

تشخیص آسیب در اتصالات پیچی دکل‌های انتقال نیرو به کمک یکی از روش‌های یادگیری ماشین: بسته‌بندی درختی

تورج تقی‌خانی^{۱*}، علی‌رضا بینوایان^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۳/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۵، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۴/۵

چکیده

خطوط انتقال نیرو در صنعت برق به دلیل پراکندگی در سطح کشور و عبور از مناطق جغرافیایی مختلف تحت شرایط اقلیمی گوناگون و سخت هر ساله با حوادث و خرابی‌های متعددی روبرو می‌شوند. به دلیل اهمیت این بخش در صنعت برق نظارت مستمر بر کارکرد دکل‌های مشبک فلزی نگهدار این خطوط امری ضروری است. در سال‌های اخیر پایش برخط عملکرد سازه‌ها با نظارت بر تغییرات پاسخ دینامیکی آن‌ها از طریق نصب حسگر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. لیکن شناسایی محل خرابی در سازه‌هایی مانند دکل‌های مشبک فلزی که اجزای متعددی دارند، مشکلاتی را به همراه داشته که ضرورت به کارگیری تکنیک‌هایی با قابلیت حجم پردازش بالا را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. یکی از راه‌حل‌ها، بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین است که مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. در این مقاله تلاش می‌گردد که با بهره‌گیری از یکی از الگوریتم‌های طبقه‌بندی در یادگیری ماشین محل، نوع و میزان خرابی در اتصالات پیچی در این سازه‌ها شناسایی گردد. از این رو ابتدا یکی از دکل‌های رایج خطوط انتقال در کشور، مدل‌سازی و تحت بار باد تحلیل دینامیکی می‌شود. سپس اتصالات مختلف آن در ناحیه پایه‌های دکل انتقال نیرو با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی می‌گردد. در ادامه مجموعه‌ای محدود از اشکال مختلف آسیب در اتصالات شبیه‌سازی و شکل‌های مودی و فرکانس‌های طبیعی در این شرایط برای آموزش الگوریتم طبقه‌بندی استخراج می‌شود. از پایگاه داده‌ای به دست آمده جهت شناسایی آسیب در سناریوهای مختلف استفاده می‌شود. نتایج این تحقیق تأکید بر مؤثر بودن روش انتخابی در شناسایی محل انواع خرابی تعریف شده در اتصالات پایه دکل‌ها و میزان آن دارد.

کلیدواژه‌ها: دکل‌های انتقال نیرو، اتصالات وصله‌ای، پایش سلامت سازه‌ای، فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی.

۱- مقدمه

غیاب برنامه‌های بازرسی، کنترل کیفی، تعمیر و نگهداری مدون گسترش می‌یابند و می‌تواند موجب خرابی کلی سازه دکل گردد. از این رو بهره‌گیری از دانش روز در اجرای این برنامه‌ها و شناسایی دقیق‌تر محل آسیب با تکنیک‌های غیروابسته به قضاوت انسانی نقشی تعیین‌کننده در کاهش ریسک خرابی دکل‌ها داشته و اثرات اقتصادی و اجتماعی ناشی از آن تعیین‌کننده خواهد بود. مطالعات متعددی در خصوص پایش سلامت و شناسایی دکل‌های انتقال صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به مقاله Yin و همکاران در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد که اقدام به شناسایی آسیب در دکل‌های انتقال با تعداد محدودی حسگر نمودند. آن‌ها پارامترهای مودال سازه را از داده‌های ارتعاش محیطی اندازه‌گیری و از آن برای شناسایی سیستم استفاده نمودند.

در تحقیقی دیگر Skarbek و همکاران در سال ۲۰۱۴ اقدام به شناسایی آسیب در دکل‌های انتقال نیرو، با استفاده از این

به دلیل نقش اساسی شریان‌های حیاتی و سازه‌های زیربنایی در کشورها سالیانه هزینه‌های فراوانی صرف ساخت و نگهداری آن‌ها می‌شود. توقف سرویس‌دهی بسیاری از ساختمان‌های مهم و حیاتی می‌تواند باعث خسارات زیادی شود. از این رو محققین همواره به دنبال راهکارهای ابتکاری برای بازبینی و شناسایی سریع‌تر، اقتصادی‌تر و دقیق‌تر وضعیت سازه‌ها هستند. پایش سلامت سازه یکی از مؤثرترین راهکارها برای نگهداری از سازه‌ها در مقابل خسارت‌های پیش‌بینی نشده است.

دکل‌های انتقال نیرو در طول عمر عملیاتی خود تحت تأثیر عوامل محیطی، تواتر بارهای دینامیکی و وقوع شرایط غیرمترقبه می‌باشند و این عوامل به تدریج خسارت‌ها و آسیب‌هایی را در اعضا و قسمت‌های مختلف سازه به وجود می‌آورد. میزان این آسیب‌ها در

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۶۴۵۴۳۰۱۶

یکی از پرتکرارترین عوامل خرابی اتفاق افتاده در مورد دکل‌های مشبک در برق‌های منطقه‌ای مختلف، سرقت می‌باشد (شکل (۱)).



شکل ۱- سرقت پیچ‌های اعضای متصل به هم در قسمت پایه دکل‌های انتقال نیرو

سرقت‌ها را می‌توان به‌طور عمده به دو نوع طبقه‌بندی کرد:

۱) سرقت نبشی

۲) سرقت پیچ‌های اتصال. نکته حائز اهمیت این است که به دلیل صعوبت دسترسی به ترازهای بالای دکل‌های مشبک و همچنین سنگین‌تر بودن اعضای استفاده شده در قسمت تحتانی دکل (اعضای قسمت تحتانی به دلیل هندسه دارای طول‌های بزرگ‌تر و به دلایل سازه‌ای دارای سطح مقطع بالاتری می‌باشند)، میزان سرقت در اعضای تحتانی بسیار بیشتر می‌باشد. از این رو بهره‌گیری از روشی که بتواند هرگونه نقصان در اجزا و یا آسیب در اتصالات را پیش از این‌که منجر به خسارت جبران‌ناپذیر بشود را مشخص نماید ضرورت ارائه این مقاله را نشان می‌دهد. در این راستا مقاله حاضر تلاش دارد تا با ارائه روشی مبتنی بر تغییرات پارامترهای مودال سازه نظیر تغییر مشخصات فرکانسی و شکل‌های مودی، مکان و شدت آسیب در اتصالات این نوع از سازه‌ها را تعیین نماید. به‌همین منظور در ابتدا مشخصات یک دکل واقعی، در نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ مدل‌سازی و سپس تحت تحریک محیطی قرار می‌گیرد. سپس اتصالات وصله‌ای این سازه در یک محدوده ۹ متری از کل ارتفاع دکل انتقال نیرو (پایه‌های دکل انتقال نیرو) در نرم‌افزار ایدیا استاتیکا مدل و تحلیل سختی شدند. سپس با

ویژگی‌ها و با بهره‌گیری از روش‌های محاسبات نرم نمودند. آن‌ها شاخص‌های آسیب فرکانس را با استفاده از شبکه عصبی مورد بررسی قرار دادند.

Zhao و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از روش زیر فضای تصادفی فرکانس طبیعی دکل انتقال نیرو ۱۱۰ کیلوولتی را به دست آورده و دریافتند فرکانس شناسایی شده به سرعت باد وابسته است.

دکتر Karami و همکاران در سال ۲۰۲۰ از طریق کمینه‌سازی ورودی‌های غیرقطری در ماتریس معیار اطمینان مودال موقعیت بهینه حسگرها را ارائه دادند و با استفاده از انحنای اشکال مودی همراه با تبدیل موجک پیوسته چهار سناریو آسیب جهت ارزیابی شناسایی آسیب در نظر گرفتند و نتایج نهایی نشان داد که با وجود کاهش تعداد حسگر، همچنان امکان شناسایی آسیب وجود دارد. تحقیقات اشاره شده در بالا بدون توجه به آسیب در اتصالات دکل‌های انتقال نیرو انجام گرفت. لیکن شناسایی آسیب در اتصال این نوع از سازه‌های حیاتی به دلیل تواتر وقوع در خطوط انتقال در ایران از اهمیت بالایی برخوردار است. در رابطه با بررسی رفتار اتصالات دکل‌های انتقال نیرو می‌توان به پژوهش‌های Ungkurapinan و همکاران در سال ۲۰۰۰ اشاره نمود.

