

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

تورج تقی‌خانی<sup>1\*</sup> و علی‌رضا بینوایان<sup>2</sup>

<sup>1</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>2</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: 00/00/00، پذیرش: 00/00/00، نشر آنلاین: 00/00/00)

### 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 پیش‌برخ‌ 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 اجتناب ناپذیر 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، 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 ناحیه‌ی 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 تاکید بر موثر 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.

### 1- مقدمه

دکل‌های انتقال نیرو در طول عمر عملیاتی خود تحت تاثیر 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 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

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 این‌رو محققین همواره به دنبال راهکارهای ابتکاری برای بازبینی و شناسایی سریع‌تر، اقتصادی‌تر و دقیق‌تر وضعیت سازه‌ها هستند. پایش سلامت سازه یکی از موثرترین راهکارها برای نگهداری از سازه‌ها در مقابل خسارت‌های پیش‌بینی نشده است.

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 021-64543016

آدرس ایمیل: ttaghikhany@aut.ac.ir، (ت. تقی‌خانی)، abinavayan@aut.ac.ir، (ع. بینوایان)

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.

یکی از پر تکرار ترین عوامل خرابی اتفاق افتاده در مورد دکل‌های مشبک در برق‌های منطقه‌ای مختلف، سرقت می‌باشد (شکل (1)). سرقت‌ها را می‌توان به طور عمده به دو نوع طبقه‌بندی کرد: (1) سرقت نبشی (2) 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



شکل 1- سرقت پیچ‌های اعضای متصل به هم در قسمت پایه‌ی دکل‌های انتقال نیرو

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 جبران ناپذیر بشود را مشخص نماید ضرورت ارائه‌ی 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

متعددی در خصوص پایش سلامت و شناسایی دکل‌های انتقال صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به مقاله یین و همکاران<sup>1</sup> در سال 2009 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 سکاربک و همکاران<sup>2</sup> در سال 2014 اقدام به شناسایی آسیب در دکل‌های انتقال نیرو، با استفاده از این ویژگی‌ها و با بهره‌گیری از روش‌های محاسبات نرم نمودند. آنها شاخص‌های آسیب فرکانس را با استفاده از شبکه عصبی مورد بررسی قرار دادند. ژائو و همکاران<sup>3</sup> در سال 2019 با استفاده از روش زیر فضای تصادفی فرکانس طبیعی دکل انتقال نیرو 110 کیلوولتی را به دست آورده و دریافتند فرکانس شناسایی شده به سرعت باد وابسته است. دکتر کرمی و همکاران در سال 2020 از طریق کمینه‌سازی ورودی‌های غیر-قطری 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 آنکروپینان و همکاران<sup>4</sup> در سال 2000 اشاره نمود. همچنین در تحقیق سزافران و همکاران<sup>5</sup> در سال 2017 با استفاده از نرم‌افزار آیدیا استاتیکا اقدام به مدل‌سازی اتصالات یک دکل مخارباتی مشبک (از نظر هندسه مشابه دکل‌های انتقال نیرو) به منظور یک روش تخمین قابلیت اطمینان کرده بودند. همچنین در مطالعه ژائو و همکاران<sup>6</sup> در سال 2021، مدل‌های المان محدود از اتصالات یک دکل انتقال 500 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 به دست آوردن تاثیر 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

