نشریه علمی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱؛ ص۲۰۲- ۱۹۳

علمی- پژوهشی

ارزیابی خرابی پیشرونده سازه دکل انتقال نیرو خط ۲۳۰ کیلوولت

فریده فردوسی[۱]، سید شاکر هاشمی[۲*]، رحمن دشتی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ۲-استادیار ۳- دانشیار دانشگاه خلیج‌فارس

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳ ، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲)

چکیده

خرابی پیشرونده در سازه به دلیل رخ داد اقدامات اتفاقی و اثر زنجیروار خرابی، منجر به شکست دامنه وسیعی از سازه و یا حتی ریزش کلی سازه می‌شود. خطوط انتقال برق یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر در سیستم برق قدرت هستند. شکست ساختارهای خط انتقال برق یکی از مشکلات اصلی شرکت‌های برق در مناطق مختلف جهان است. در این پژوهش به بررسی رفتار خرابی پیشرونده مطالعه موردی خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت در استان فارس پرداخته‌شده است. در مطالعه حاضر، دو روش تحلیل دینامیکی خطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی جهت شناسایی آسیب با روش مسیر بار جایگزین مورداستفاده قرارگرفته است. مدل المان محدود دکل عبوری (DC0)، دکل انتهایی (DC90) و هادی‌های خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی گردیده است. در این پژوهش رفتار خرابی پیشرونده در اثر حذف پایه دکل‌های انتقال برق موردبررسی و ارزیابی قرارگرفته است. نتایج نشان داد که دکل‌های عبوری و انتهایی در اثر خرابی یک‌پایه تحت بار ثقلی پایدار هستند. همچنین نتایج نشان داد که در اثر حذف یک‌پایه در تحلیل خرابی پیشرونده دکل‌های انتهایی نسبت به دکل‌های عبوری از مقاومت بالاتری برخوردارند.

کلیدواژه‌ها: خرابی پیشرونده، دکل انتقال برق، تحلیل دینامیکی خطی، تحلیل دینامیکی غیرخطی

Evaluation of Progressive Collapse of Structure in Line 230 kV Power Transmission Tower.

Ferdowsi, S. Sh. Hashemi*, R. Dashti
Persian Gulf University,
(Received: 14/07/2022 ; Accepted:24/09/2022)

Abstract

Progressive failure in the structure due to the occurrence of accidental actions and the chain effect of the failure, leads to the failure of a wide range of the structure or even the total collapse of the structure. Power transmission lines are one of the integral components in the power system. Failure of power transmission line structures is one of the main problems of power companies in different regions of the world. In this research, the progressive failure behavior of a case study of 230 kV power transmission line in Fars province has been investigated. In the present study, two methods of linear dynamic analysis and nonlinear dynamic analysis have been used to identify damage with the alternative load path method. The finite element model of the passing tower (DC0), the end tower (DC90) and the conductors of the 230 kV power transmission line have been modeled in SAP2000 software. In this research, the behavior of progressive failure due to the removal of the base of power transmission towers has been investigated and evaluated. The results showed that the passing and end masts are stable under gravity load due to the failure of one leg. Also, the results showed that due to the removal of one pillar in the progressive failure analysis, the end masts have higher resistance than the passing masts.

Keywords: Progressive Collapse, Electrical Power Transmission Tower, linear dynamic analysis, nonlinear dynamic analysis

*Corresponding Author E-mail: sh.hashemi@pgu.ac.ir

۱. مقدمه

خطوط انتقال برق از اجزای مهم زیرساخت‌های قدرت هستند و رشد مداوم جوامع خواستار توسعه نیروگاه‌ها و شبکه‌های توزیع برق است. سقوط یک دکل انتقال اثرات اقتصادی و اجتماعی مهمی دارد، به همین جهت قابل‌اطمینان بودن و بدون وقفه کار کردن خطوط انتقال برق دارای اهمیت ویژه‌ای است. خرابی خطوط انتقال برق ناشی از خرابی پیشرونده، موجب مشکلات فراوانی در زندگی روزمره می‌گردد. خرابی پیشرونده در یک سازه زمانی رخ می‌دهد که یک یا چند عضو به‌صورت ناگهانی حذف شوند و اعضای ساختاری باقی‌مانده نتوانند وزن سازه را تحمل کنند که این امر منجر به خرابی سازه می‌شود؛ ازاین‌رو آسیب به خطوط انتقال برق می‌تواند باعث معضلات جبران‌ناپذیری در اقتصاد شود و زندگی انسان را مختل کند. لذا بررسی خرابی پیشرونده دکل‌های انتقال برق از مسائل مهم و اساسی در طراحی دکل‌ها به شمار می‌رود. مهم‌ترین آیین‌نامه‌های خرابی پیشرونده را می‌توان در اسناد دولتی آمریکا تحت عنوان آیین‌نامه GSA و UFC مشاهده نمود. این آیین‌نامه‌ها دارای اطلاعات کلی در رابطه با عملکرد و ارزیابی خرابی پیشرونده و حداقل ضوابط برای کاهش خرابی پیشرونده هستند.

از مهم‌ترین حوادثی که باعث گردیده پدیده خرابی پیشرونده موردتوجه قرار گیرد و دستورالعمل‌های طراحی بین‌المللی، برای ساخت سازه‌ها برای جلوگیری از فروپاشی تدریجی به وجود آید؛ به سه واقعه زیر می‌توان اشاره کرد. این دستورالعمل‌ها سه بار پس از وقوع سه حادثه خرابی پیشرونده، مورد ویرایش و بازنگری قرارگرفته‌اند. اولین حادثه در زمینه خرابی پیشرونده در سال ۱۹۶۸ در ساختمان رونان پوینت لندن اتفاق افتاده است. اندکی پس‌ازاین حادثه، برای اولین بار، مقررات مربوط به فروپاشی تدریجی، به تعدادی از استانداردهای طراحی در بریتانیا و کانادا اضافه‌شده است. دومین اتفاق خرابی پیشرونده مربوط به ساختمان فدرال موراه در شهر اوکلاهاما[1] در سال ۱۹۹۵ بوده است. سومین مسئله فروپاشی در مرکز تجارت جهانی (برج دوقلو[2]) در آمریکا در سال ۲۰۰۱ رخ‌داده که این مسئله به‌عنوان کاتالیزوری در طول بازبینی مقررات خرابی پیشرونده عمل کرده است [۱].

نمونه‌های متعددی از خسارات به دکل‌های انتقال و خطوط در طول وقایع گذشته وجود دارد. برای مثال، در زلزله لندرز[3] در سال ۱۹۹۲، حدود ۱۰۰ خط انتقال و چندین دکل انتقال در شهر لس‌آنجلس تخریب‌شده‌اند. در زلزله کوبه[4] سال ۱۹۹۵، حدود ۳۸ خطوط انتقال نابود شد و ۲۰ دکل به علت نشست فونداسیون کج شدند. در سال ۱۹۹۹، زلزله چی‌چی[5] خسارت زیادی به دستگاه‌های برق وارد کرد و درمجموع باعث از بین رفتن سیستم قدرت الکتریکی با ۶۹ خط انتقال شد، تعداد ۱۵ دکل فروریخت و ۲۶ دکل به سمت پایین متمایل شدند. در سال ۲۰۰۸، شبکه برق سیچوان از زلزله ونچوان[6] در چین باعث فروریختن بیش از ۲۰ دکل خط انتقال ۱۱۰ کیلوولت گردید و همه دکل‌های یک خط انتقال ۲۲۰ کیلوولت در بخش مائو به‌شدت تخریب شدند [۲].

