورتی که در نهایت یک مقطع صلیبی مطابق با شکل (۱۳) به دست می‌آید. استفاده از این روش بسیار ساده و کاربردی می‌باشد و از لحاظ اقتصادی کاملاً ارزان بوده و نیازمند روش‌های پیچیده و گران اجرا نمی‌باشد.



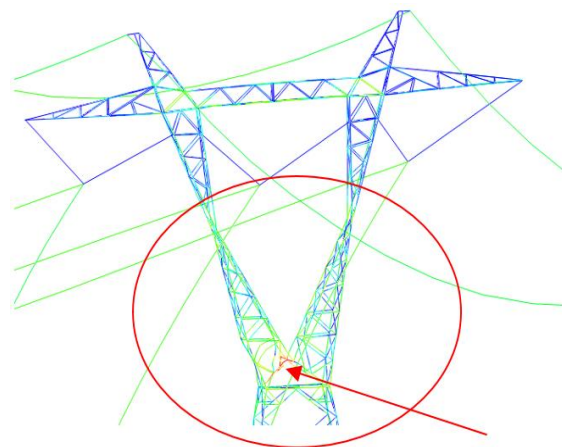
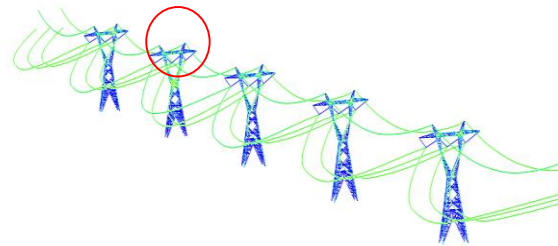
شکل ۱۳- مقاوم‌سازی عضو نبشی

در این مرحله خط انتقال تقویت‌شده تحت بارگذاری یخ و باد در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه و ضخامت یخ ۱۵ میلی‌متر، مطابق آیین‌نامه طراحی خط انتقال، تحلیل دینامیکی می‌شود. نتایج این تحلیل در شکل (۱۴)، نشان داده شده است. خط انتقال نیرو در این شکل، تحت اثر نیروی باد و سقوط یخ هیچ نوع خرابی را نشان

خط انتقال به این خرابی محلی محدود نمی‌شود، و خرابی به میانه دکل انتقال نیرو، منتقل می‌شود. شکل (۱۱) این انتقال خرابی به ناحیه میانی دکل انتقال نیرو را نشان می‌دهد. سپس خرابی به بخش عمده‌ای از دکل انتقال نیرو انتشار می‌یابد.



شکل ۱۰- آغاز خرابی در دکل انتقال نیرو



شکل ۱۱- انتشار خرابی به میانه دکل انتقال نیرو

در شکل (۱۲)، تغییر مکان جانبی دکل انتقال نیرو، در دکلی که دچار خرابی شده برای سرعت‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ متر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۲)، نیز مشخص شده است، تغییر مکان نقطه بالایی دکل، به‌طور ناگهان افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده ناپایداری است. به نظر می‌رسد که دکل‌های مورد استفاده در ساخت این خط انتقال در ناحیه بالایی و میانی آن ضعیف بوده و نیازمند تقویت می‌باشند.

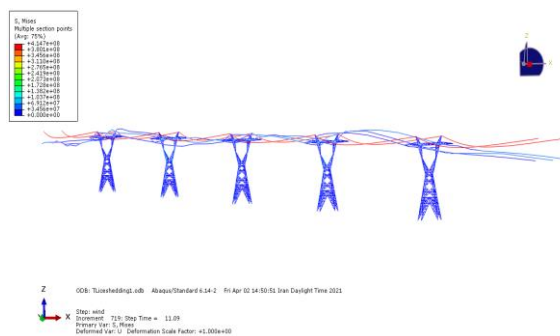
تحت تحلیل تاریخیچه زمانی و در نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفت. ضخامت یخ روی کابل‌ها ثابت و مشابه با مقدار پیشنهادی توسط آیین‌نامه انتخاب گردید و سرعت باد به صورت نمودی افزایش داده شد.