<sup>4</sup> Ungkurapinan et al

<sup>5</sup> Szafran et al

<sup>6</sup> Zhao et al

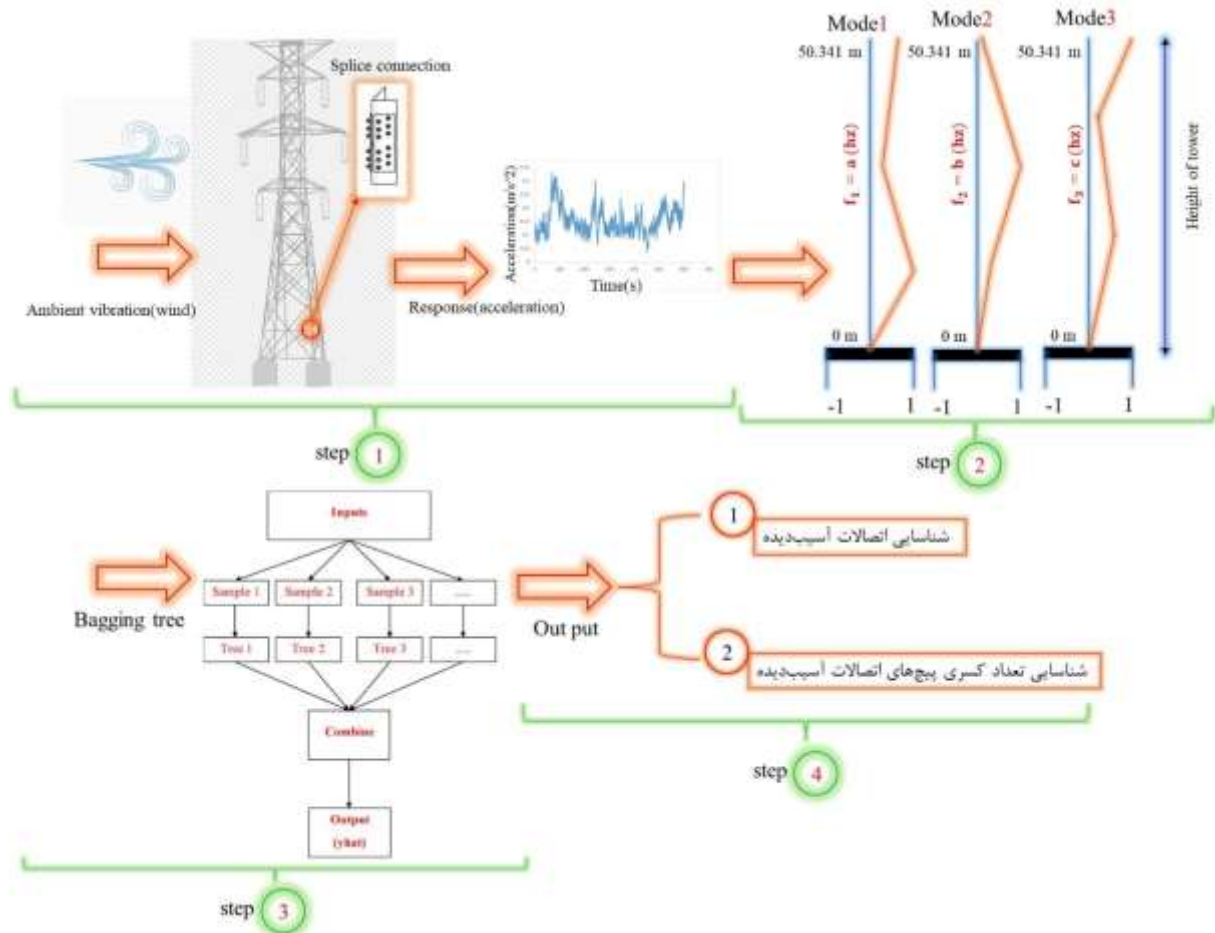
<sup>1</sup> Yin and et al

<sup>2</sup> Skarbek and et al

<sup>3</sup> Zhao and et al

پایگاه داده‌ها جهت آموزش و آزمون در الگوریتم‌های مبتنی برای یادگیری استفاده می‌نماییم. در نهایت با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار متلب<sup>9</sup> از روش‌های یادگیری جمعی<sup>10</sup> موجود برای پردازش پایگاه‌های داده‌ای مختلف جهت فرایند شناسایی آسیب استفاده می‌گردد. در نهایت فرایند شناسایی آسیب‌های مختلف در دو مرحله انجام می‌گیرد: (1) تشخیص آسیب در اتصالات مختلف هر پایه در محدوده‌ی 9 متری از کل دکل (پایه‌ها) و (2) شناسایی آسیب‌های مختلف در پیچ‌های اتصالاتی که در مرحله‌ی قبل، آسیب آنها شناسایی شده بودند. کل فرایند انجام گرفته در این مقاله در شکل (2) به نمایش گذاشته می‌شود.