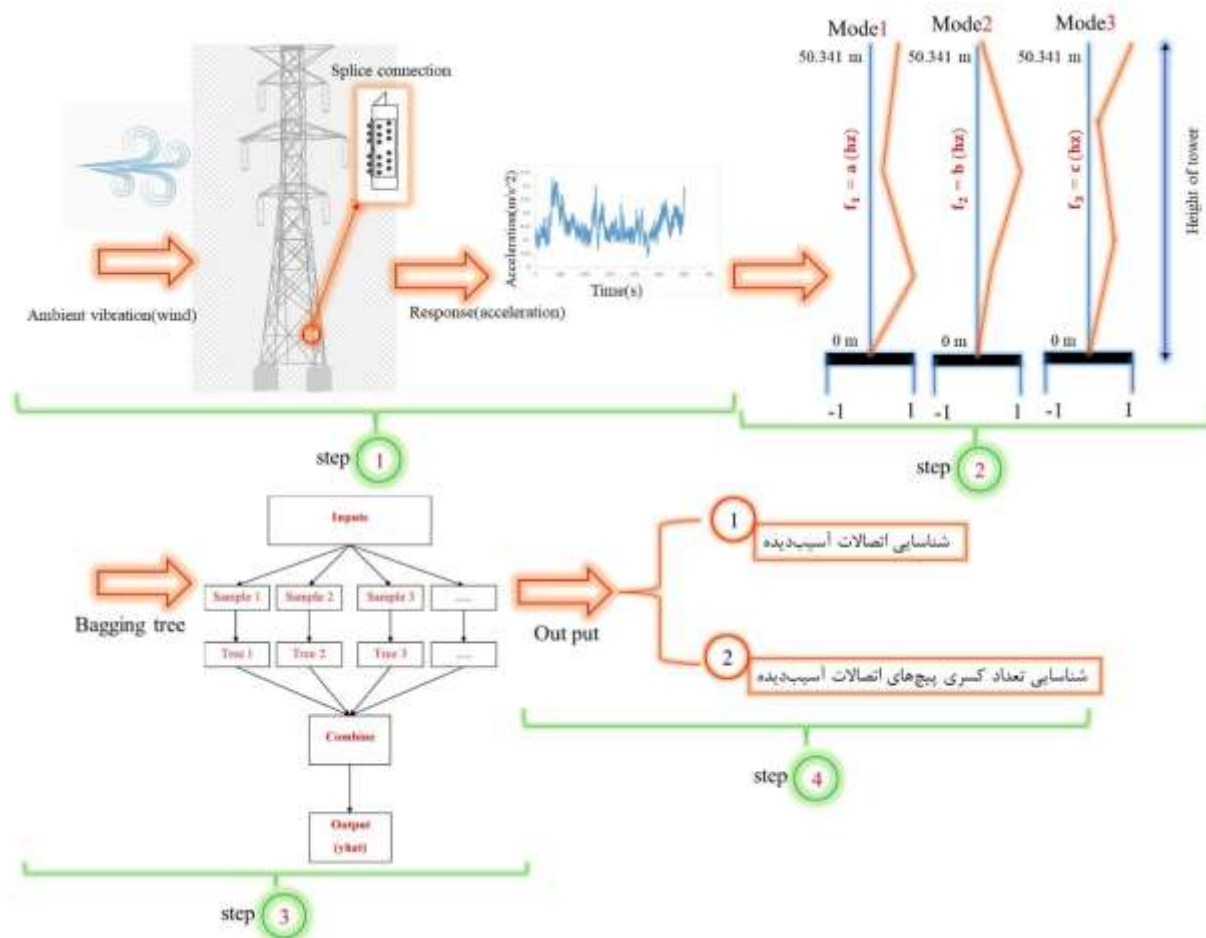
همچنین در تحقیق Szafran و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از نرم‌افزار آیدیا استاتیکا اقدام به مدل‌سازی اتصالات یک دکل مخابراتی مشبک (از نظر هندسه مشابه دکل‌های انتقال نیرو) به‌منظور یک روش تخمین قابلیت اطمینان کرده بودند.

همچنین در مطالعه Zhao و همکاران در سال ۲۰۲۱، مدل‌های المان محدود از اتصالات یک دکل انتقال ۵۰۰ کیلوولت تهیه گردید. توجه این کار برای اتصال نواحی قرار داشت که در اثر نیروی باد تحت تنش ماکزیمم بود. در ادامه تجزیه و تحلیل مودال برای به‌دست آوردن تأثیر شلی پیچ بر فرکانس‌های طبیعی انجام شد. پس از آن، روشی مبتنی بر تحلیل مودال و شبکه خنثی تابع پایه شعاعی معرفی و برای شناسایی مکان و شدت شلی پیچ در صفحه پوششی استفاده گردید. در مقایسه با تحقیقات پیشین، پژوهش حاضر تلاش دارد تا با ارائه روشی ابتکاری آسیب‌های احتمالی رخ داده در اتصالات وصله‌ای دکل‌های انتقال نیرو در ناحیه پایه‌ها را مورد بررسی قرار دهد. در این کار به دلیل حجم داده‌های استخراج شده ناشی از اثرات آسیب در اتصالات بر رفتار دینامیکی سازه دکل، راه‌حل پیشنهادی با روش‌های یادگیری ماشین (روش بسته‌بندی درختی) ترکیب و امکان تحلیل فراهم خواهد گردید. در این خصوص از حساسیت ویژگی‌هایی نظیر فرکانس‌های طبیعی و نیز انحنای اشکال مودی برای شناسایی آسیب در اتصالات استفاده خواهد گردید.

متلب^۳ از روش‌های یادگیری جمعی^۴ موجود برای پردازش پایگاه-های داده‌ای مختلف جهت فرایند شناسایی آسیب استفاده می‌گردد. در نهایت فرایند شناسایی آسیب‌های مختلف در دو مرحله انجام می‌گیرد:

- (۱) تشخیص آسیب در اتصالات مختلف هر پایه در محدوده ۹ متری از کل دکل (پایه‌ها)
- (۲) شناسایی آسیب‌های مختلف در پیچ‌های اتصالاتی که در مرحله قبل، آسیب آن‌ها شناسایی شده بودند. کل فرایند انجام گرفته در این مقاله در شکل (۲) به نمایش گذاشته می‌شود.

استفاده از نتایج این نرم‌افزار (سختی‌های حاصل از تحلیل سختی انجام گرفته در اتصالات مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آیدیا استاتیکا)، مجموعه مشخصی از آسیب‌ها در نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ مجدداً مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی می‌گردد. با استفاده از پاسخ تاریخیچه زمانی شتاب سازه‌ای در سناریوهای مختلف آسیب، ویژگی‌هایی نظیر فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی (۵ مود اول) استخراج می‌شود. از این اطلاعات برای ایجاد پایگاه داده‌ها جهت آموزش و آزمون در الگوریتم‌های مبتنی برای یادگیری استفاده می‌نماییم. در نهایت با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار



شکل ۲- فلوجارت کارهای انجام گرفته در مقاله

داده شده است. برای تحلیل‌های آتی از بار باد شبیه‌سازی شده برای تحریک سازه استفاده گردید. فشار باد روی سطح اعضای برج به صورت نیروی عرضی در طراحی برج اعمال می‌گردد و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (نشریه ۴۵۷):

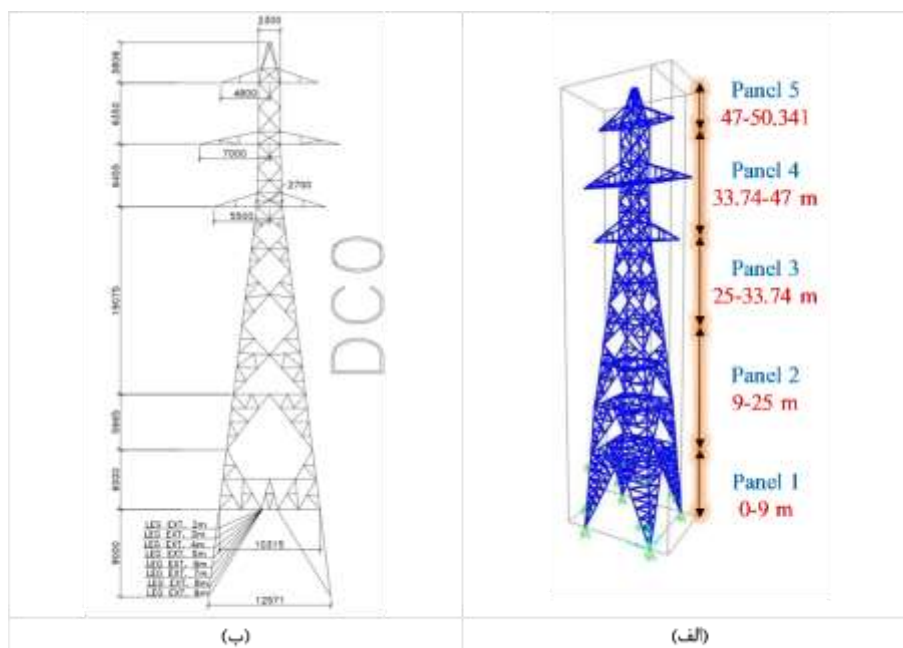
$$F_w = \frac{(V_{WH})^2}{16 \times C \times A} \quad (1)$$

۲- مدل‌سازی دکل انتقال نیرو

در این بخش ابتدا نوع دکل بر اساس فراوانی کاربرد در خطوط اصلی ۲۳۰ کیلوولت، تیپ DC0 انتخاب گردید. سپس با استفاده از نقشه‌های سازه دکل، مدل عددی اجزای محدود آن در نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ ساخته شد. نمای کلی دکل DC0 در شکل (۳-الف) و هندسه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار در شکل (۳-ب) نمایش

شکل که تابع شکل جسم مورد نظر و جهت وزش باد است.