خط انتقال نیروی مورد بررسی، در ابتدا در ناحیه بالایی دکل انتقال دچار خرابی از نوع تسلیم شدن اعضا می‌شود. این خرابی در تمام دکل‌های خط انتقال به صورت هم‌زمان اتفاق می‌افتد. با افزایش زمان و ادامه دادن تحلیل دینامیکی، دکل مجاور به دهانه‌ی شاهد افتادن یخ در ناحیه میانی ارتفاع دکل، دچار خرابی جدید و باز هم از نوع تسلیم شدن اعضا می‌شود. سپس خرابی به بخش عمده‌ای از این دکل گسترش می‌یابد. نکته جالب، تفاوت خرابی دکل با حالتی است که فقط بار باد به سازه اعمال می‌شود، که نتایج آن در مرجع Sarmasti و همکاران (۲۰۲۰)، آورده شده است. در حالتی که فقط نیروی باد اعمال می‌شود، خرابی فقط در دکل میانی اتفاق می‌افتد، در حالی که در خط انتقال تحت نیروی باد و یخ، خرابی در طول خط انتقال نیرو گسترش می‌یابد. به‌رحال رفتار خرابی و اعضای درگیر در خرابی در هر دو حالت در نواحی مشابهی قرار دارند. به نظر می‌رسد، تقویت این اعضا برای هر دو نوع بارگذاری ضروری می‌باشد. مقاوم‌سازی دکل انتقال نیرو در قسمت میانی آن انجام شد و خط انتقال نیرو دوباره تحت بارگذاری آیین‌نامه برای نیروی باد و افتادن ناگهانی یخ از روی یک دهانه انجام شد. نتایج تحلیل نشان داد، که تقویت سازه در این قسمت از هر نوع خرابی موضعی و پیش‌رونده خط انتقال نیرو جلوگیری می‌کند. با استفاده از روش ارائه‌شده در تحقیق حاضر، پایداری خط انتقال را تحت سرعت‌های مختلف باد و همچنین سناریوهای مختلف افتادن یخ (شامل افتادن یخ در یک کابل از دهانه، افتادن در زمان‌های مختلف در روی کابل‌های دهانه و افتادن یخ با نسبت‌های متفاوت، به‌نوعی که بخشی از یخ روی کابل باقی بماند) را بررسی نمود. همچنین ناپایداری ناشی از افتادن یخ نامتقارن را هم می‌توان بررسی نمود. روش ارائه‌شده در تحلیل خطوط انتقال موجود و طراحی خطوط جدید می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

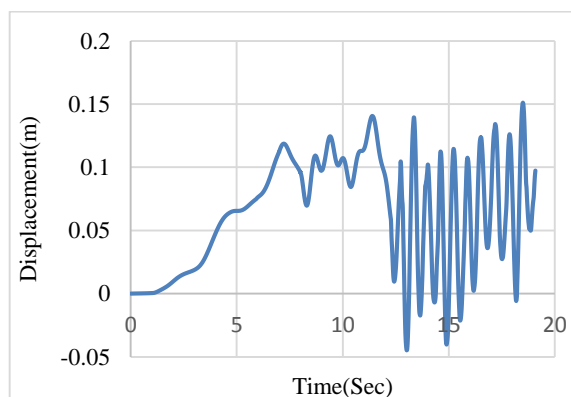
۶- مراجع

- ASCE, "Design of latticed steel transmission structures, ASCE/SEI 10-15", American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2015.
- Deodatis G, "Simulation of Ergodic Multivariate Stochastic Processes", Journal of Engineering Mechanics 122 (August), 1996, 778-87.
- Jamaledine A, McClure G, Rousselet J, Beauchemin R, "Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using adina", Computers and Structures, 1993, 47 (4-5), 523-36.
- Kadaba, Radhakrishna R, "Response of electrical transmission line conductors to extreme wind