نوع از سازه‌ها را تعیین نماید. به همین منظور در ابتدا مشخصات یک دکل واقعی، در نرم‌افزار سپ<sup>7</sup> 2000 مدل‌سازی و سپس تحت تحریک محیطی قرار می‌گیرد. سپس اتصالات وصله‌ای این سازه در یک محدوده‌ی 9 متری از کل ارتفاع دکل انتقال نیرو (پایه‌های دکل انتقال نیرو) در نرم‌افزار ایدیا استاتیکا<sup>8</sup> مدل و تحلیل سختی شدند. سپس با استفاده از نتایج این نرم‌افزار (سختی‌های حاصل از تحلیل سختی انجام گرفته در اتصالات مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ایدیا استاتیکا)، مجموعه‌ی مشخصی از آسیب‌ها در نرم‌افزار سپ<sup>7</sup> 2000 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 (5 مود اول) استخراج می‌شود. از این اطلاعات برای ایجاد



شکل 2- فلوجارت کارهای انجام گرفته در مقاله

<sup>9</sup> Matlab

<sup>10</sup> Ensemble Methods

<sup>7</sup> SAP2000

<sup>8</sup> IDEASTATICA

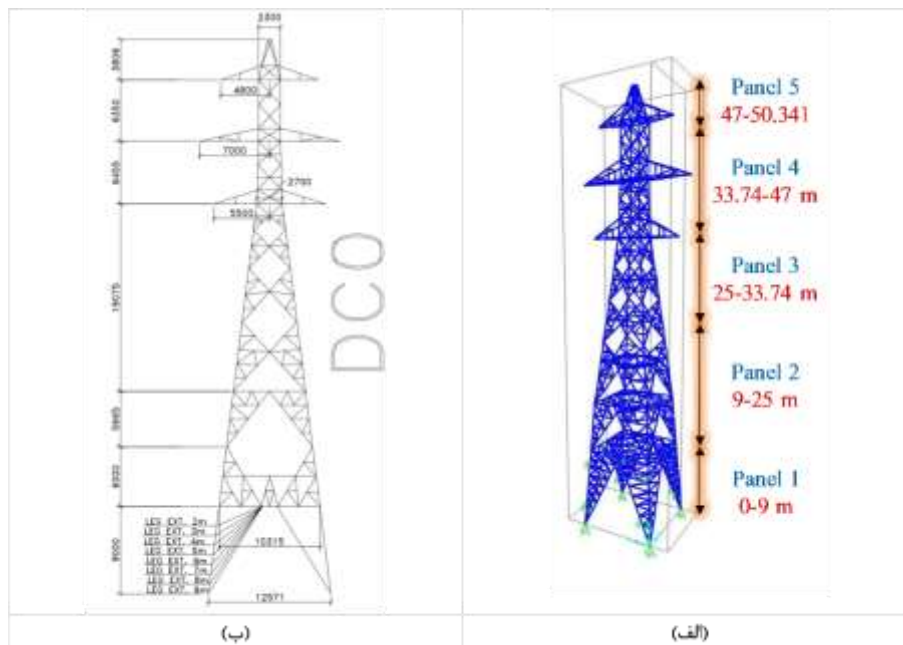


## 2- مدل سازی دکل انتقال نیرو

در این بخش ابتدا نوع دکل بر اساس فراوانی کاربرد در خطوط اصلی 230 کیلوولت، تیپ DC0 انتخاب گردید. سپس با استفاده از نقشه های سازه دکل، مدل عددی اجزای محدود آن در نرم افزار سپ 2000 ساخته شد. نمای کلی دکل DC0 در شکل (3-الف) و هندسه مدل سازی شده در نرم افزار در شکل (3-ب) نمایش داده شده است. برای تحلیل های آتی از بار باد شبیه سازی شده برای تحریک سازه استفاده گردید. فشار باد روی سطح اعضای برج بصورت نیروی عرضی در طراحی برج اعمال می گردد و با استفاده از رابطه (1) محاسبه می گردد (مطابق نشریه ی 457):

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

$F_w$ : نیروی ناشی از باد بر حسب کیلوگرم  
 $V_{WH}$ : سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه  
 $A$ : سطح موثر بادگیر بر حسب متر مربع  
 $C$ : ضریب شکل که تابع شکل جسم مورد نظر و جهت وزش باد است.



شکل 3- (الف) نمای کلی دکل DC0، (ب) هندسه مدل سازی شده در نرم افزار SAP2000

همچنین ضریب شکل C برای برج ها و سازه های مشبکی که دارای اعضا با سطوح تخت می باشند بصورت زیر محاسبه می گردد:

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

U: ضریب سطح بادگیر که بین 0.05 تا 0.45 می باشد.