F_w نیروی ناشی از باد برحسب کیلوگرم، V_{WH} سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، A سطح مؤثر بادگیر برحسب مترمربع، C ضریب



شکل ۲- الف) نمای کلی دکل DCO، ب) هندسه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار SAP2000

۳- بارگذاری دینامیکی باد

جریان باد در جو زمین به صورت یک جریان آشفته و توربولانس است. بدین معنی که باد جریانی نامنظم با دوره تناوب-های متغیر از چند ثانیه تا چند دقیقه است. با توجه به ویژگی تصادفی و متغیر بودن باد، برای توصیف آن لازم است از روش‌های آماری استفاده شود. برای توصیف سرعت باد یک منطقه براساس اطلاعات هواشناسی اکتسابی، از مفهوم طیف باد استفاده می‌شود. تاکنون روابط و مدل‌های مختلفی از سوی محققین مختلف به منظور تولید طیف باد یک منطقه ارائه شده است. در این پژوهش از الگوریتم طیف کیمال^۵ که تقریبی ساده از مدل باد واقعی برای تولید طیف باد منطقه محل احداث دکل (شهر اراک) است، استفاده شد. مدل طیف کیمال مطابق آنچه در رابطه (۴) ارائه شده است، بیانگر رابطه بین دامنه طیف و سه پارامتر مرتبط با باد شامل ارتفاع مورد نظر (Z)، سرعت میانگین باد (U) و سرعت اصطکاکی^۶ است. سرعت اصطکاکی برابر جذر نسبت تنش برشی سطح به چگالی سیال است (Dyrbye و Hansen، ۱۹۹۷، Branlard، ۲۰۱۰).

$$S_{uu}(f) = u_*^2 \frac{52.5 \frac{Z}{U}}{(1 + 33n)^{5/3}} \cdot n = \frac{f_z}{U} \quad (4)$$

بیشینه سرعت باد منطقه از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$V_{WH} = V_W \times \left(\frac{H}{10}\right)^{0.095} \quad \text{for } (H \geq 10\text{m}) \quad (2)$$

V_W سرعت مبنای (حداکثر سرعت باد در یک زمان ۵ ثانیه‌ای در ارتفاع متوسط ۱۰ متری از سطح زمین که احتمال وقوع آن در منطقه مورد نظر دو درصد در سال باشد).

همچنین ضریب شکل C برای برج‌ها و سازه‌های مشبکی که دارای اعضا با سطوح تخت می‌باشند به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_{1F} = 4.3(1 - 1.16U) \quad (3)$$

U ضریب سطح بادگیر که بین ۰/۰۵ تا ۰/۴۵ می‌باشد. با جای‌گذاری این مقادیر در معادله (۱) مقدار فشار باد برای هر ارتفاع مورد نظر به دست خواهد آمد. براساس هندسه دکل مورد نظر، به منظور انجام تحلیل سازه، برج از لحاظ ارتفاعی به پنج قسمت تقسیم شده است. فواصل و دامنه ارتفاعی این تقسیم‌بندی در شکل (۲-ب) به تفکیک ارائه شده است.

بارگذاری‌های مختلف دکل انتقال نیرو به نرم‌افزار آیدیا استاتیکا انتقال می‌یابد. با توجه به فرایند تشخیص آسیب، سختی محوری هرکدام از اتصالات مدل‌سازی شده (چه در حالت سالم و چه آسیب‌دیده) استخراج می‌گردد.

محل هرکدام از اتصالات در یک پایه به‌همراه مشخصات نهایی تحلیل سختی هر یک در شکل (۵) و جدول (۱) نشان داده شده است. لازم به توضیح این‌که با توجه به مقارن بودن دکل در این پژوهش، تمامی اتصالات مورد بررسی در یک پایه، در سایر پایه‌ها در محدوده مورد بررسی نیز رفتاری مشابه دارند. در ادامه سختی‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار آیدیا استاتیکا (برای تمام حالات آسیب و سالم) در نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ به فنرهای پیچشی تعریف شده برای اتصالات، اختصاص داده شد. سپس تحلیل‌های تاریخچه زمانی بر روی مدل‌های مختلف دکل با سناریوهای آسیب اتصالات انجام و پاسخ شتاب سازه در نقاطی خاص استخراج گردید. برای طرح‌ریزی سناریوهای خرابی سه نوع سطح خرابی (متناسب با کاهش تعداد پیچ) برنامه‌ریزی شد. کاهش یک پیچ، معرف نقص کم. کاهش دو پیچ، معرف نقص متوسط و کاهش سه پیچ معرف نقص زیاد است.

جدول ۱- سختی‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار IDEA STATICA

حالات مختلف تعداد پیچ‌های مختلف در اتصالات مدل‌سازی شده	Axial stiffness(MN/m)
Connection 1	
حالت سالم	۱۳۴
کاهش ۱ پیچ	۱۲۷/۰۷
کاهش ۲ پیچ	۱۱۹/۹۳
کاهش ۳ پیچ	۱۰۷/۵
Connection 4	
حالت سالم	۱۵۲
کاهش ۱ پیچ	۱۴۳
کاهش ۲ پیچ	۱۳۴
کاهش ۳ پیچ	۱۲۶/۹۶
Connection 2&3	
حالت سالم	۸۰/۴۶
کاهش ۱ پیچ	۷۸/۲۵
کاهش ۲ پیچ	۵۶/۷۵
کاهش ۳ پیچ	۵۵/۲۱
Connection 5	
حالت سالم	۷۱/۴۴
کاهش ۱ پیچ	۵۹/۸۱
کاهش ۲ پیچ	۴۶/۵۶
کاهش ۳ پیچ	۴۳/۴۳

به‌منظور اعمال بارگذاری دینامیکی بر روی سازه، نیاز به محاسبه سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف بر حسب زمان می‌باشد. در این قسمت بر مبنای روش ارائه شده توسط Chen و همکاران در سال (۲۰۱۲)، محاسبات لازم با استفاده از کد پایتون^۷ انجام گرفته است.

با توجه به این‌که بار دینامیکی اصلی در تحلیل و طراحی دکل‌های انتقال نیرو باد می‌باشد، برای انجام این تحلیل ابتدا باید نمودار تاریخچه تغییرات سرعت باد منطقه را با استفاده طیف باد حاصله بر مبنای اطلاعات هواشناسی منطقه محل احداث دکل را تعیین نمود. با در اختیار داشتن نمودار سرعت- زمان باد وارده به دکل در ترازهای ارتفاعی مختلف، می‌توان تاریخچه زمانی نیروی باد وارده به اعضای دکل در هریک از این ترازهای ارتفاعی را مشخص کرد. نمونه‌ای از نمودار تاریخچه زمانی سرعت باد منطقه مذکور در ترازهای ارتفاعی مختلف تعیین شده بر اساس طیف باد کیمال در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی سرعت زمان مربوط به باد در ترازهای ارتفاعی مختلف

۴- مدل‌سازی اتصالات وصله‌ای

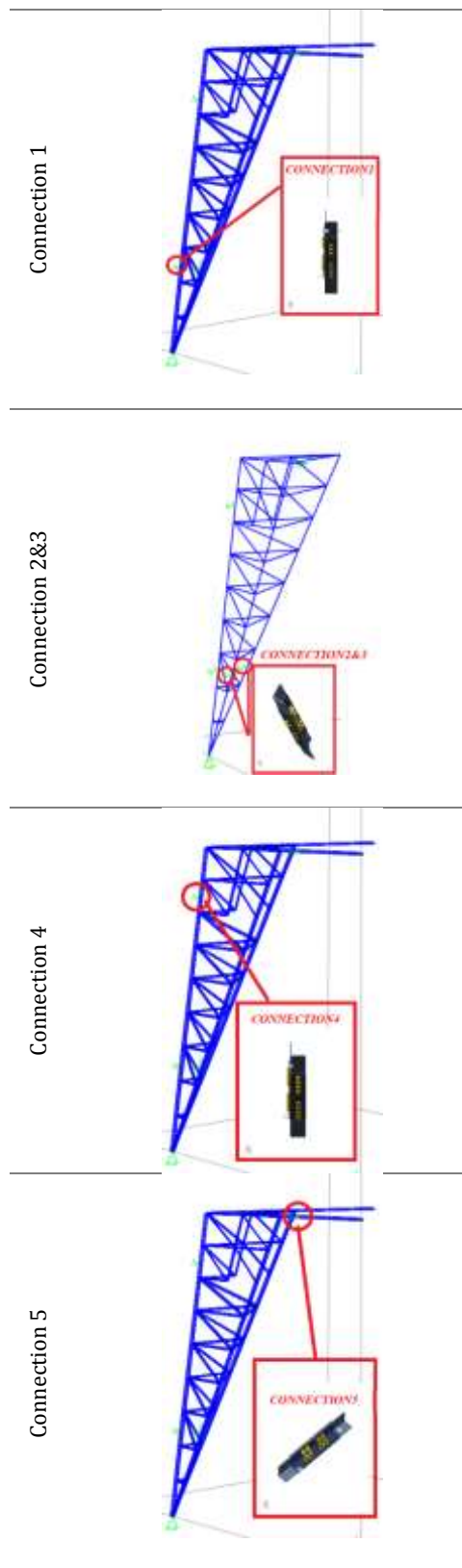
در این قسمت اتصالات دکل مورد بررسی تا تراز ۹ متری مطابق با نقشه‌های موجود در نرم‌افزار آیدیا استاتیکا مدل‌سازی می‌گردد. توجه به اتصالات پایه دکل تا این تراز به دلیل اهمیت آن در دکل‌های انتقال نیرو می‌باشد. آیدیا استاتیکا یک نرم‌افزار تحلیل اتصالات فولادی است که می‌توان به کمک آن اشکال مختلف اتصالات وصله‌ای و پیچی را شبیه‌سازی و تحلیل نمود. برای این کار، اتصالات وصله‌ای با توجه به مشخصات موجود و با استفاده از بلوک‌های نرم‌افزار با عنوان عملیات تولیدی^۸ و اتصال وصله‌ای^۹ مدل‌سازی می‌گردد. سختی هر کدام از اتصالات مدل‌سازی شده به کمک گزینه تحلیل سختی^{۱۰} تعیین می‌شود. هندسه اولیه محل اتصالات از نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ به نرم‌افزار آیدیا استاتیکا منتقل می‌گردد. در اثر این انتقال، تمامی نیروهای داخلی متأثر از