در چند دهه گذشته، محققان برخی از تحلیل‌های مربوط به سیستم خط انتقال را انجام داده‌اند. رامش و همکاران [۳] درباره اثرات دینامیکی در خرابی تدریجی سازه خرپایی، بحث کرده‌اند. تنش در سایر اعضا و تغییرات در فرکانس‌های طبیعی سازه آسیب‌دیده را بررسی کرده‌اند. آن‌ها به این موضوع دست‌یافته‌اند که کمانش اعضا ممکن است باعث ایجاد تنش قابل‌توجهی در نزدیکی اعضای مجاور، خرابی آن‌ها و درنهایت باعث فروپاشی تدریجی شوند. عسگریان و همکاران [۴] به بررسی خرابی پیشرونده یک دکل انتقال برق ۴۰۰ کیلوولت پرداخته‌اند. در این مطالعه آن‌ها به بررسی نمودارهای تاریخچه زمانی نیروی محوری پرداخته‌اند. همچنین حداکثر جابه‌جایی نوک دکل (بالاترین نقطه دکل) موردبررسی قرارگرفته است. درنهایت در این پژوهش مشخص‌شده است که دکل انتقال برق موردنظر به دلیل داشتن مسیرهای بار جایگزین در برابر خرابی پیشرونده مقاومت می‌کند و همچنین ساختار موردمطالعه حساسیت کمتری نسبت به خرابی پیشرونده در سناریوهای حذف المان در ارتفاعات بالاتر دارد.

شان گو و همکاران [۵] به بررسی تحلیل دینامیکی غیرخطی خرابی پیشرونده، به روش مسیر بار جایگزین بر روی دکل انتقال برق مشبک سه‌قطبی[7] و دکل زاویه‌ای (دکل نبشی)[8] به ارتفاع ۵۰ m تحت بار باد پرداخته‌اند. در این پژوهش خرابی پیشرونده بر روی دکل‌ها در پایه‌های متفاوت و قسمت‌های مختلف دکل بر اساس نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی بالای دکل موردبررسی قرارگرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که در دکل سه‌قطبی حذف اعضا در سه بخش اول دکل از بالا باعث فروریختن دکل نخواهد شد. حذف اعضا دکل از بخش چهارم تا پایین آن ممکن است سبب خرابی دکل انتقال برق گردد. در دکل نبشی حذف عضو در هر بخش دکل باعث فروپاشی دکل نشده است.

عبدالواحد [۶] به بررسی فرآیند فروپاشی یک دکل انتقال برق تحت تحریک زلزله پرداخته است. عبدالواحد با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود بین‌المللی ABAQUS، مدل المان محدود سه‌بعدی از دکل انتقال نیرو را ایجاد کرده است. همچنین فرآیندهای

[1] Oklahoma City
[2] WTC Twin Tower
[3] Landers Earthquake
[4] Kobe Earthquake
[5] Chi Chi Earthquake
[6] Wenchuan Earthquake
[7] Tripole Tower
[8] Angel Tower

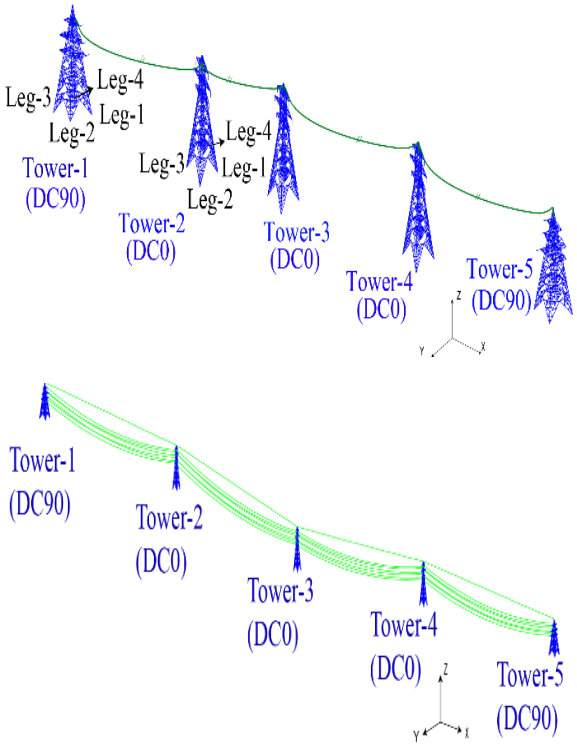
خرابی دکل انتقال برق تحت زلزله‌های مختلف با استفاده از روش تاریخچه زمانی غیرخطی شبیه‌سازی‌شده است. در این تحقیق مسیرهای سقوط و موقعیت‌های شکست دکل انتقال برق تحت تحریک‌های مختلف لرزه‌ای نیز به دست آورده شده‌اند.

با مرور پژوهش‌های پیشین انجام‌شده در زمینه خرابی پیشرونده مشاهده می‌شود که خرابی پیشرونده بر روی خطوط انتقال برق به‌ندرت موردتوجه قرارگرفته است. در چند مورد محدود موجود نیز به شبیه سازی خطوط به صورت کامل و بزرگ مقیاس پرداخته نشده است. در مطالعات پیشین اثرات کابل به‌صورت نیروی معادل و بدون مدل‌سازی استفاده‌شده است و به بررسی اثرات مدل‌سازی کابل‌های انتقال برق و سیم محافظ هوایی پرداخته نشده است. ازاین‌رو جهت رفع کاستی‌های موجود، در این مقاله بخشی از یک خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت واقعی مدل‌سازی شده و خرابی پیشرونده بر روی آن مورد بررسی قرارگرفته است. در مدل‌سازی انجام‌شده، تمام جزئیات کابل‌ها، سیم محافظ هوایی، مقره‌ها و دکل‌ها در مقیاس کامل و واقعی در نظر گرفته‌شده است. جهت نزدیک‌تر شدن مدل عددی با واقعیت، اثر کمانش در رفتار مصالح اعضای دکل، پیش‌بینی‌شده و در رفتار مفاصل فایبر معادل سازی شده است، موردی که در تحقیقات گذشته با این دقت مورد توجه قرار نگرفته است. جمیع موارد فوق تمایز روش کار و دقت ارزیابی صورت گرفته نسبت به چند مورد تحقیقات محدود گذشته در سطح بین المللی را نشان می دهد. در داخل کشور نیز فقط یکی دو مورد محدود ارزیابی صورت گرفته است که به مدل سازی کل خط انتقال نپرداخته اند. لذا پژوهش اخیر بدلیل تاکید در مدلسازی کل خط انتقال به همراه ملحقات و مبانی تحلیل غیرخطی از نوآوری لازم برخوردار بوده و امید است مورد توجه محققین قرار بگیرد.