نداده است. همچنین نمودار تغییر مکان جانبی نکته بالایی، دکل میانی خط انتقال نیرو، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، هیچ نوع تغییر مکان بزرگ ناگهانی در دکل انتقال رخ نمی‌دهد و حول تعادل برای سرعت متوسط باد، ارتعاش می‌کند. با توجه به نتایج تحلیل انجام شده، خط انتقال نیرو زمانی که تقویت شده است برای بارگذاری مذکور پایداری لازم را دارد. نکته حائز اهمیت در دکل تقویت‌شده در مقایسه با حالت تقویت نشده، پایداری آن در برابر سرعت متوسط باد و رسیدن به مرحله سرعت اغتشاشی باد است، که در برابر این سرعت نیز کاملاً پایدار است. به نظر می‌رسد این تیپ از دکل انتقال نیروی در ناحیه میانی دچار ضعف می‌باشد. نتیجه مشابهی در تحقیق انجام شده توسط Sarmasti و همکاران (۲۰۲۰)، که در مورد خرابی در برابر نیروی باد هست، پیش‌بینی شده است.



شکل ۱۴- پایداری خط انتقال نیرو تحت بارگذاری باد و یخ



شکل ۱۵- پاسخ دکل انتقال نیرو میانی تقویت‌شده

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پایداری خط انتقال تحت اثر هم‌زمان نیروی باد و افتادن ناگهانی یخ با استفاده روش مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. نیروی باد با استفاده از مدل‌سازی عددی، مدل گردید. بار یخ با استفاده از نیروی حجمی به مدل خط انتقال نیرو اعمال گردید. پایداری خط انتقال نیرو تحت اثر بار باد و یخ طراحی آن

- using filed data", 1988.
- Kadaba, Radhakrishna R, "Response of electrical transmission line conductors to extreme wind using filed data", Ph.D. Dissertation, Texas Tech University, Austin, 1988.
- Kaimal JC, Wyngaard JC, Izumi Y, Coté OR, "Spectral Characteristics of Surface-layer Turbulence", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98 (417), 563-89.
- Kareem A, Yukio Tamura, Advanced Structural Wind, 2013.
- Kollár LE, Masoud F, Van Dyke P, "Modeling ice shedding propagation on transmission lines with or without interphase spacers", 2013, 28 (1), 261-67.
- Meng X, Hou L, MacAlpine M and Fu G, "Oscillation of Conductors following ice-shedding on uhv transmission lines", Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 30, 393-406.
- Meng X, Wang L, "Cold regions science and technology dynamic characteristic of ice-shedding on uhv overhead transmission lines", Cold Regions Science and Technology, 2013, 66 (1), 44-52.
- Roshan Fekr M, McClure G, "Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines", Atmospheric Research, 1998, 46, 1-11.
- Sarmasti H, Abedi K, Chenaghlou MR, "Stability behavior of the transmission line system under incremental dynamic wind load", Wind and Structures, 2020, 31 509-522.
- Konstantin S, Farzaneh M, "Modeling of icing and ice shedding on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data", 2004, 19 (2), 715-21.
- Shinozuka M, Jan C-M, "Digital simulation of random processes", Journal of Sound and Vibration, 1972, 25, 111-28.
- Von Karman, Theodore, "Reynolds' Discoveries", 1948, Proc. N. A. S. 34: 530-39.
- Wittig LE, Sinha AK, "Simulation of multicorrelated random processes using the fft algorithm", The Journal of the Acoustical Society of America, 1972, 54 (1), 292-292.
- Wu, Chuan, "PT SC", Cold Regions Science and Technology, 2016.
- Yan, Bo, Chen K, Guo Y, Liang M, Yuan Qi, "Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice shedding", January 2013.
- Yang F, Yang J, Junke HAN, Dongjie FU, "Dynamic Responses of Transmission Tower-Line System under Ice Shedding", 2010, 10 (3).
- Fengli Y, Jingbo Y, Junke H, Dongjie Fu. "Numerical simulation on the hv transmission tower-line system under ice-shedding", 2009, 5-9.
- Zhang P, Ren L, Li H, Jia Z and Jiang T, "Control of wind-induced vibration of transmission tower-line system by using a spring pendulum", Mathematical Problems in Engineering, 2015.