با جایگذاری این مقادیر در معادله (1) مقدار فشار باد برای هر ارتفاع مورد نظر بدست خواهد آمد. براساس هندسه دکل

بیشینه سرعت باد منطقه از رابطه (2) بدست می آید.

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

$V_W$ : سرعت مبنای (حداکثر سرعت باد در یک زمان 5 ثانیه- ای در ارتفاع متوسط 10 متری از سطح زمین که احتمال وقوع آن در منطقه مورد نظر 2 درصد در سال باشد).

مذکور در ترازهای ارتفاعی مختلف تعیین شده براساس طیف باد کیمال در شکل (4) نشان داده شده است.



شکل 4- منحنی سرعت زمان مربوط به باد در ترازهای ارتفاعی مختلف

#### 4- مدل‌سازی اتصالات وصله‌ای

در این قسمت اتصالات دکل مورد بررسی تا تراز 9 متری مطابق با نقشه‌های موجود در نرم‌افزار ایدیا 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 نرم افزار با عنوان عملیات تولیدی<sup>15</sup> و اتصال وصله‌ای<sup>17</sup> مدل‌سازی می‌گردد. سختی هر کدام از اتصالات مدل‌سازی شده به کمک گزینه‌ی تحلیل سختی<sup>18</sup> تعیین می‌شود. هندسه‌ی اولیه‌ی محل اتصالات از نرم‌افزار سپ 2000 به نرم‌افزار ایدیا استاتیکا منتقل می‌گردد. در اثر این انتقال، تمامی نیروهای داخلی متأثر از بارگذاری‌های مختلف دکل انتقال نیرو به نرم‌افزار ایدیا استاتیکا انتقال می‌یابد. با توجه به فرایند تشخیص آسیب، سختی محوری هر کدام از اتصالات مدل‌سازی شده (چه در حالت سالم و چه آسیب‌دیده) استخراج می‌گردد.

محل هر کدام از اتصالات در یک پایه به همراه مشخصات نهایی تحلیل سختی هر یک در شکل (5) و جدول (1) نشان داده شده است. لازم به توضیح اینکه با توجه به متقارن بودن دکل در این پژوهش، تمامی اتصالات مورد بررسی در یک پایه، در سایر پایه‌ها در محدوده‌ی مورد بررسی نیز رفتاری مشابه دارند. در ادامه سختی‌های بدست آمده از نرم‌افزار ایدیا استاتیکا (برای تمام حالات آسیب و سالم) در نرم افزار سپ 2000 به فنرهای پیچشی تعریف

موردنظر، به منظور انجام تحلیل سازه، برج از لحاظ ارتفاعی به 5 قسمت تقسیم شده است. فواصل و دامنه ارتفاعی این تقسیم‌بندی در شکل (2-ب) به تفکیک ارائه شده است.

#### 3- 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 که تقریبی ساده از مدل واقعی برای تولید طیف باد منطقه محل احداث دکل (شهر اراک) است، استفاده شد. مدل طیف کیمال مطابق آنچه در رابطه (4) 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<sup>11</sup> است. سرعت اصطکاکی برابر جذر نسبت تنش برشی سطح به چگالی سیال است (دیربای و هانسن<sup>12</sup> 1997، برانلارد<sup>13</sup> 2010).

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

به منظور 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 چن و همکاران<sup>14</sup> در سال (2012)، محاسبات لازم با استفاده از کد پایتون<sup>15</sup> انجام گرفته است.

با توجه به اینکه بار دینامیکی اصلی در تحلیل و طراحی دکل-های 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