جدول ۲- سناریوهای مختلف خرابی (خرابی اتصالات مختلف) متشکل از تیپ‌های مختلف (کسری پیچ) در نظر گرفته شده در

این پژوهش

سناریوهای خرابی اصلی و هر کدام از تیپ‌های مختص سناریوهای آسیب	تعداد هر کدام از دسته‌های خرابی	توضیحات
A_3 تا A_1	۲۰ سناریو برای هر کدام از دسته‌های خرابی که شامل کاهش تعداد پیچ مختلف در یک اتصال از پنج اتصال موجود در هر پایه	با توجه به کاهش تعداد پیچ مختلف صرفاً در یک اتصال، خرابی برای تمامی اتصالات در نظر گرفته شد.
B_3 تا B_1	۲۰ سناریو برای هر کدام از دسته‌های خرابی که شامل کاهش تعداد پیچ مختلف در دو اتصال مختلف از پنج اتصال موجود در هر پایه	با توجه به کاهش تعداد پیچ مختلف در دو اتصال مختلف، پنج حالت مختلف آسیب برای هر پایه در نظر گرفته شد که شامل کاهش تعداد پیچ‌های مختلف در دو اتصال مختلف بود.
C_3 تا C_1	۲۰ سناریو برای هر کدام از دسته‌های خرابی که شامل کاهش تعداد پیچ مختلف در سه اتصال مختلف از پنج اتصال موجود در هر پایه	با توجه به کاهش تعداد پیچ مختلف در سه اتصال مختلف، پنج حالت مختلف آسیب برای هر پایه در نظر گرفته شد که شامل کاهش تعداد پیچ‌های مختلف در سه اتصال مختلف بود.
D_3 تا D_1	۸ سناریو برای هر کدام از دسته‌های خرابی که شامل کاهش تعداد پیچ مختلف در چهار اتصال مختلف از پنج اتصال موجود در هر پایه	با توجه به کاهش تعداد پیچ مختلف در چهار اتصال مختلف، دو حالت مختلف آسیب برای هر پایه در نظر گرفته شد که شامل کاهش تعداد پیچ‌های مختلف در چهار اتصال مختلف بود.

این طرح شامل چهار سناریوی خرابی ناشی از نقص پیچ‌ها است. این سناریوهای خرابی بر اساس میزان نقص‌های سه‌گانه کسر پیچ به ترتیب در فرم خرابی سطح بسیار پایین که انواع نقص تنها در یک اتصال اتفاق افتاده باشد (A)، خرابی سطح پایین که کاهش پیچ در دو اتصال هم‌زمان رخ داده باشد (B)، خرابی سطح متوسط که کاهش پیچ در سه اتصال هم‌زمان واقع شود (C) و خرابی سطح بالا که کاهش پیچ در چهار اتصال هم‌زمان به وجود آمده باشد (D) دسته‌بندی شدند. توضیحات اضافی مرتبط با سناریوهای آسیب مختلف در نظر گرفته شده در طی این پژوهش در جدول (۲) آورده شده است. لازم به توضیح است که انواع مختلف آسیب‌های در نظر گرفته شده به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:



شکل ۴- نمایش مکان‌های اتصالات مختلف یکی از پایه‌های دکل مشبک

محل قرارگیری این حسگرها در هر کدام از پایه‌ها به دلیل در ادامه با پردازش این داده‌ها ویژگی‌های حساس نسبت به آسیب استخراج می‌گردد. در این مطالعه پارمترهایی چون فرکانس طبیعی و شکل‌های مودی استخراج و طی فرایند دسته‌بندی^{۱۱} به‌عنوان ورودی هر سناریوی خرابی برچسب‌گذاری گردید.

این نتایج برای شکل مودی سناریوهای خرابی سطح A_1 و A_2 و B_2 در شکل‌های (۷) مقایسه شده است. البته لازم به توضیح است که برای هر یک از این سناریوها تعداد ۲۰ حالت آسیب مجزا (به‌همراه حالت سالم) در نظر گرفته شده است (۲۰ سناریوی سطوح A_1 و A_2 شامل آسیب در یک اتصال از ۵ اتصال موجود در هر پایه با کسری متفاوت پیچ می‌باشد (A_1): کسری ۱ پیچ، A_2: کسری ۲ پیچ) که مکان هر کدام از اتصالات در یک پایه در شکل (۴) نمایش داده شده است. اما ۲۰ سناریوی سطح B_2 شامل آسیب در دو اتصال از ۵ اتصال موجود در هر پایه با کسری دو عدد پیچ در هر اتصال می‌باشد). فرکانس‌های طبیعی هر کدام از ۲۰ سناریوی سطح A_1 و A_2 و B_2 در شکل (۸) قابل مشاهده است.

شکل‌های (۷) و (۸) تغییرات پارامترهایی چون شکل‌های مودی و فرکانس‌های طبیعی را در سه تیپ مختلف از سناریوی آسیب (A_1، A_2 و B_2) که هر کدام حاوی ۲۰ سناریوی آسیب مجزا می‌باشد نشان می‌دهد. از مشاهده این اشکال نتایج زیر حاصل می‌گردد:

(۱) تأثیر آسیب‌های مختلف در شکل‌های مودی بیشتر از فرکانس‌های طبیعی است.

(۲) شدت تغییرات حاصله در شکل‌های مودی که متأثر از کاهش تعداد پیچ‌های مختلف در یک تیپ یکسان از خرابی‌ها (مثلاً سناریوهای خرابی گروه A که صرفاً در یک اتصال، تعداد پیچ‌های مختلف کاهش می‌یابند) هستند، شدیدتر و ملموس‌تر از حالتی است که تیپ‌های مختلف خرابی با کاهش تعداد پیچ یکسان می‌باشند (مثلاً سناریوهای تیپ‌های خرابی A_2 و B_2 که تعداد کاهش پیچ یکسان دارند (کاهش دو پیچ) اما تعداد اتصالاتی که کاهش پیچ داده‌اند متفاوت هستند (A: خرابی در یک اتصال از پنج اتصال موجود در یک پایه، B: خرابی در یک اتصال از پنج اتصال موجود در یک پایه)).

(۳) اما تغییرات فرکانس به نسبت شکل‌های مودی در حالات مختلف خرابی کمتر بود، اما همانند شکل‌های مودی همان تأثیر را در کاهش پیچ در تیپ‌های یکسان و غیریکسان از خود نشان دادند.

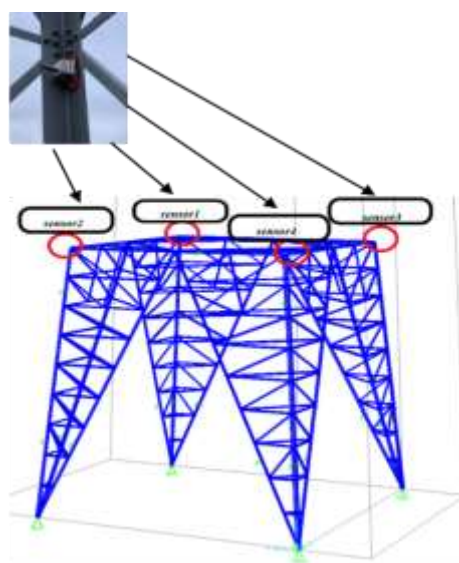
نکته حائز اهمیت در نتایج این قسمت افزایش فرکانس در سناریوهای خاصی می‌بود. به‌طور مثال افزایش فرکانس در

(۱) سناریوهای آسیب اول: آسیب‌هایی که در اتصالات آسیب- دیده مشابه به‌وجود آمده‌اند (یعنی سناریوهای آسیبی که در آن فقط پیچ کاهش پیدا می‌کند، مانند سناریوهای A_1 تا A_3 و مشابه آن)

(۲) سناریوهای آسیب دوم: آسیب‌هایی که در اتصالات آسیب- دیده غیرمشابه به‌وجود آمده‌اند (یعنی سناریوهای آسیبی که در آن علاوه از پیچ، در اتصالات مختلف نیز کاهش پیچ داریم، مانند سناریوهای A_1 و B_1 و مشابه آن که وجه تمایز این سناریوهای آسیب‌ها با سناریوهای آسیب اول کاهش در تعداد مختلفی از اتصالات است).