EXTENDED ABSTRACT

Stability analysis of Transmission Lines Under Simultaneous Ice-shedding and Wind loads

Hadi Sarmasti, Karim Abedi, Mohammad Reza Chenaghlou*

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz 5331811111, Iran

Received: 15 January 2021; **Accepted:** 10 Mar 2021

Keywords:

Transmission line, Finite element analysis, Ice-shedding, Wind load, Stability analysis.

1. Introduction

In the present study, the effect of ice-shedding simultaneously at the transmission line's span and the wind was investigated using numerical modeling, and its results are presented. The transmission line has five transmission towers and six power transmission spans related to the 400 kV transmission line of the Khoy-Urmia power plant. The transmission tower's weaknesses have been identified using this study's results, which can be considered in strengthening existing towers and the design of new transmission lines.

2. Methodology

The numerical model using ABAQUS (Abaqus Manual) software and the wind load has been simulated using numerical methods, and in order to determine the critical wind speed for the transmission line, developmental analysis with stepwise increase of wind speed has been used.

3. Results and discussion

In this section, the results of the analysis are presented. The wind enters perpendicular to the transmission line, and the wind direction is not considered. The power transmission line failure has been investigated in the towers. According to the speed of 20 meters per second considered by the transmission line design regulations in the designed area, the transmission line analysis for this speed and speed less and more has been done. According to the speed of 20 meters per second considered by the transmission line design regulations in the designed area, the transmission line analysis for this speed and speed less and more has been done to determine the status of the transmission line in this speed range. According to the analysis performed of the power transmission line, failure in the upper area of the transmission towers and the upper members of the towers is started simultaneously. The Commencement of the transmission line failure is shown in Fig. 1. As can be seen from this figure, the transmission lines at the top section are weak. The transmission line failure is not limited to this local failure, and the failure is transmitted to the center of the transmission tower. And then, the failure is spread to most parts of the transmission tower. Fig. 2 shows how this failure is transmitted to the middle area of the power transmission tower.

* Corresponding Author

E-mail addresses: h_sarmasti@sut.ac.ir (Hadi Sarmasti), k_abedi@sut.ac.ir (Karim Abedi), mrchenaghlou@sut.ac.ir (Mohammad Reza Chenaghlou).