<sup>15</sup> Python

<sup>16</sup> Operations

<sup>17</sup> Splice connection

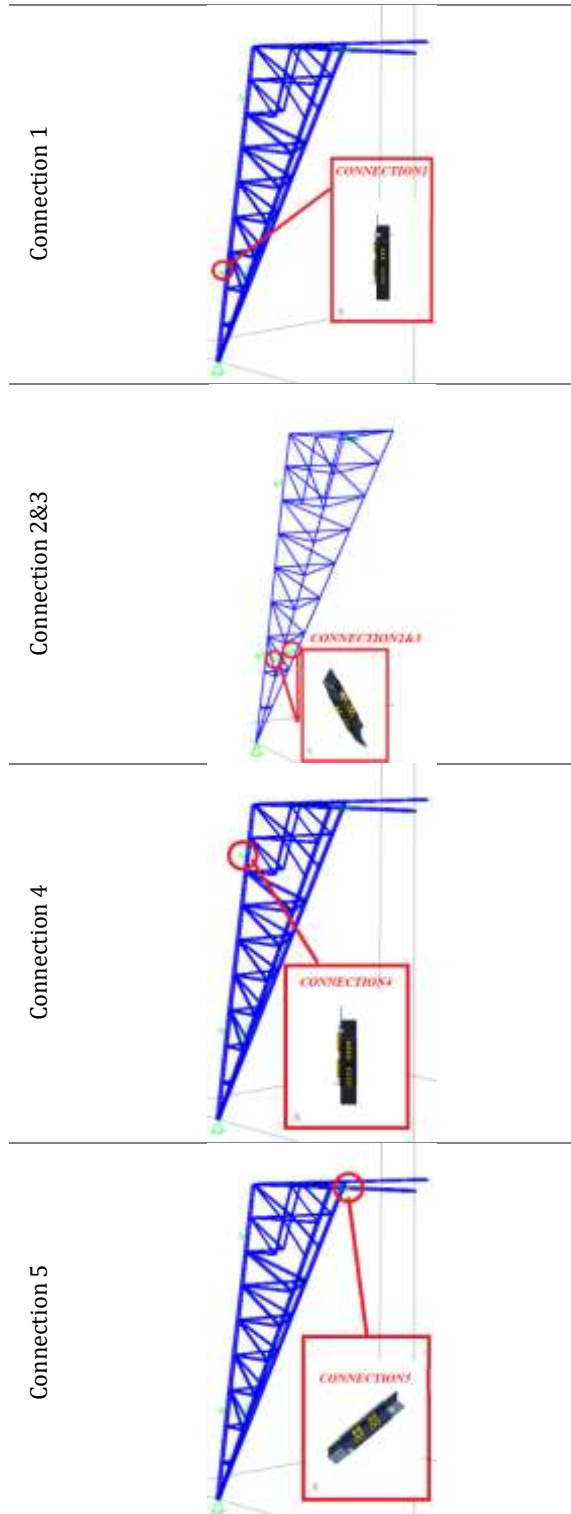
<sup>18</sup> Stiffness Analysis

<sup>11</sup> Friction Velocity

<sup>12</sup> Dyrbye and Hansen

<sup>13</sup> E. Branlard

<sup>14</sup> Chen et al.



شکل 5- نمایش مکان‌های اتصالات مختلف یکی از پایه‌های دکل مشبک

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. این طرح شامل 4 سناریوی خرابی ناشی از نقص پیچ‌ها است. این سناریوهای خرابی بر اساس میزان نقص‌های سه گانه 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 4 اتصال همزمان بوجود آمده باشد (D) دسته‌بندی شدند. توضیحات اضافی مرتبط با سناریوهای آسیب مختلف در نظر گرفته شده در طی این پژوهش در جدول (2) آورده شده است. لازم به توضیح است که انواع مختلف آسیب‌های در نظر گرفته شده به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: 1) سناریوهای آسیب اول: آسیب‌هایی که در اتصالات آسیب‌دیده‌ی مشابه به وجود آمده‌اند (یعنی سناریوهای آسیبی که در آن فقط پیچ کاهش پیدا می‌کند، مانند سناریوهای A\_1 تا A\_3 و مشابه آن) و 2) سناریوهای آسیب دوم: آسیب‌هایی که در اتصالات آسیب‌دیده‌ی غیرمشابه به وجود 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 سناریو-های آسیب اول کاهش در تعداد مختلفی از اتصالات است).