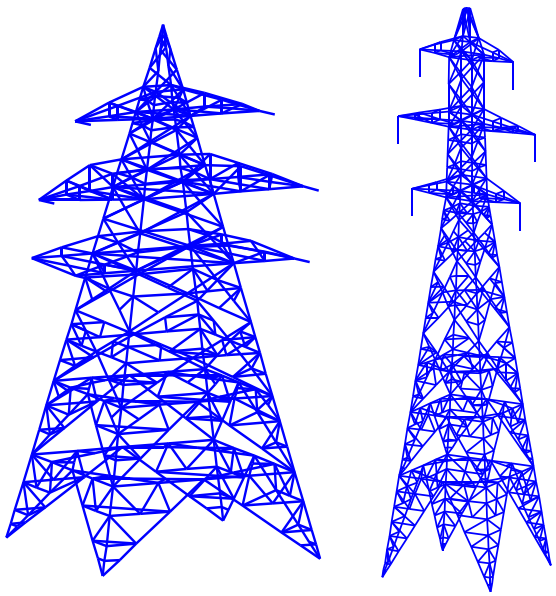
ازآنجاکه در خط انتقال نقش و اهمیت دکل‌ها حائز اهمیت است در این مقاله دکل‌های عبوری (DC0) و دکل‌های انتهایی (DC90) در خط انتقال برق مدل‌سازی شده است. جهت نزدیک‌تر شدن مدل عددی با واقعیت اثر کمانش در رفتار مصالح اعضای دکل، پیش‌بینی‌شده است. جهت آنالیز و بررسی دقیق رفتار سازه موردنظر در این پژوهش از تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده‌شده است. ازآنجاکه در این تحقیق به تحلیل خرابی پیشرونده پرداخته می‌شود و این نوع خرابی خود دارای پیچیدگی‌هایی در رفتار اعضا و مصالح آن است، به‌منظور دستیابی به‌دقت بیشتر، برای اختصاص رفتار خمیری به اعضا از مفاصل فایبر استفاده‌شده است.

۲. روش تحقیق

در این پژوهش بخشی از خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت استان فارس به‌صورت واقعی و در مقیاس کامل مدل‌سازی عددی شده و موردبررسی قرارگرفته است. شکل (۱) مدل‌سازی خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولتی در نرم‌افزار SAP2000 را نشان می‌دهد. در این خط انتقال برق ۵ دکل گنجانده‌شده است. این خط انتقال، از دکل‌های تیپ سنگین ۲۳۰ کیلوولت که شامل دکل عبوری (DC0) و دکل انتهایی (DC90) است، تشکیل‌شده است. نمای سه‌بعدی دکل‌ها و ابعاد آن‌ها در شکل‌های (۲ و ۳) آورده شده است.



شکل ۱. مدل‌سازی خط انتقال برق.

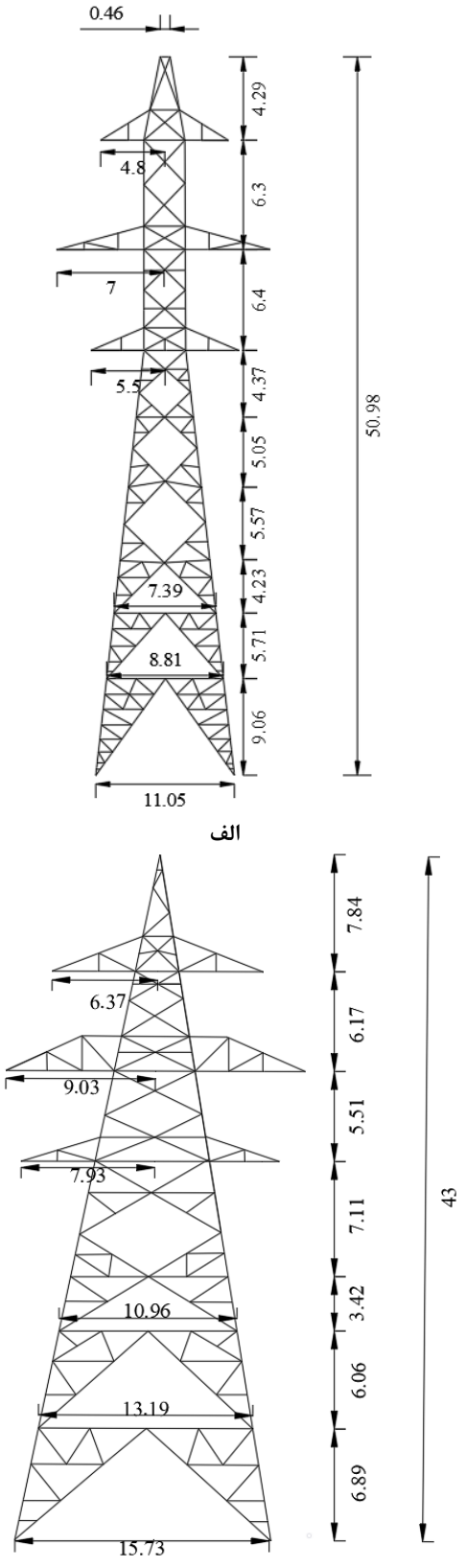


ب الف

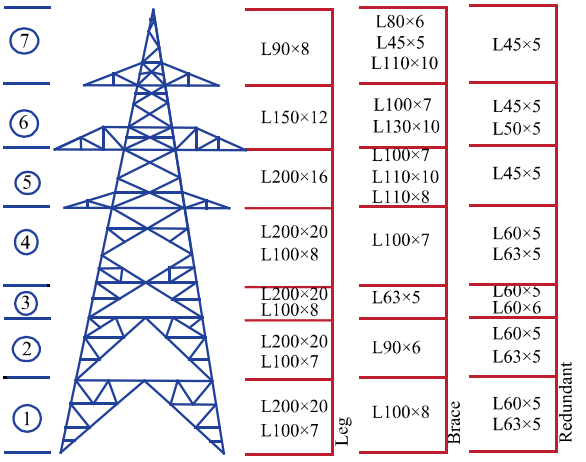
شکل ۲. نمای سه‌بعدی دکل‌های مدل‌سازی شده در تحقیق حاضر. الف) دکل عبوری DC0، ب) دکل انتهایی DC90.

برای مدل‌سازی این خط انتقال برق، از نرم‌افزار SAP2000 استفاده‌شده است. اطلاعات خط انتقال برق مدل‌سازی شده در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است. دکل‌های انتقال برق از نبشی‌های متفاوت ساخته می‌شوند که در این نوع دکل‌ها نبشی‌ها از نوع ST37 است. خصوصیات مصالح ST37 بکار رفته در نبشی‌های دکل انتقال برق در جدول (۳) شرح داده‌شده است. مقاطع استفاده‌شده در دکل‌های مدل‌سازی شده در شکل‌های (۴) و (۵) آورده شده است. اتصالات مطابق آیین‌نامه طراحی دکل‌های انتقال برق (ASCE 10-15)، اعضای قطری و قائم که به وسیله تک پیچ متصل شده‌اند به عنوان عضو خرپایی با اتصالات مفصلی مدل‌سازی می‌شوند. اعضای پایه‌ای که با چند پیچ به یکدیگر متصل شده‌اند به عنوان المان قابی با اتصال گیردار و پیوسته مدل‌سازی می‌شوند در واقع اتصالات اعضای اصلی به صورت پیوسته و اعضای اضافی به صورت مفصلی مدل‌سازی شده‌اند[۷]. مقره مورداستفاده از جنس چینی است. مطابق با نشریه ۴۲۷-۲ برای تمام خطوط نوع و مشخصات مکانیکی کابل‌ها آورده شده است. که با توجه به سطح ولتاژ خط انتقال مطالعه شده نوع کابل برای هادی‌ها Hawk و برای سیم محافظ هوایی Lynx و همچنین وزن آن‌ها مطابق نشریه ۴۲۷-۲ لحاظ گردیده است. هادی‌های انتقال برق و سیم محافظ هوایی دکل انتقال برق با استفاده از المان کابل با رفتار فقط کششی مدل‌سازی شده است. اطلاعات مربوط به سیم‌های مورداستفاده در این خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت، با توجه به نشریه ۴۲۷-۲ در جدول (۴) جمع‌آوری‌شده است [۸].