۵- پردازش داده‌ها جهت عملیات شناسایی آسیب در طی فرایند پایش سلامت سازه‌ای

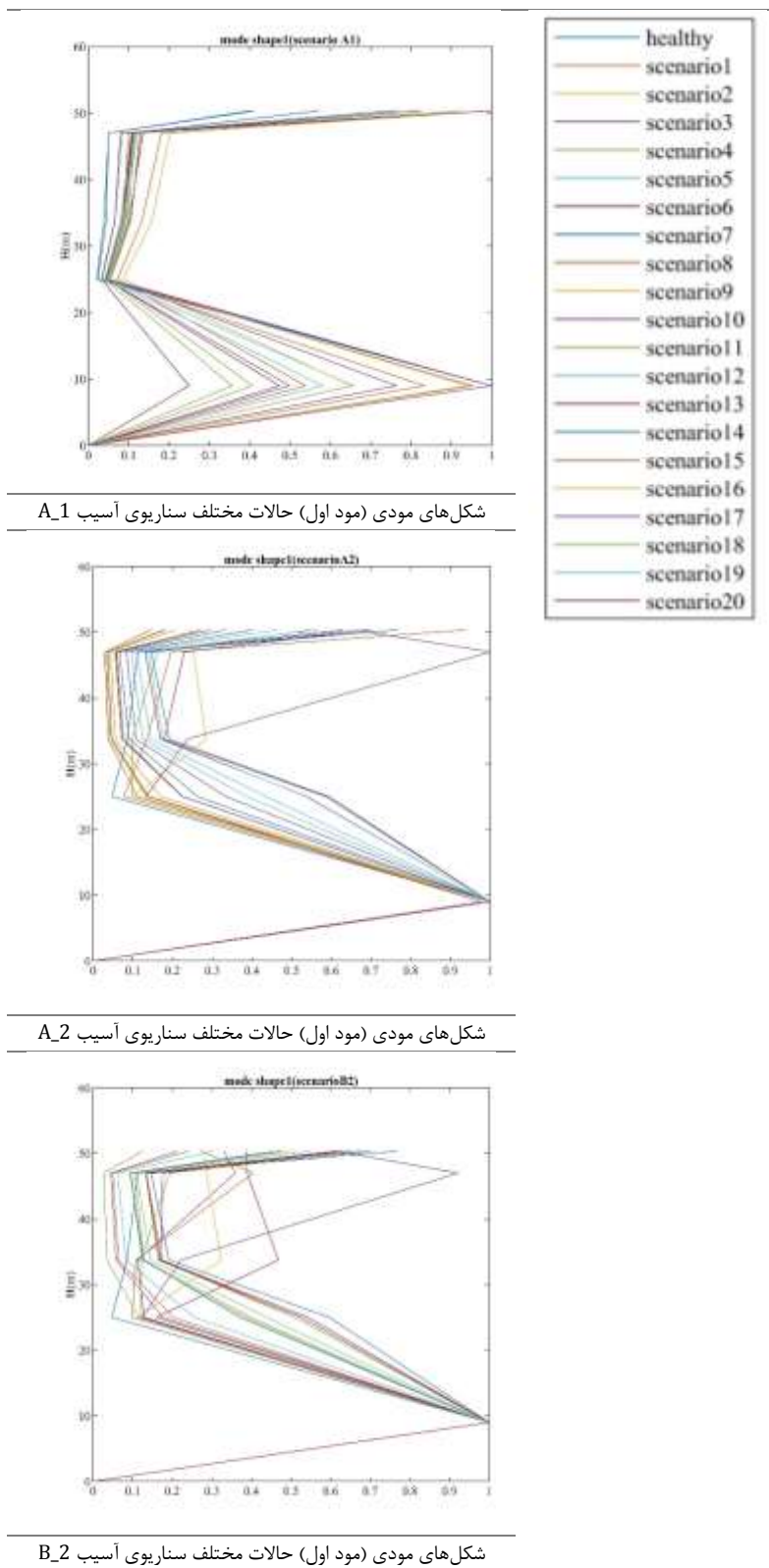
همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره گردید، پس از اجرای تمامی سناریوهای خرابی طرح‌ریزی شده با توجه به نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزارهای آیدیا استاتیکا و نیز نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰، برای پیشبرد اهداف پایش سلامت سازه‌ای اقدام به گردآوری سیگنال-های شتاب برای هر یک از سناریوهای آسیب می‌نماییم. این داده-ها توسط حسگرهای شتاب نصب‌شده در چهار نقطه بالای تراز پایه‌ها مطابق شکل (۶) ثبت می‌گردد. بررسی آسیب‌های موجود در قسمت پایه دکل انتقال نیروی مدل‌سازی شده بود (چرا که آسیب‌های در نظر گرفته شده در این مقاله به آسیب در اتصالات قسمت پایه‌های دکل انتقال نیرو محدود شده است)، تا نشان داده شود با چه تعداد حسگر تا چه سطحی از آسیب‌ها در هر پایه را می‌توان شناسایی نمود.



شکل 5- نمایش حسگرها بر روی پایه‌های مختلف دکل

با کاهش سختی متناسب با محل هر کدام از اتصالات در هر پایه شبیه‌سازی شده است، قاعدتاً بایستی شاهد کاهش فرکانس طبیعی می‌بودیم.

سناریوهای A_1 مورد بررسی قرار می‌گیرد. افزایش فرکانس رخ داده در تمامی اتصالات آسیب‌دیده در پایه‌های مختلف اتفاق افتاده است. با توجه به این امر که تمامی آسیب‌های در نظر گرفته شده



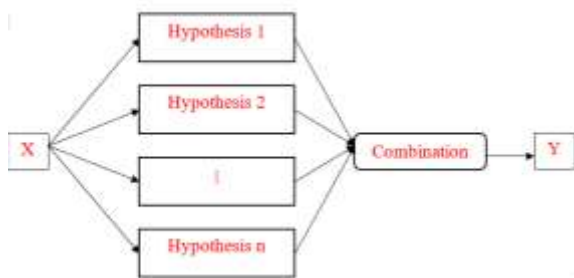
شکل‌های مودی (مود اول) حالات مختلف سناریوی آسیب A_1

شکل‌های مودی (مود اول) حالات مختلف سناریوی آسیب A_2

شکل‌های مودی (مود اول) حالات مختلف سناریوی آسیب B_2

شکل ۶- شکل‌های مودی (مود اول) برای تمامی حالات مختلف سناریوهای A_1، A_2 و B_2

آموزش و مدل آموخته شده را می‌توان فرضیه یا یادگیرنده نامید. الگوریتم‌های یادگیری که مجموعه‌ای از طبقه‌بندی‌کننده‌ها را می‌سازند و سپس نقاط داده جدید را با انتخاب پیش‌بینی‌هایشان طبقه‌بندی می‌کنند، به‌عنوان روش‌های تجمعی شناخته می‌شوند. معماری عمومی روش‌های تجمعی در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل ۷- معماری عمومی روش‌های تجمعی

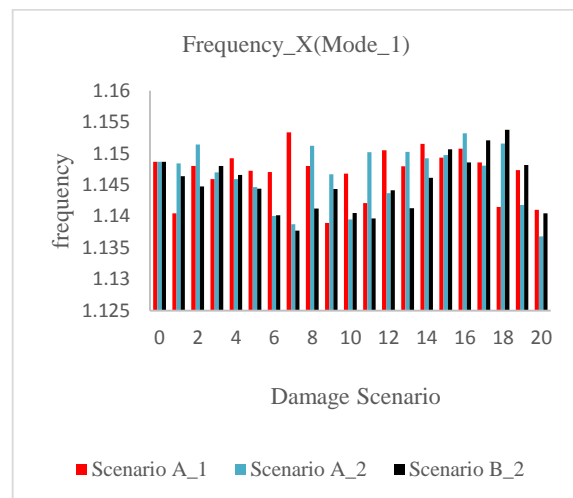
مطالعات مختلف نشان داده است که یادگیری تجمعی اغلب بسیار دقیق‌تر از طبقه‌بندی‌کننده‌های جداگانه هستند که آن‌ها را تشکیل داده است. در این خصوص می‌توان به مطالعات Tibaduiza و همکاران و Vitola و همکاران که برای شناسایی آسیب انجام گرفته، اشاره کرد. روش‌های تجمعی، که به‌عنوان یادگیری مبتنی بر یادگیری سیستم‌های طبقه‌بندی‌کننده متعدد نیز شناخته می‌شوند، چندین فرضیه را برای حل یک مسأله آموزش می‌دهند. الگوریتم‌های یادگیری که تنها یک فرضیه را به دست می‌آورند، اساساً از سه موضوع رنج می‌برند. این مسائل عبارتند از مسئله آماری، محاسباتی و نمایش که می‌توان تا حدی با استفاده از روش‌های تجمعی بر آن‌ها غلبه کرد. الگوریتم‌های یادگیری که با مشکل آماری روبرو هستند دارای واریانس بالایی می‌باشند. این شرایط برای الگوریتم‌های محاسباتی هم وجود دارد. این درحالی است که الگوریتم‌هایی که مشکل نمایشی دارند، از بایاس بالایی برخوردارند. روش‌های تجمعی، بایاس و واریانس این سه مشکل را در الگوریتم‌های یادگیری استاندارد کاهش می‌دهند. تکنیک‌های مختلف روش‌های تجمعی عبارتند از:

(۱) بسته‌بندی^{۱۲}،

(۲) ارتقا و تقویت^{۱۳}

(۳) پشته‌سازی^{۱۴}

روش بسته‌بندی یا گردآور خودکار^{۱۵} یک روش تجمعی قدرتمند، مؤثر و ساده است. این روش از چندین نسخه از یک



شکل ۸- بررسی فرکانس طبیعی (مود اول) برای تمامی حالات مختلف سناریوهای A_1, A_2 و B_2.

که دلیل این امر را می‌توان در رفتارهای هر کدام از اتصالات مختلف تحت آسیب‌های مختلف در اثر بارهای فشاری کم‌انرژی تعریف شده در مرحله مدل‌سازی دکل انتقال نیرو دانست که این مسأله با نتایج مقاله Zhang و همکاران در سال ۲۰۲۰ که در ارتباط با شناسایی آسیب در اتصالات یک قاب خمشی فولادی آزمایشگاهی بود، نیز قابل استنتاج است.