C_3 تا C_1	مختلف از 5 اتصال موجود در هر پایه مختلف بود.	کاهش تعداد پیچ‌های مختلف در دو اتصال مختلف بود.
D_3 تا D_1	20 سناریو برای هر کدام از دسته‌های خرابی که شامل کاهش تعداد پیچ مختلف در سه اتصال مختلف از 5 اتصال موجود در هر پایه مختلف بود.	با توجه به کاهش تعداد پیچ مختلف در سه اتصال مختلف، 5 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	8 سناریو برای هر کدام از دسته‌های خرابی که شامل کاهش تعداد پیچ مختلف در چهار اتصال مختلف از 5 اتصال موجود در هر پایه	با توجه به کاهش تعداد پیچ مختلف در چهار اتصال مختلف، 2 حالت مختلف آسیب برای هر پایه در نظر گرفته شد که شامل کاهش تعداد پیچ‌های مختلف در چهار اتصال مختلف بود.

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

همان طور که پیش‌تر نیز اشاره گردید، پس از اجرای تمامی سناریوهای خرابی طرح‌ریزی شده با توجه به نتایج بدست آمده از نرم‌افزارهای آیدیا استاتیکا و نیز نرم‌افزار سپ 2000، 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 نصب شده در 4 نقطه بالای تراز پایه‌ها مطابق شکل (6) ثبت می‌گردد. محل قرارگیری این حسگرها در هر کدام از پایه‌ها به دلیل بررسی آسیب‌های موجود در قسمت پایه‌ی 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. 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<sup>۱۹</sup> به عنوان ورودی هر سناریوی خرابی برچسب‌گذاری گردید.

### جدول 1- سختی‌های بدست آمده از نرم‌افزار IDEA STATICA برای حالات مختلف

حالات مختلف کاهش تعداد پیچ‌های مختلف در اتصالات مدل‌سازی شده	Axial stiffness(MN/m)
<b>Connection 1</b>	
حالت سالم	134
کاهش 1 پیچ	127.07
کاهش 2 پیچ	119.93
کاهش 3 پیچ	107.5
<b>Connection 4</b>	
حالت سالم	152
کاهش 1 پیچ	143
کاهش 2 پیچ	134
کاهش 3 پیچ	126.96
<b>Connection 2&amp;3</b>	
حالت سالم	80.46
کاهش 1 پیچ	78.25
کاهش 2 پیچ	56.75
کاهش 3 پیچ	55.21
<b>Connection 5</b>	
حالت سالم	71.44
کاهش 1 پیچ	59.81
کاهش 2 پیچ	49.56
کاهش 3 پیچ	43.43

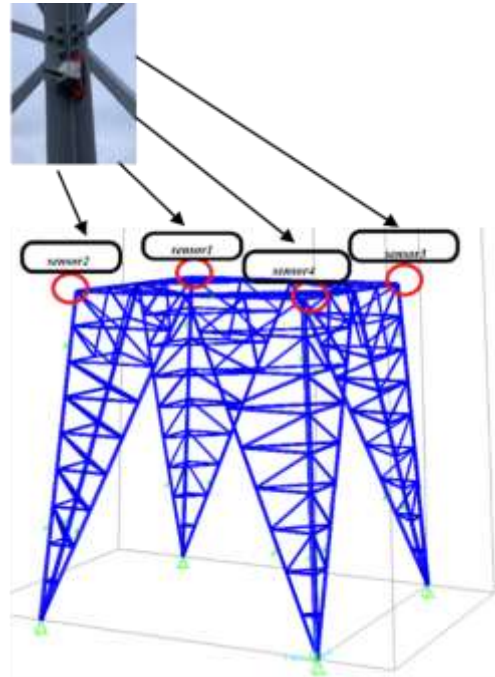
### جدول 2- سناریوهای مختلف خرابی (خرابی اتصالات مختلف) متشکل از تیپ‌های مختلف (کسری پیچ) در نظر گرفته شده در