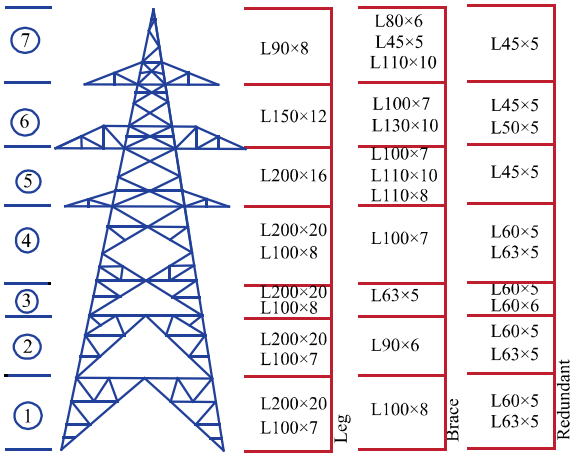
کمانش به رفتاری گفته می‌شود که معمولاً در عضو تحت اثر نیروی محوری فشاری به وجود می‌آید. اعضای تحت نیروی محوری فشاری یک سازه، پیش از رسیدن به تنش تسلیم فشاری، تحت اثر پدیده کمانش دچار شکست خواهند شد. همچنین به دلیل اینکه المان‌های دکل‌های انتقال برق تحت اثر نیروی محوری قرار دارند، بنابراین احتمال رخ دادن کمانش در اعضایی که تحت اثر نیروی محوری فشاری هستند، وجود دارد؛ بنابراین، رفتار کمانشی اعضا در دکل بسیار حائز اهمیت است و موردبررسی قرار می‌گیرد. به همین جهت در این پژوهش رفتار منحنی تنش - کرنش المان‌ها در قسمت فشاری با در نظر گرفتن رفتار کمانشی دستخوش تغییر می‌شود. بر اساس آیین‌نامه طراحی دکل‌های انتقال برق (ASCE 10-15)، تنش تسلیم در کشش (σ_y) برابر با تنش تسلیم فولاد در نظر گرفته می‌شود و برای محاسبه تنش فشاری مجاز در حالت نهایی (σ_{cr}) جهت در نظر گرفتن اثر کمانش، ظرفیت فشاری اعضا بر اساس آیین‌نامه طراحی دکل‌های انتقال برق (ASCE 10-15) با توجه به نسبت لاغری آن‌ها اصلاح‌شده است [۷].



شکل ۳. ابعاد دکل انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت استفاده‌شده در تحقیق حاضر (واحد اندازه‌ها به m). الف) دکل عبوری DC0، ب) دکل انتهایی DC90.



شکل ۴. ابعاد نبشی‌های به‌کاررفته در دکل DC90 مدل‌سازی شده در تحقیق حاضر.



شکل ۵. ابعاد نبشی‌های به‌کاررفته در دکل DC0 مدل‌سازی شده در تحقیق حاضر.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به مدل‌سازی خط انتقال.

شماره دکل	نوع دکل	ارتفاع دکل (m) (از پایه تا نوک دکل)	مختصات ارتفاعی دکل (m) از سطح زمین مبنا
دکل-۱	DC90	۴۳	۲۰۹
دکل-۲	DC0	۵۱	۱۶۸
دکل-۳	DC0	۵۱	۱۱۲
دکل-۴	DC0	۵۱	۱۱۰
دکل-۵	DC90	۴۳	۹۶

جدول ۲. اطلاعات مربوط به مدل‌سازی خط انتقال [۸].

شماره اسپن	اسپن دکل‌ها (m)	فلش هادی (m)	فلش سیم محافظ هوایی (m)
اسپن ۱ (دکل ۱ و ۲)	۳۳۵	۱۴/۴۱	۵/۶۳
اسپن ۲ (دکل ۲ و ۳)	۳۱۳	۱۲/۵۱	۵
اسپن ۳ (دکل ۳ و ۴)	۳۲۱	۱۳/۲۱	۵/۳۴
اسپن ۴ (دکل ۴ و ۵)	۳۳۵	۱۴/۴۱	۵/۶۳

جدول ۳. خصوصیات مصالح در کشش.

خصوصیات	نماد	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته	E	مگاپاسکال	۲۰۰۰۰۰
مقاومت تسلیم	F_y	مگاپاسکال	۲۴۰
مقاومت نهایی	F_u	مگاپاسکال	۳۷۰
نسبت پواسون	ϑ	-	۰/۳

جدول ۴. اطلاعات مربوط به سیم‌ها [۸].

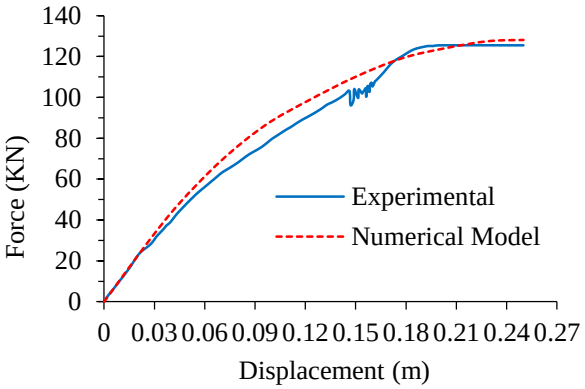
نوع سیم خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت	اسم هادی	قطر (mm)	واحد وزن (kg/m)	مدول الاستیسیته (kg/mm²)
سیم هادی	Hawk	۲۱/۷۸	۰/۹۷۶۵	۷۵۸۰
سیم محافظ هوایی	Lynx	۸/۳۷	۰/۳۳۵	۷۲۲۶

یکی از راه‌های مدل‌سازی رفتار غیرخطی اعضا، اختصاص مفاصل دارای رفتار غیرخطی با طول معین در نقاطی از عضو که احتمال وقوع رفتار دینامیکی غیرخطی وجود دارد، است. مفاصل نیز دارای انواع مختلفی هستند. مفاصل در نظر گرفته‌شده در مدل‌سازی این پژوهش از نوع مفاصل فایبر است. تعداد مفاصل فایبر در نظر گرفته‌شده در هر مقطع چهار فایبر به فواصل مساوی است. تنوع مفاصل فایبر در مدل‌سازی موردنظر بر اساس تنوع مقاطع و تنوع متریال‌های سازنده هستند. ۱۲۶ نوع مفصل در این مدل‌سازی استفاده‌شده است که با توجه به نوع متریال و مقطع هر المان، به آن تخصیص داده‌شده است.