۶- شناسایی سناریوهای خرابی طرح‌ریزی شده با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین (روش بسته‌بندی درختی)

در سازه‌هایی همچون دکل‌های انتقال نیرو به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در شرایط بارگذاری و محیطی سازه، با پیچیدگی ماهیت و گستردگی خرابی‌های احتمالی روبرو می‌باشیم. همچنین در پایش این نوع سازه‌ها، به دلیل ابعاد بزرگ و شمار زیاد اعضا با حجم زیادی از داده‌ها مواجه هستیم. پردازش این حجم داده به منظور انجام عملیات تشخیص خرابی با هر یک از روش‌های شناسایی آسیب به‌سختی و با صرف وقت قابل توجه همراه خواهد بود. در نقطه مقابل روش‌های مبتنی بر مدل استفاده از روش‌های پیشرفته پردازش داده و داده‌کاوی مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند سرعت و دقت پردازش را افزایش دهد. این روش‌های اغلب مبتنی بر تشکیل یک پایگاه داده آموزشی بوده که به کمک آن اقدام به شناسایی الگوهای جدید می‌نماید. یکی از وظایف اصلی الگوریتم‌های یادگیری ماشین، ساختن یک مدل واقع‌بینانه از یک مجموعه داده است. فرآیند تولید مدل از داده‌ها را یادگیری یا

15. Bootstrap Aggregation

12. Bagging

13. Boosting

14. Stacking

عبارتند از:

✓ واریانس مدل کاهش می‌یابد.

✓ چندین درخت را می‌توان به‌طور هم‌زمان آموزش داد.

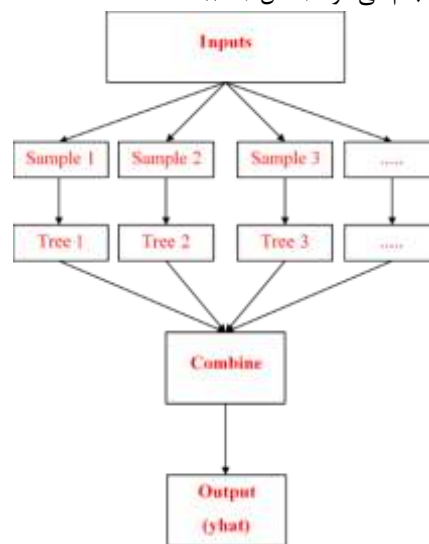
برای این امر، کار طبقه‌بندی سناریوهای خرابی مختلف در دو قسمت انجام گردید. در ابتدا سعی شد تعداد اتصالاتی را که در آن‌ها کاهش تعداد پیچ مختلف رخ داده است (خرابی در ۱ تا ۴ اتصال، بدون توجه به کاهش پیچ‌ها) شناسایی شوند. سپس با استفاده از نتایج بخش قبلی، سعی شد تعداد پیچ‌های کاهش یافته (کاهش ۱ تا ۳ پیچ) در سناریوهای مختلف بررسی شوند. همچنین برای پاسخ به این سوال که با چه تعداد حسگر می‌توان تا سطح مطلوبی خرابی‌ها را تشخیص داد، سعی بر این شد که خرابی‌های مختص به هر کدام از چهار پایه مختلف دکل انتقال در محدوده بررسی به‌صورت جداگانه برای تعداد مختلف نصب حسگر با مکان‌های مختلف بررسی شود.

نمودارهای شکل (۱۱) نشان‌دهنده دقت تشخیص سناریوهای خرابی مختلف مختص به هر پایه نسبت به تعداد حسگرهای مختلفی است که در آن‌ها ثبت داده صورت گرفته است. در اینجا ویژگی‌های سیگنال‌های سناریوهای آسیب مختلف استخراج و به عنوان ورودی به سناریوهای مختلف نسبت داده شده و برچسب‌گذاری شده است (شکل (۱۱)). با توجه به این شکل‌ها نتایج زیر حاصل می‌شود:

✓ در هر چهار پایه تشخیص خرابی در اتصالات مختلف نسبت به تعداد پیچ‌های همان اتصالاتی که در آن‌ها خرابی رخ داده با دقت کمتری رخ داده است. یعنی ویژگی‌های استخراجی سیگنال‌ها برای سناریوهای مختلف خرابی، حساسیت کمتری برای تشخیص سناریوهای مختلف خرابی (تیپ‌های مختلف خرابی نسبت به کاهش تعداد پیچ مختلف در اتصالات مختلف) نسبت به سناریوهای یکسان خرابی (تیپ‌های یکسان خرابی نسبت به کاهش تعداد پیچ مختلف در اتصالات یکسان) دارد. دلیل این امر را می‌توان در تعداد کم حالات مختلف هر سناریو در مقایسه با سناریوهای کلی (مختلف خرابی (چهار حالت کلی) مطابق با جدول (۲) دانست که باعث شده داده‌های کمتری برای طبقه‌بندی ایجاد گردد. در واقع در اینجا تشخیص آسیب سناریوهای کلی خرابی (که نشان‌دهنده آسیب در تعداد اتصالات مختلف است) دارای جامعه آماری کمتری می‌باشد که مسلماً با در نظر گرفتن هر چه بیشتر سناریوهای کلی خرابی (خرابی در اتصالات مختلف) دقت شناسایی نیز افزایش می‌یابد.

مجموعه آموزشی با استفاده از خود راه‌انداز^{۱۶} استفاده می‌کند، یعنی نمونه‌برداری با جایگزینی را می‌توان با هر نوع مدلی برای طبقه‌بندی یا رگرسیون استفاده کرد. طبقه‌بندی تنها زمانی مؤثر است که از مدل‌های غیرخطی ناپایدار استفاده شود. در بسته‌بندی ابتدا نمونه‌های خود راه‌انداز ایجاد می‌شوند. سپس، یک الگوریتم رگرسیون یا طبقه‌بندی برای هر نمونه اعمال می‌شود. در نهایت، در مورد رگرسیون، یک میانگین از تمام خروجی‌های پیش‌بینی شده توسط تک‌تک فراگیران گرفته می‌شود.

یکی از الگوریتم‌های یادگیری فردی مؤثر و شناخته شده روش درختان تصمیم‌گیری^{۱۷} می‌باشد که یکی از اشکالات آن تمایل به بیش‌برازش^{۱۸} می‌باشد. در این روش همه گره‌های برگ همگن هستند (به یک کلاس تعلق دارند). این منجر به درختی می‌شود که به‌طور دقیق با داده‌های آموزشی مطابقت دارد. بنابراین، به خوبی تعمیم نمی‌یابد و در داده‌های آزمایشی عملکرد خوبی نخواهد داشت. درختان تصمیم‌گیری مدلی با واریانس بالا هستند. برای غلبه بر این وضعیت، می‌توان از تکنیک تجمعی-بسته‌بندی که در بالا به آن اشاره شد استفاده کرد. بسته‌بندی درخت‌های تصمیم با ایجاد نمونه‌های خود راه‌انداز از مجموعه داده‌های آموزشی و سپس ساختن درخت‌ها بر روی نمونه‌های خود راه‌انداز و سپس تجمیع خروجی از همه درخت‌ها و پیش‌بینی خروجی انجام می‌شود (شکل (۱۰)).



شکل ۸- معماری Ensemble Bagging

برای طبقه‌بندی سناریوهای مختلف خرابی ارائه شده در این مقاله از روش تجمعی بسته‌بندی درختی^{۱۹} موجود در نرم‌افزار متلب استفاده گردید. مزایای به‌کارگیری روش بسته‌بندی درختی

19. Bagging trees

16. Bootstrap

17. Decision trees

18. Overfit

مختلف استفاده تکی از حسگرها روی پایه‌های دیگر می‌شود. لازم به توضیح است که داده‌های موجود را به داده‌های آموزش و آزمایش تقسیم‌بندی نموده بودیم (با نسبت ۷۰ به ۳۰). نتایج ارائه شده در شکل (۱۱) برای داده‌های آموزش هستند.

۷- نتیجه‌گیری

این پژوهش در سه مرحله انجام پذیرفت:

- (۱) مدل‌سازی دکل مشبک مورد بررسی در نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ و تحلیل آن تحت بارشبه‌سازی شده تاریخچه زمانی باد،
- (۲) مدل‌سازی اتصالات وصله‌ای دکل مورد بررسی،
- (۳) استخراج ویژگی‌هایی همچون شکل‌های مودی و فرکانس طبیعی و ایجاد یک پایگاه داده برای تمامی سناریوهای در نظر گرفته شده انجام گرفت.

در پی پردازش این پایگاه داده‌ها بر اساس روش‌های یادگیری جمعی و بررسی سلسله مراتب شناسایی آسیب به ترتیب در:

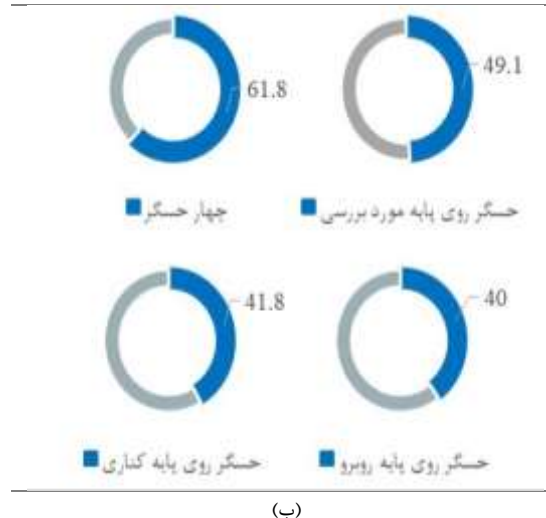
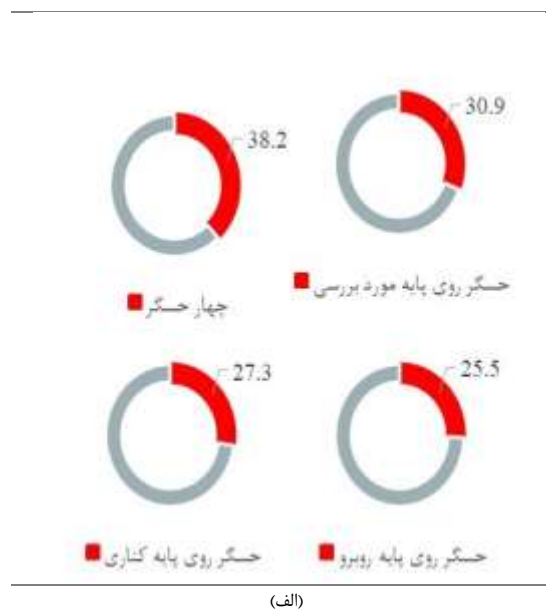
- (۱) اتصالات مختلف آسیب‌دیده در هر پایه
- (۲) شناسایی تعداد پیچ‌هایی که در اتصالات آسیب‌دیده مرحله قبل شناسایی شد انجام گردید.