#### این پژوهش

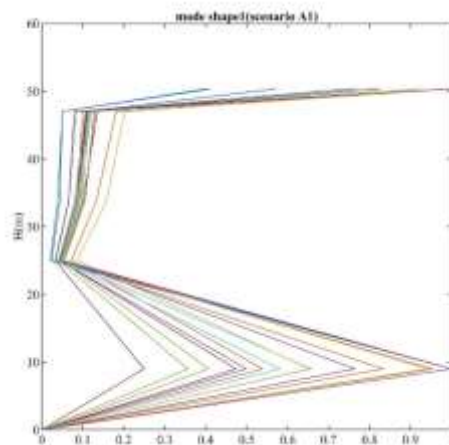
توضیحات	تعداد هر کدام از دسته‌های خرابی	سناریوهای خرابی اصلی و هر کدام از تیپ‌های مختص سناریوهای آسیب
با توجه به کاهش تعداد پیچ مختلف صرفاً در یک اتصال، خرابی برای تمامی اتصالات در نظر گرفته شد.	20 سناریو برای هر کدام از دسته‌های خرابی که شامل کاهش تعداد پیچ مختلف در یک اتصال از 5 اتصال موجود در هر پایه	A_3 تا A_1
با توجه به کاهش تعداد پیچ مختلف در دو اتصال مختلف، 5 حالت مختلف آسیب برای هر پایه در نظر گرفته شد که شامل	20 سناریو برای هر کدام از دسته‌های خرابی که شامل کاهش تعداد پیچ مختلف در دو اتصال	B_3 تا B_1



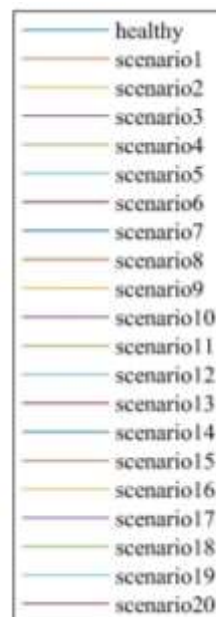
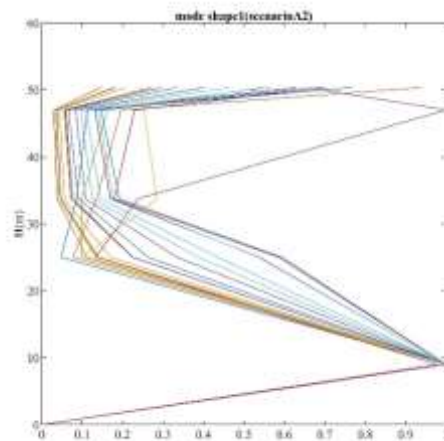
این نتایج برای شکل مودی سناریوهای خرابی سطح A\_1 و A\_2 در شکل‌های (7) مقایسه شده است. البته لازم به توضیح است که برای هر یک از این سناریوها تعداد 20 حالت آسیب مجزا (به همراه حالت سالم) در نظر گرفته شده است (20 سناریوی سطوح A\_1 و A\_2 شامل آسیب در یک اتصال از 5 اتصال موجود در هر پایه با کسری متفاوت پیچ می‌باشد (A\_1): کسری 1 پیچ، A\_2: کسری 2 پیچ) که مکان هر کدام از اتصالات در یک پایه در شکل (4) نمایش داده شده است. اما 20 سناریوی سطح B\_2 شامل آسیب در دو اتصال از 5 اتصال موجود در هر پایه با کسری 2 عدد پیچ در هر اتصال می‌باشد). فرکانس‌های طبیعی هر کدام از 20 سناریوی سطح A\_1 و A\_2 و B\_2 در شکل (8) قابل مشاهده است.



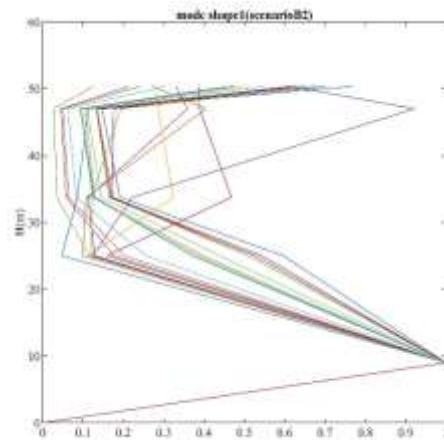
شکل 6- نمایش حسگرها بر روی پایه‌های مختلف دکل