جهت بررسی اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی دکل انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 از نتایج مدل آزمایشی قسمتی از دکل انتقال برق کاملاً مقیاس شده در تحقیق لی و مک کلور استفاده‌شده است [۹]. دکل مورد آزمایش که در شکل (۶) نشان داده‌شده است؛ با توجه به مشخصات ذکرشده در تحقیق لی و مک کلور در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده است. اعضای دکل به دو دسته اصلی (اولیه) و اضافی (ثانویه) تقسیم بندی می‌شوند. اعضای اصلی (اولیه) سیستم مثلثی (خرپای سه بعدی) را تشکیل می دهند که بارها را از نقطه اعمال به سازه به فونداسیون سازه انتقال می‌دهند. اعضای اضافی (ثانویه) برای تامین نقاط مهاری میانی برای اعضای اولیه و بنابراین کاهش طول مهارنشده اعضای اولیه استفاده می‌شوند. اتصالات اعضای اصلی به‌صورت گیردار (پیوسته) و اعضای اضافی به‌صورت مفصلی مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به تنوع طولی المان‌ها متریال‌های متنوعی تعریف‌شده و به المان‌ها و مفاصل فایبر اختصاص داده‌شده است. از تحلیل پوش آور نمودار نیرو-جابه‌جایی استخراج‌شده و با نمودار نیرو-جابه‌جایی دکل مقیاس شده مقایسه شده است (شکل ۷). برای تحلیل پوش آور نیروی اعمالی به نوک

کـراس آرم وارد شـده اسـت. بـه مقایسـه نتـایج نمودارهـای به‌دست‌آمده به‌صـورت کمـی و عـددی پرداختـه‌شـده اسـت و بـا مقایسه ظرفیت نهایی مـدل مقیـاس شـده و مـدل‌سـازی عـددی پرداخته و به میزان دقت تقریباً ۹۸ درصد دست‌یـافتیم. درنهایـت با توجه به‌دقت قابل‌قبول ارزیـابی عـددی صـورت گرفتـه صـحت مدل‌سازی انجام‌شده تأییدشده است.

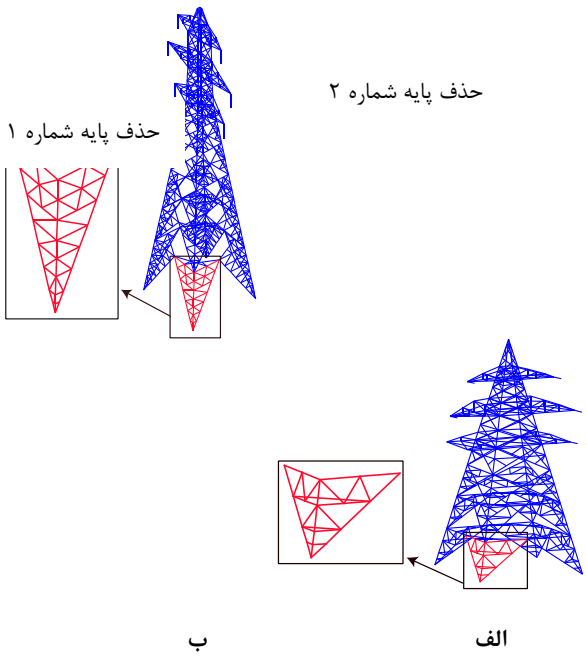
شکل ۶. نمای سه‌بعدی دکل مقیاس شده در تحقیقات آزمایشگاهی لی و مک کلور [۹].



شکل ۷. مقایسه منحنی نیرو-جابه‌جایی مدل عددی و مدل مقیاس شده در قسمت نوک کراس آرم دکل [۹].

۳. تحلیل خرابی پیشرونده

در این پژوهش خرابی پیشرونده خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت تحت اثر بار ثقلی موردبررسی قرار می‌گیرد. منظور از بار ثقلی صرفاً بارهای ثقلی ناشی از حضور بار وزن اجزای سازنده دکل و همچنین بار ناشی از وزن کابل‌های انتقال برق و محافظ هوایی است. خرابی پیشرونده بر روی دکل DC0 شماره ۲ براثر حذف پایه شماره ۲ و دکل DC90 شماره ۱ براثر حذف پایه شماره ۱ تحت اثر بار ثقلی سازه و کابل آنالیز و موردبررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۸) پایه‌های حذف شده در دکل‌های مورد نظر با رنگ قرمز نمایش داده شده است.

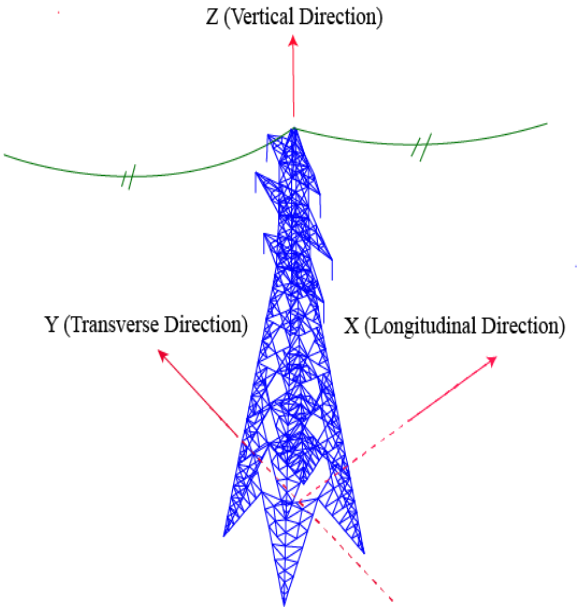


شکل ۸. نمایی از پایه‌های حذف‌شده در دکل‌های بررسی‌شده. الف) دکل DC0 شماره ۲، ب) دکل DC90 شماره ۱.

با توجه بـه اینکـه آیـین‌نامـه مورداسـتفاده در بحـث خرابـی پیشرونده، آیین‌نامه DOD2013 است. طبق این آیـین‌نامـه جهـت تحلیل خرابی پیشرونده خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت با اسـتفاده از تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی، ابتدا خـط انتقـال بـرق بـا استفاده از تحلیل اسـتاتیکی آنـالیز و عکـس‌العمـل‌هـای وارد بـر قسمت منتخب‌شده جهت حذف به دست آورده مـی‌شـود. سـپس عکس‌العمل‌های حاصل، جایگزین منطقه حـذف‌شـده مـی‌گـردد. پس‌ازاینکه سازه تحت اثر بارگذاری ذکرشده به حالت تعادل رسید برای شبیه‌سازی حذف ناگهانی اعضا، عکس‌العمل‌های واردشده در یک مدت‌زمان محدود از روی سازه حذف می‌شوند. سـپس بـرای سازه تحت بارگذاری جدیـد، تحلیـل دینـامیکی تاریخچـه زمـانی موردنظر انجام می‌شود. درواقع آنالیز سازه باید تا زمانی کـه سـازه به حداکثر تغییر مکان خود مـی‌رسـد و یـا یـک سـیکل کامـل از نوسان را در محل حذف ستون انجام مـی‌دهـد ادامـه یابـد. بـرای اینکه عمل حذف ستون بـه‌صـورت ناگهـانی اتفـاق افتـد و اثـرات دینامیکی داشته باشد، مدت‌زمان حذف باید کوچک‌تر از یک‌دهـم دوره تناوب مود ارتعاش قائم سازه در محل حذف موردنظر باشـد. تفاوت تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطـی در نـوع رفتـار مصـالح آن‌ها است. در تحلیل خطی رفتـار مصـالح بـه‌صـورت خطـی و در تحلیل غیرخطی رفتار به‌صورت غیرخطی در نظر گرفته مـی‌شـود. همچنین ضمن در نظر گرفتن اثرات مرتبـه دوم در رونـد تحلیـل، اثر کمانشی در رفتار مصالح به صورت غیر خطی پیش بینی شـده است.