نتایج به دست آمده از پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

✓ ویژگی‌های استخراجی از پاسخ سازه‌ای دکل متأثر از تحریک محیطی (که در اثر شبه‌سازی طیف باد به وجود آمده بود) که شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی (پنج مود اول) تحت سناریوهای آسیب در نظر گرفته شده، نتایج متفاوت از خود نشان دادند. شکل‌های مودی در مقایسه با فرکانس‌های طبیعی نسبت به آسیب‌های مختلف حساس‌تر بودند. به طوری که تغییرات اتفاق افتاده در انحنای اشکال مودی در مقایسه با فرکانس‌های طبیعی نسبت به آسیب‌های مورد بررسی در این مقاله قابل توجه‌تر بودند و تغییرات اتفاق افتاده در مورد فرکانس‌های طبیعی نسبت به آسیب‌های مورد بررسی ناچیز بود.

✓ فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی نسبت به آسیب اتفاق افتاده در تعداد اتصالات مختلف با کسری یکسان پیچ (مثلاً سناریوهای حالات A_2 و B_2) نسبت به آسیب اتفاق افتاده در تعداد اتصالات یکسان اما کسری متفاوت پیچ (مثلاً سناریوهای حالات A_1 و A_2) حساسیت کمتری از خود نشان دادند.

✓ در مقایسه کلی بین سناریوهای مختلف آسیب در این پژوهش، سناریوهای که دارای تیپ‌های کسری پیچ مشابه بودند نسبت به سناریوهای آسیب که تیپ‌های مختلف با کسری‌های پیچ متفاوت را شامل می‌شدند حساسیت بیشتری نسبت به آسیب از خود نشان دادند. هر چند لازم به توضیح است که با افزایش تعداد پیچ آسیب‌دیده در تمامی سناریوها حساسیت نسبت به آسیب



شکل ۹- الف) شناسایی اتصالاتی که در آن‌ها خرابی رخ داده است، ب) شناسایی تعداد پیچ‌های، اتصالاتی که در آن‌ها خرابی رخ داده است (نتایج شناسایی برای یکی از پایه‌ها)

✓ در هر چهار پایه تشخیص خرابی با استفاده از اطلاعات ۴ حسگر دقت بیشتری نسبت به سایر حالات تکی حسگر دارند. دلیل این امر را می‌توان در ثبت سیگنال بیشتر و متنوع‌تر توسط ۴ حسگر و داده‌هایی که برای آموزش در اختیار قرار می‌دهد، دانست که موجب افزایش دقت شناسایی نسبت به حالات مختلف استفاده تکی از حسگرها می‌باشد.

✓ تشخیص خرابی با حسگری که روی پایه مورد بررسی قرار دارد، نسبت به سایر حالاتی که فقط یک حسگر وجود داشته باشد، نتایج بهتری ارائه می‌کند. اطلاعات هر حسگری که روی پایه مورد بررسی قرار دارد نسبت به سایر حسگرها (در پایه‌های دیگر)، نسبت به آسیب‌های پایه مورد بررسی حساس‌تر بوده و همین امر موجب دقت بیشتر شناسایی آسیب‌های مختلف نسبت به حالات

- Ungkurapinan N, "A study of joint slip in galvanized bolted angle connections (Master's thesis)", 2000. <http://hdl.handle.net/1993/2341>.
- Yin T, Lam HF, Chow HM, Zhu HP, "Dynamic reduction-based structural damage detection of transmission tower utilizing ambient vibration data", *Engineering Structures*, 2009, 31 (9). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.004>.
- Zhang T, Biswal S, Wang Y, "SHMnet: Condition assessment of bolted connection with beyond human-level performance", *Structural Health Monitoring*, 2020, 19 (4), 1188-1201. <https://doi.org/10.1177/1475921719881237>.
- Zhao L, Huang X, Zhang Y, Tian Y, Zhao Y, "A vibration-based structural health monitoring system for transmission line towers", *Electronics*, 8 (5), 515. <https://doi.org/10.3390/electronics8050515>.
- Zhao Y, Xiao Y, Wang H, Wang T, Wu C, Zhang B, "Effect of bolt tightening force on the transmission tower modal parameters and a method for looseness identification", *Energy Reports*, 2021, 7, 842-849.

افزایش پیدا می‌کند. دلیل آن را می‌توان در تعداد کم حالات مختلف هر سناریو در مقایسه با سناریوهای (کلی) مختلف خرابی (چهار حالت کلی) دانست که باعث شده داده‌های کمتری برای طبقه‌بندی ایجاد گردد.

✓ پارامتر دقت برای شناسایی خرابی‌های مختلف در اتصالات آسیب‌دیده و نیز تعداد کسری پیچ‌های مختلف، برای چهار حسگر وضعیت بهتری نسبت به حالات تک حسگر از خود نشان داد. ثبت سیگنال بیشتر و متنوع‌تر توسط ۴ حسگر و داده‌هایی که برای آموزش در اختیار قرار می‌داد موجب افزایش دقت در شناسایی نسبت به حالات مختلف استفاده تکی از حسگرهای می‌باشد. اثر حسگر روی پایه‌ای که بررسی روی آن صورت گرفته وضعیت بهتری نسبت به سایر حالات تک حسگر از خود نشان داد. بر اساس روند طی شده در این مقاله، در ادامه این تحقیق لازم است نتایج مدل‌سازی‌های عددی انجام گرفته در طی این پژوهش با نتایج واقعی ثبت داده‌ها بر روی دکل‌های انتقال نیرو واقعی در راستای شناسایی آسیب در اتصالات دکل‌های صحت-سنجی شود. در راستای شناسایی آسیب در دکل‌های انتقال نیرو، لازم می‌باشد تا سناریوهای آسیب جامعی برای فرایند شناسایی آسیب در نظر گرفته شود.

۸- مراجع

- "مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال، ترکیب بارگذاری نیروها بر سازه‌های پست‌های فشار قوی"، نشریه شماره ۴۵۷، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی، دی ۱۳۸۷.
- Chen JW, Li L, "Investigation on dynamic response of steel tower structure under time-history wind load", In *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2012, 166699-707. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.699>.
- Dyrbye C, Hansen SO, "Wind loads on structures, 1997. ISBN: 978-0-471-95651-8.
- Karami-Mohammadi R, Mirtaheri M, Salkhordeh M, Hariri-Ardebili MA, "Vibration anatomy and damage detection in power transmission towers with limited sensors", *Sensors*, 2020, 20 (6), 1731. <https://doi.org/10.3390/s20061731>.
- Skarbek L, Zak A, Ambroziak D, "Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system", In *EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2014. hal-01020412, version 1 (08-07-2014).
- Szafran J Rykaluk K, "Steel lattice tower under ultimate load-chosen joint analysis", *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2017, 25 (2), 199-210. <http://dx.doi.org/10.1515/ceer-2017-0030>.

EXTENDED ABSTRACTS

Damage Detection in Bolted Connections of Power Transmission Towers Using Machine Learning-Based Methods (Bagging Trees)

Touraj Taghikhany*, Ali Reza Binavayan

Faculty of Civil Engineering, University of Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 1591634311

Received: 20 March 2023; **Review:** 08 June 2023; **Accepted:** 26 June 2023

Keywords:

Power transmission towers, Splice connections, Structural health monitoring, Natural frequencies, Mode shapes.

1. Introduction

There have been many studies regarding the health monitoring and detection of transmission towers, among which we can refer to the article by Yen et al. in 2009, who investigated damage detection in transmission towers with a limited number of sensors those modal parameters were obtained from the measured environmental vibration data. In their research, mode shape and frequency were used to identify the system. Also, stiffness reduction was also suggested to damage detection. Structural health monitoring by using features such as natural frequencies and mode shapes has attracted the attention of a number of researchers. Damage detection in power transmission towers using these features and using soft computing methods was also considered by Skarbek et al. in 2014. They have investigated frequency damage indicators by simple processing and using neural network for power transmission tower. In 2019, Zhao et al obtained the natural frequency of the 110 kV power transmission tower using the sub-random space method and found that the detected natural frequency is dependent on the wind speed. However, the current article tries to damage detection in the connections due to the lack of access to real data and experimental data and based on numerical modeling of a limited number of possible damages that occurred in the legs of the splice connection of power transmission tower.



Fig. 1. Theft of the bolts of the connected members in the leg of the power transmission towers

One of the most frequent causes of damage on lattice towers is theft. (Fig. 1). The important point is that due to the difficulty of accessing the upper levels of the lattice towers and also the heavier members used in the lower part of the towers (The members of the lower part have larger lengths due to geometry and have a higher cross-sectional area due to structural reasons), the rate of theft is much higher in the lower members. Therefore, it is necessary to use a method that can determine any damage in members or damage in connections before it leads to irrecoverable damage. In this regard, this article tries to determine the

* Corresponding Author

E-mail addresses: ttaghikhany@aut.ac.ir (Touraj Taghikhany), abinavayan@aut.ac.ir (Ali Reza Binavayan).

location and severity of damage in the connections of this type of structures by providing a method based on changes in the modal parameters of the structure, such as changing the frequency characteristics and mode shapes.