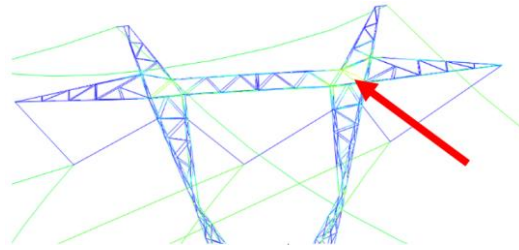


Fig. 1. Commencement of failure in the transmission tower

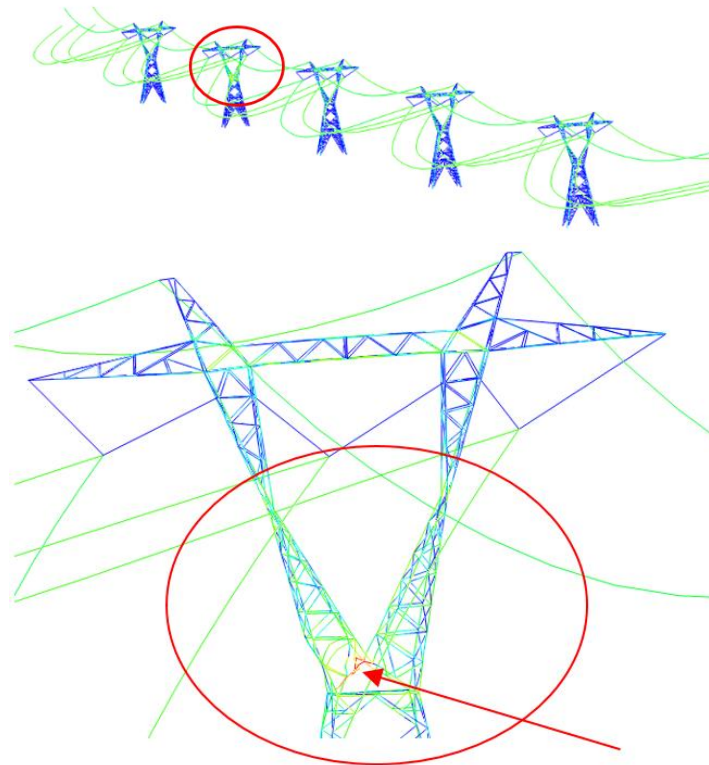


Fig. 2. Spread of failure to the middle of the power transmission tower

In the damaged tower, the power transmission tower's lateral displacement is shown in Fig. 3 for the speeds of 19, 20, and 21 meters per second. As shown in Fig. 2, the tower's top point's displacement increases abruptly, indicating instability. It seems that the towers used in the construction of this transmission line in its upper area are weak and need retrofiting.

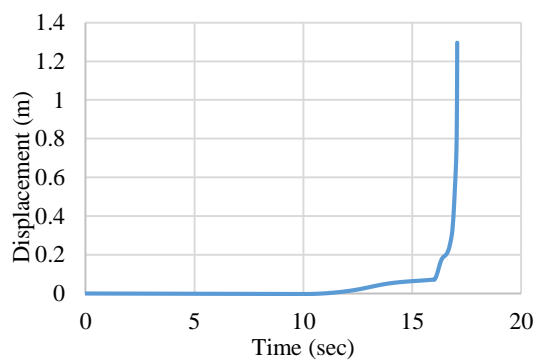


Fig. 3. Displacement variations of the top point of the last tower of the power transmission line

4. Conclusions

In this paper, the power transmission line's stability under wind force's simultaneous effect and sudden ice-shedding using the numerical modeling method and its design under wind and ice load effect by time history analysis in ABAQUS software were investigated. The wind force was modeled using numerical modeling, and the ice load was applied to the power transmission line model using volumetric force. The ice thickness on the cables fixedly and similar to the value suggested by the regulations was chosen, and the wind speed has been increased incrementally.

In the power transmission line under study, initially, failure from the type of yielding in the upper members of the transmission tower and then is occurred simultaneously in all transmission line towers. With increasing time and continuing dynamic analysis, this process is repeated, and the adjacent tower to the span will see ice-shedding in the middle area of the tower height. Then new failure from the type of members yielding occurs and spread to a large part of the tower. The interesting point is the difference between the tower's failure and the situation where only the wind load is applied to the structure, the results of which are given in the reference (Sarmasti et al, 2020). In the case where only wind force is applied, the failure is occurred only in the middle tower, while in the transmission line under wind and ice force, the failure is spread along the transmission line. However, the failure behavior and the members involved in the failure are in similar areas in both cases. It seems that the retrofitting of these members are essential for both types of loading.

Using the method presented in the present study, the stability of the transmission line under different wind speeds as well as different scenarios of ice-shedding (including ice-shedding on a cable from the span, falling at different times on the span cables and ice-shedding with different ratios, in such a way that part of the ice remains on the cable), and instability due to asymmetric ice-shedding can also be investigated. The proposed method can be used to analyze the existing transmission lines and design of new lines.

5. References

- Abaqus Manual 2014, Finite Element Software, 2014.
Sarmasti H, Abedi K, Chenaghloou MR, "Stability behavior of the transmission line system under incremental dynamic wind load", *Wind and Structures*, 2020, 31, 509-522.