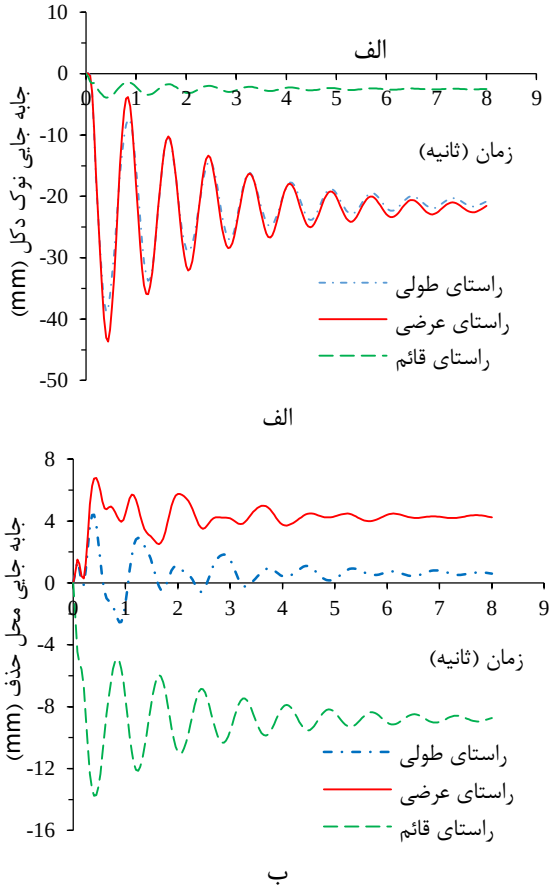
از نتایجی که در تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی موردبررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد می‌توان به جابه‌جایی دکل در محل حذف و نوک دکل (بالاترین نقطه دکل) اشاره کرد. در نمودار جابه‌جایی برحسب زمان حداکثر میزان جابه‌جایی و میزان جابه‌جایی که در آن سازه به حالت پایدار خود می‌رسد نشان داده‌شده است. نمودار جابه‌جایی برحسب زمان در تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی در دو دکل DC0 شماره ۴ پس از حذف پایه شماره ۲ و DC90 شماره ۱ پس از حذف پایه شماره ۱ در شکل‌های (۱۰) الی (۱۳) آورده شده است.

نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی محل حذف و نوک دکل که درواقع نمودار جابه‌جایی برحسب زمان تحلیل دینامیکی غیرخطی خرابی پیشرونده است در سه راستای طولی، عرضی و قائم موردبررسی قرار می‌گیرد (شکل ۹). منظور از راستای طولی[1]، راستای امتداد خط انتقال برق و کابل‌ها یا راستای عمود بر کراس آرم‌ها است. راستای عمود بر خط انتقال برق و کابل‌ها یا راستای کراس آرم‌ها را راستای عرضی[2] می‌گویند. راستای قائم[3] نیز در راستای ارتفاع دکل‌ها است.



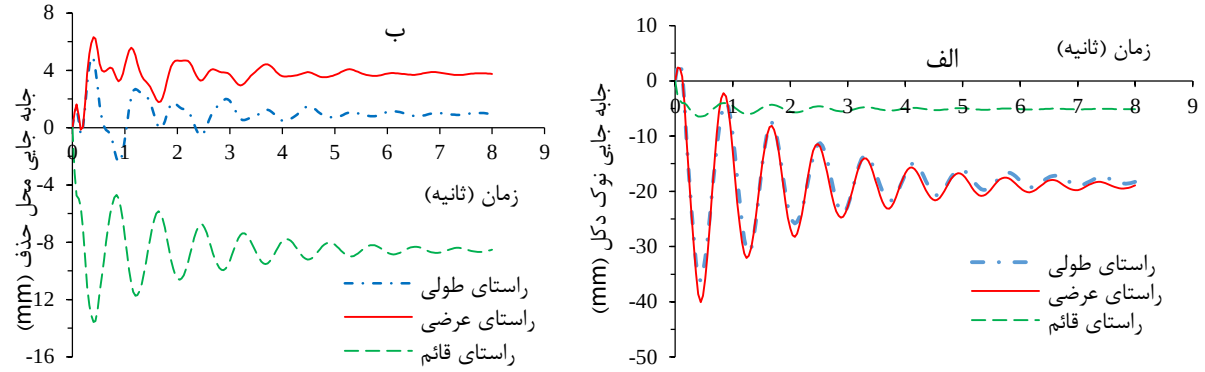
شکل ۹. جهت‌های محور مختصات در خط انتقال برق مدل‌سازی.

با توجه به نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌ها می‌توان دریافت که در راستای قائم، محل حذف نسبت به نوک دکل دارای جابه‌جایی بیشتری است. درنتیجه خرابی پیشرونده تحت بار ثقلی ناشی از جرم سازه و کابل بیشترین تأثیر را در محل حذف پایه داشته است. همچنین در راستای قائم، میزان ارتفاع محل حذف بسیار بیشتر از نوک دکل است. پس می‌توان گفت حذف پایه بیشترین تأثیر را در محل حذف گذاشته است و میزان تأثیر آن در نوک دکل محسوس نیست. در راستای طولی و عرضی نتیجه حاصل از حذف پایه برعکس راستای قائم است؛ یعنی حذف پایه بیشترین تأثیر را بر میزان ارتعاش و جابه‌جایی در نوک دکل به نسبت محل حذف دارد. درنهایت همان‌طور که مشاهده می‌شود این مقادیر جابه‌جایی اندک هستند. نزدیک بودن پاسخ‌ها در دو تحلیل خطی و غیرخطی در نوک دکل و محل حذف نشان دهنده این است که سازه چندان وارد ناحیه غیرخطی نشده است. لذا مفروضات تحلیل خطی پاسخ مناسبی را ارائه داده است. مقدار تفاوت ناچیز در این دو تحلیل به دلیل تفاوت نحوه حل تحلیل خطی و غیرخطی در نرم افزار می‌باشد. در نهایت می‌توان به این نتیجه دست یافت که دکل مورد نظر با حذف یک پایه در این سناریو نیز همچنان پایدار باقی مانده و وارد ناحیه غیرخطی نشده است.

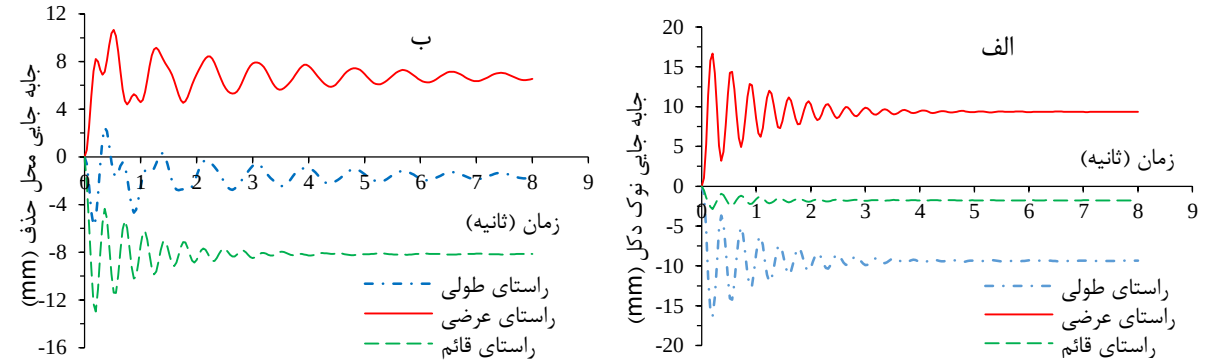


شکل ۱۰. تاریخچه زمانی جابه‌جایی محل حذف دکل DC0 شماره ۲ در تحلیل دینامیکی خطی خرابی پیشرونده پس از حذف پایه. الف) محل حذف، ب) نوک دکل.