2. Methodology

During this research, based on the specifications of a real case, a power transmission tower was modeled in SAP2000 software, and then it was subjected to environmental stimulation, and for the final purpose of this research, which is to identify the damage in splice connections, the connections of this structure was modeled in a 9-meter range in IDEASTATICA software. The stiffness analysis was done on the connections, and then used the results to specify set of damages in connection at model in SAP2000 software. The response acceleration time history at level of tower's Leg level were used for structure's feature extraction. Then using features such as natural frequencies and mode shapes (first 5 modes) were used to create datasets to complete the damage identification process. An available Ensemble Method in Classification Learner App Matlab was used to process different dataset and identify damage at connectins. The process of identifying different damages was done in two stages: (1) detection of damage in various connections of each leg within 9 meters of the entire tower (legs) and (2) detection of different damages in connection bolts whose damage was detected in the previous stage.

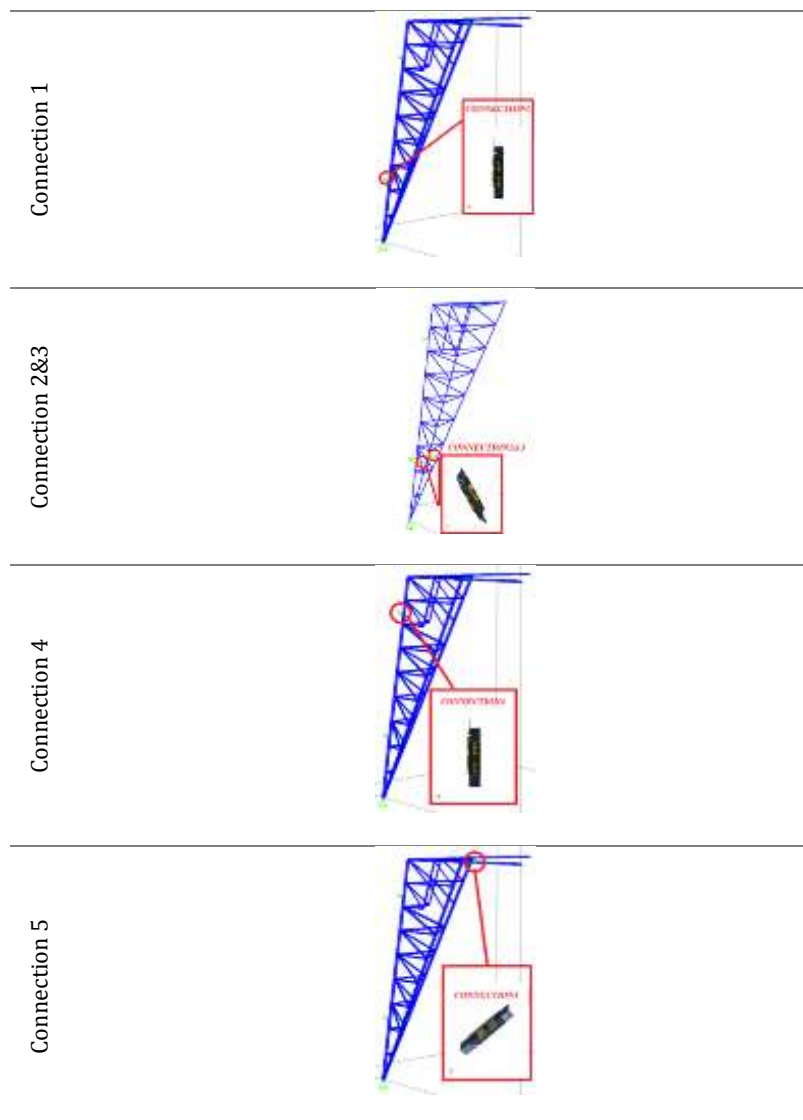


Fig. 2. Showing the different connection locations of a legs of the lattice towers

The whole process that was carried out in this article is shown in Fig. 3.

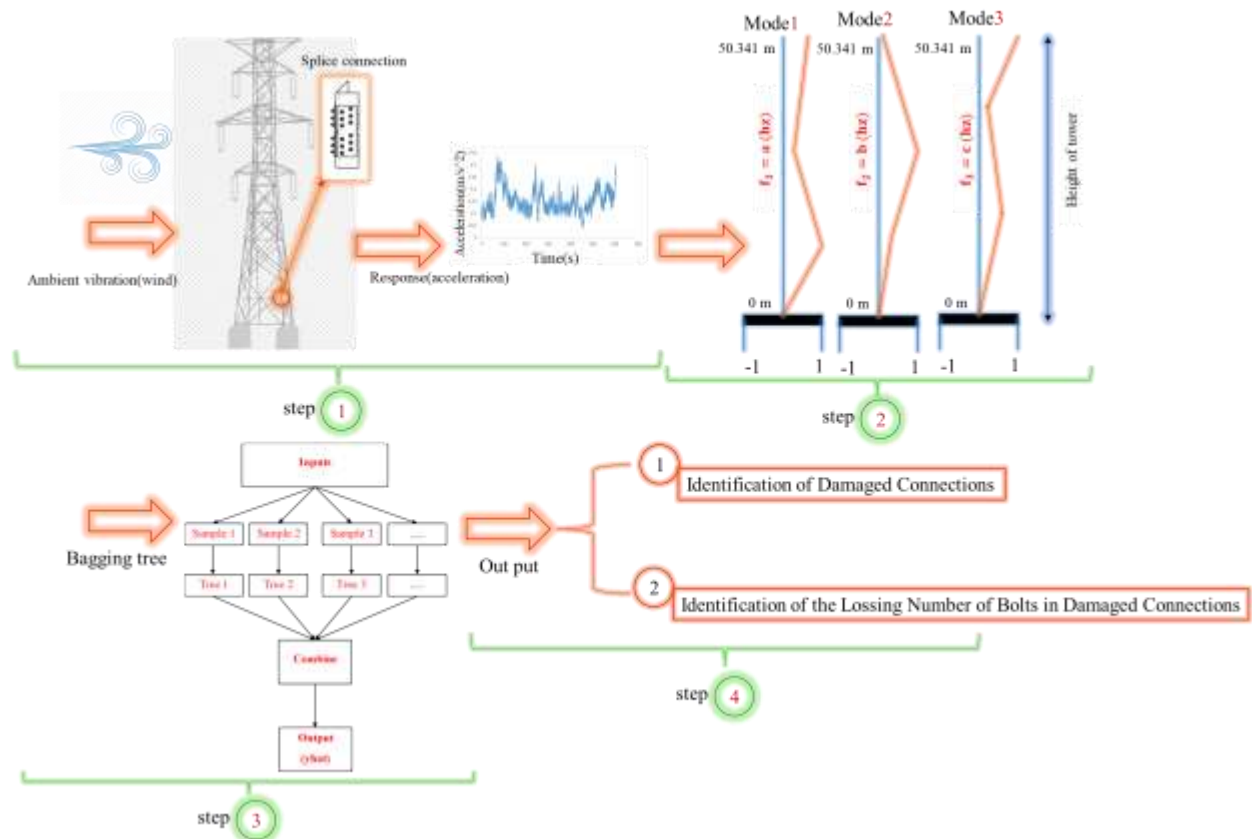


Fig. 3. Flowchart of damage detection on this article

4. Conclusions

As mentioned above, after the implementation of all planned damage scenarios according to the results obtained from IDEASTATICA and SAP2000 software, to advance the goals of structural health monitoring, we tried to collect data for damage identification operations. During this operation, the acceleration data of each of the damage scenarios implemented in 4 points of the examined range in all 4 legs. Then we tried to extract the sensitive features to damage. For this purpose, we used parameters such as natural frequency and mode shapes. The collected dataset was used as an input during the classification process and labeled according to each damage scenario. The following results were obtained:

- ✓ The influence of various damages in the mode shapes is more than the natural frequencies.
- ✓ The severity of the changes in the mode shapes that are affected by the reduction in the number of different bolts in the same type of damages (for example, damage scenarios of group A that only reduce the number of different bolts in one connection), is more intense and tangible than the case where different types of damage are the same with the reduction of the number of bolts (for example, damage scenarios of A_2 and B_2 types that have the same number of bolts reduced (reduce 2 bolts) but the number connections that have reduced bolt are different (A: damage in one connection out of five connections in one leg, B: damage in one connection out of five connections in one leg)).
- ✓ In all four legs, damage detection using information from 4 sensors is more accurate.
- ✓ Damage detection with one sensor located on the leg under investigation provides better results than other situations where there is only one sensor. It is necessary to explain that we divided the available data into training and testing data (with a ratio of 70 to 30).
- ✓ In the general comparison between different damage scenarios in this research, the scenarios that had similar types of reduce the bolt showed more sensitivity to damage than the damage scenarios that included different types of different reduce the bolt. However, it is necessary to explain that with the increase in the number of damaged bolts, the sensitivity to damage increases in all scenarios.

5. References

- Yin T, Lam HF, Chow HM, Zhu HP, "Dynamic reduction-based structural damage detection of transmission tower utilizing ambient vibration data", *Engineering Structures*, 2009, 31 (9). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.004>.
- Skarbek L, Zak A, Ambroziak D, "July. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system", In *EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Hal-01020412, version 1 (08-07-2014).
- Zhao L, Huang X, Zhang Y, Tian Y, Zhao Y, "A vibration-based structural health monitoring system for transmission line towers", *Electronics*, 2019, 8 (5), 515. <https://doi.org/10.3390/electronics8050515>.