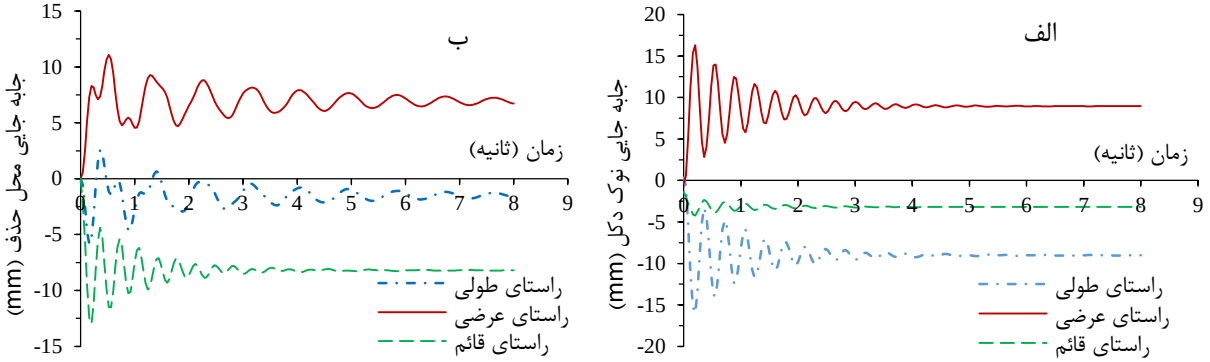
[1] Longitudinal Direction
[2] Transverse Direction
[3] Vertical Direction



شکل ۱۱. تاریخچه زمانی جابه‌جایی محل حذف دکل DC0 شماره ۲ در تحلیل دینامیکی غیرخطی خرابی پیشرونده پس از حذف پایه. الف) محل حذف، ب) نوک دکل.



شکل ۱۲. تاریخچه زمانی جابه‌جایی محل حذف دکل DC90 شماره ۱ در تحلیل دینامیکی خطی خرابی پیشرونده پس از حذف پایه. الف) محل حذف، ب) نوک دکل.



شکل ۱۳. تاریخچه زمانی جابه‌جایی محل حذف دکل DC90 شماره ۱ در تحلیل دینامیکی غیرخطی خرابی پیشرونده پس از حذف پایه. الف) محل حذف، ب) نوک دکل.

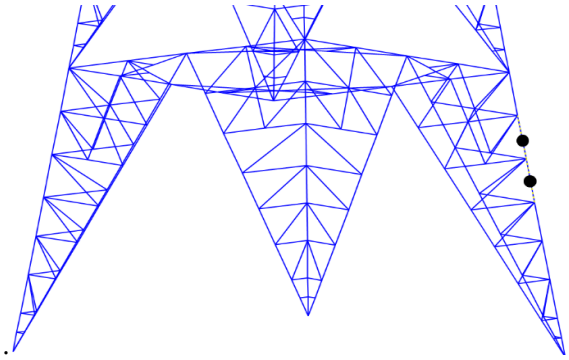
همچنین در تحلیل دینامیکی خطی مطابق با آیین‌نامه DOD2013 به بررسی نسبت تقاضا به ظرفیت سازه به‌عنوان معیار پذیرش خرابی پرداخته می‌شود. از این نسبت جهت ارزیابی اعضای ساختاری که نیروهای وارد بر آن‌ها از ظرفیتشان فراتر رفته استفاده می‌شود. برای شناسایی خرابی در سازه تحت خرابی پیشرونده در تحلیل دینامیکی خطی، درصورتی‌که نسبت تقاضا به ظرفیت به وجود آمده در هر المان از مقدار یک تجاوز کند آن المان دچار خرابی می‌شود [۱۰]. با حذف پایه موردنظر دکل DC0 شماره ۲، مقادیر نسبت تقاضا به ظرفیت در سایر المان‌ها محاسبه‌شده است. در این سناریو المان‌هایی از دکل که دارای نسبت تقاضا به ظرفیت بزرگ‌تر از واحد هستند در شکل (۱۴) با علامت دایره نشان داده‌شده است. در دکل DC0 شماره ۲ درنتیجه بررسی مقادیر DCR نشان می‌دهد که در تحلیل دینامیکی خطی خرابی پیشرونده، دو المان از دکل موردبررسی ازنظر ظرفیتی پاسخگوی بار ثقلی ناشی از جرم سازه و کابل نیستند.

با حذف پایه موردنظر دکل DC90 شماره ۱، مقادیر نسبت تقاضا به ظرفیت در سایر المان‌ها محاسبه‌شده است. در این سناریو

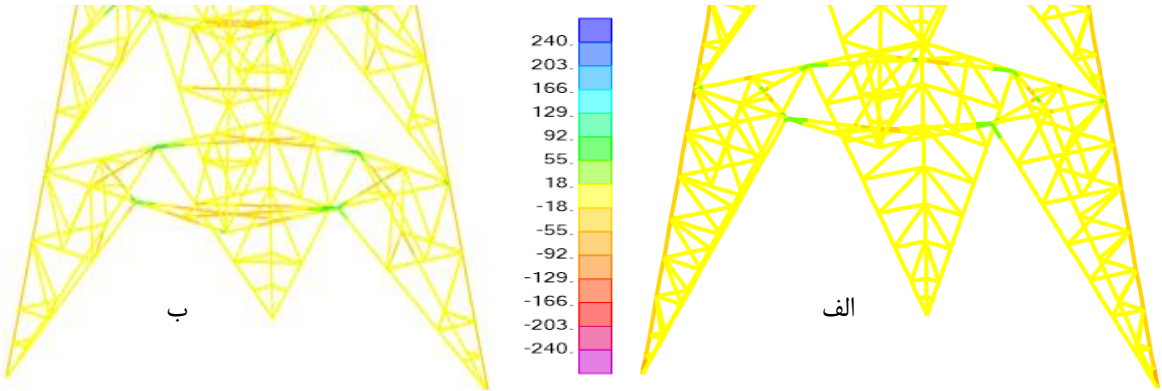
تمامی المان‌های دکل دارای نسبت تقاضا به ظرفیت کوچک‌تر از واحد هستند. درنتیجه بررسی مقادیر DCR نشان می‌دهد که در تحلیل دینامیکی خطی خرابی پیشرونده، تمامی المان‌ها ازنظر ظرفیتی پاسخگوی بار ثقلی دکل موردنظر هستند.

همچنین در تحلیل دینامیکی غیرخطی دکل انتقال برق به ارزیابی تنش در سازه موردنظر پرداخته می‌شود. پس از حذف پایه موردنظر با بررسی وضعیت تنش و حداکثر تنش محوری به وجود آمده در المان‌ها می‌توان به رفتار باز توزیع نیروها در سازه و چگونگی تأثیرگذاری محل حذف در میزان تنش المان‌های مجاور پی برد. توزیع تنش محوری سازه در سناریو حذف پایه موردنظر دکل DC0 شماره ۲ و دکل DC90 شماره ۱ در شکل (۱۵) آورده شده است. ماکزیمم تنش محوری فشاری و کششی که دکل DC0 شماره ۲ تجربه کرده است به ترتیب مقادیر ۶۳- و ۲۸ مگاپاسکال دکل DC90 شماره ۱ به ترتیب مقادیر ۵۵- و ۷۷ مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به مصالح تشکیل‌دهنده سازه دکل‌ها هیچ‌کدام از المان‌ها از حد تسلیم در کشش فولاد فراتر نرفته و تسلیم نشده است و در فشار نیز هیچ‌کدام از المان‌ها کمانش نکرده‌اند، درنتیجه هر دو دکل پایداری خود را حفظ کرده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت با حذف پایه دکل DC0 شماره ۲، دوپایه کناری محل حذف (پایه‌های شماره ۱ و ۳) تحت اثر نیروی فشاری قرارگرفته و پایه مقابل محل حذف (پایه شماره ۴) تحت نیروی کششی است. با حذف پایه دکل DC90 شماره ۱، دوپایه کناری محل حذف (پایه‌های شماره ۲ و ۴) تحت اثر نیروی فشاری قرارگرفته و پایه مقابل محل حذف (پایه شماره ۳) تحت نیروی کششی است.

از نتایج دیگری که در تحلیل دینامیکی غیرخطی موردبررسی قرار می‌گیرد؛ بررسی تعداد تسلیم المان‌ها در کشش و کمانش المان‌ها در فشار است. المان‌های دکل انتقال برق در کشش همانند کششی مرسوم فولاد عمل کرده و در فشار المان‌ها با توجه به تنوع طولی، دارای لاغری‌ها و ظرفیت فشاری متفاوت هستند. پس از انجام تحلیل، تنش‌های به وجود آمده در المان‌ها را با توجه به نوع کششی یا فشاری بودن المان‌ها با تنش تسلیم و ظرفیت مربوطه مقایسه می‌کنیم. چنانچه تنش المان‌ها از حد ظرفیت در کشش و فشار فراتر روند، آن المان تسلیم و دچار خرابی یا کمانش می‌شود. در غیر این صورت المان هنوز به حد تسلیم خود نرسیده و دچار خرابی یا کمانش نشده است. پس از حذف پایه در دکل DC0 شماره ۲ و دکل DC90 شماره ۱ هیچ‌کدام از المان‌ها از حد تسلیم مفروض عبور نکرده است و هیچ‌کدام از المان‌ها در فشار کمانش پیدا نکرده‌اند. درنتیجه هر دو دکل موردنظر با تحلیل دینامیکی غیرخطی خرابی پیشرونده تحت بار ثقلی دکل و کابل در ناحیه الاستیک باقی‌مانده است. همچنین هیچ مفصل پلاستیکی در المان‌ها ایجاد نشده و سازه همچنان در حالت پایدار قرار دارد؛ بنابراین در این سناریوها دکل‌ها از خرابی پیشرونده مصون بوده و سازه‌های موردنظر، مقاوم در برابر گسیختگی پیشرونده ارزیابی‌شده است.



شکل ۱۴. المان‌های دارای نسبت تقاضا به ظرفیت بزرگ‌تر از یک دکل DC0 شماره ۲ در تحلیل دینامیکی خطی خرابی پیشرونده پس از حذف پایه



شکل ۱۵. توزیع تنش محوری (مگاپاسکال) المان‌های نزدیک به پایه حذف‌شده در تحلیل دینامیکی غیرخطی خرابی پیشرونده پس از حذف پایه. الف) دکل DC0 شماره ۲، ب) دکل DC90 شماره ۱.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی خرابی پیشرونده خط انتقال برق ۲۳۰ کیلوولت پرداخته شد. تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی براثر حذف یک‌پایه از دکل‌های عبوری (DC0) و دکل انتهایی (DC90) انجام شد. در این پژوهش جهت ارزیابی خرابی پیشرونده به بررسی سناریوهای ناشی از بار ثقلی سازه و کابل پرداخته شد. تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی در اثر حذف یک‌پایه برای سناریو بار ثقلی ناشی از وزن سازه و کابل انجام گردید و نتایج جابه‌جایی محل حذف و نوک دکل به‌صورت نمودار تاریخچه زمانی گزارش گردید. همچنین توزیع تنش در المان‌های مجاور و المان‌های تسلیم‌شده استخراج گردیده است. در تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی در اثر حذف یک‌پایه برای سناریو بار ثقلی ناشی از جرم سازه و کابل، رفتار سازه نشان داد که نتایج تحلیل دینامیکی خطی و غیرخطی نزدیک به یکدیگر است. لذا می‌توان گفت که سازه موردنظر در این سناریو وارد ناحیه غیرخطی نشده است و پایدار باقی‌مانده است. دکل‌های DC0 و DC90 در تحلیل دینامیکی غیرخطی در اثر حذف یک‌پایه تحت بار ثقلی ناشی از جرم سازه و کابل پایدار است و هیچ‌کدام از المان‌های دکل‌های بررسی‌شده دچار کمانش فشاری نشده‌اند. با بررسی دکل‌های عبوری و انتهایی این نتیجه حاصل شد که میزان جابه‌جایی‌های نوک دکل در دکل انتهایی (DC90) نسبت به دکل عبوری (DC0) کمتر است. درنتیجه دکل‌های انتهایی نسبت به دکل‌های عبوری از مقاومت بالایی برخوردارند. حذف پایه در خرابی پیشرونده تحت بار ثقلی ناشی از جرم سازه و کابل، در راستای قائم بیشترین تأثیر را در محل حذف گذاشته است و میزان تأثیر آن در نوک دکل محسوس نیست. در راستای طولی و عرضی نتیجه حاصل از حذف پایه برعکس راستای قائم است؛ یعنی حذف پایه بیشترین تأثیر را بر میزان ارتعاش و جابه‌جایی در نوک دکل به نسبت محل حذف دارد.

۵. مراجع

[1] Wang, H.; Zhang, A.; Li, Y.; Yan, W. “A Review on Progressive Collapse of Building Structures”; Open Civ. Eng. J. 2014, 8, 183–192.

[2] Tian, L.; Li, H.; Liu, G. “Seismic Response of Power Transmission Tower-Line System Subjected to Spatially Varying Ground Motions”; Math. Probl. Eng. 2010, Article ID 587317.

[3] Malla, R. B.; Nalluri, B. B. “Dynamic Effects of Member Failure on Response of Truss-Type Space Structures”; J. Spacecr. Rockets. 1995, 32, 545–551.

[4] Asgarian, B.; Dadras Eslamlou, S.; E Zaghi, A.; Mehr, M. “Progressive Collapse Analysis of Power Transmission Towers”; J. Constr. Steel Res. 2016, 123, 31–40.

[5] Gao, S.; Wang, S. “Progressive Collapse Analysis of Latticed Telecommunication Towers under Wind Loads”; Adv. Civ. Eng. 2018, Article ID 3293506.

[6] Abdelwahed, B. “A Review on Building Progressive Collapse, Survey and Discussion”; Case Stud. Constr. Mater. 2019, 11, e00264.

[7] American Society of Civil Engineers “Design of Latticed Steel Transmission Structures”; 2015, ASCE/SEI 10-15.

[8] “General Technical Specification and Execution Procedures for Transmission and Sub transmission Networks Transmission Lines”; Islamic Republic of Iran, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, No. 427-2 (In Persian).

[9] Lee, P. S.; McClure, G. “Elastoplastic Large Deformation Analysis of a Lattice Steel Tower Structure and Comparison with Full-Scale Tests”; J. Constr. Steel Res. 2007, 63, 709–717.

[10] “Unified Facilities Criteria (UFC): Design of Buildings To Resist Progressive Collapse”; UFC 4-023-03, United States, Department of Defense, 2013.