شکل‌های مودی (مود اول) حالات مختلف سناریوی آسیب A\_1

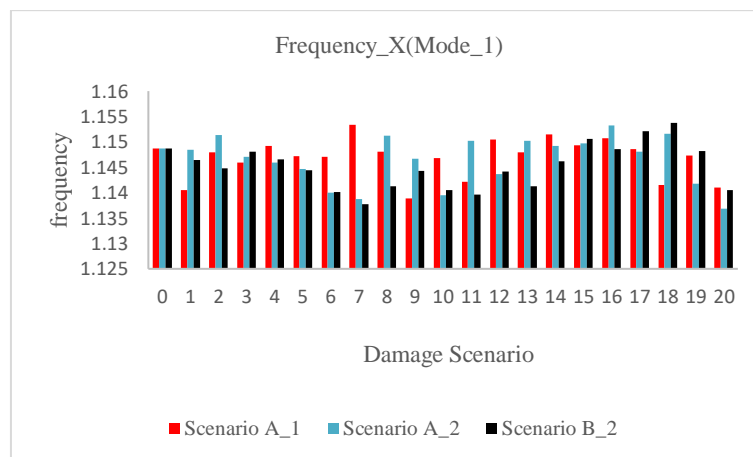


شکل‌های مودی (مود اول) حالات مختلف سناریوی آسیب A\_2



شکل‌های مودی (مود اول) حالات مختلف سناریوی آسیب B\_2

شکل 7- شکل‌های مودی (مود اول) برای تمامی حالات مختلف سناریوهای A\_1، A\_2 و B\_2.



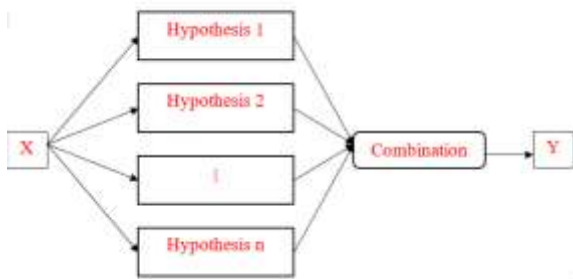
شکل 8- بررسی فرکانس طبیعی (مود اول) برای تمامی حالات مختلف سناریوهای A\_1، A\_2 و B\_2.

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 2 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). (3) اما تغییرات فرکانس به نسبت شکل‌های مودی در حالات مختلف خرابی کمتر بود، اما همانند شکل‌های مودی همان تاثیر را در

شکل‌های (7) و (8) تغییرات پارامترهایی چون شکل‌های مودی و فرکانس‌های طبیعی را در 3 تیپ مختلف از سناریوی آسیب (A\_1، A\_2 و B\_2) که هر کدام حاوی 20 سناریوی آسیب مجزا می‌باشد نشان می‌دهد. از مشاهده این اشکال نتایج زیر حاصل می‌گردد:

1) تاثیر آسیب‌های مختلف در شکل‌های مودی بیشتر از فرکانس‌های طبیعی است. (2) شدت تغییرات حاصله در شکل‌های مودی که متاثر 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

انتخاب پیش‌بینی‌هایشان طبقه‌بندی می‌کنند، به عنوان روش‌های تجمعی شناخته می‌شوند. معماری عمومی روش‌های تجمعی در شکل (9) نمایش داده شده است.



شکل 9- 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 تیبادوئیزا و همکاران<sup>21</sup> و ویتولا و همکاران<sup>22</sup> که برای شناسایی آسیب انجام گرفته، اشاره کرد. روش‌های تجمعی، که به عنوان یادگیری مبتنی بر یادگیری سیستم‌های طبقه‌بندی‌کننده متعدد نیز شناخته می‌شوند، چندین فرضیه را برای حل یک مساله 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 نمایشی 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 با مشکل 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: (1) بسته‌بندی<sup>23</sup>، (2) ارتقا و تقویت<sup>24</sup> و (3) پشته‌سازی<sup>25</sup>.

روش بسته‌بندی یا گردآور خودکار<sup>26</sup> یک روش تجمعی قدرتمند، موثر و ساده است. این روش از چندین نسخه از یک مجموعه آموزشی با استفاده از خود راه انداز<sup>27</sup> استفاده می‌کند، یعنی نمونه‌برداری با جایگزینی را می‌توان با هر نوع مدلی برای طبقه‌بندی یا رگرسیون استفاده کرد. طبقه‌بندی تنها زمانی موثر است که از مدل‌های غیرخطی ناپایدار استفاده شود. در بسته‌بندی ابتدا نمونه‌های خود راه انداز ایجاد می‌شوند. سپس، یک الگوریتم

کاهش پیچ در تیپ‌های یکسان و غیریکسان از خود نشان دادند.

نکته‌ی حائز اهمیت در نتایج این قسمت افزایش فرکانس در سناریوهای خاصی می‌بود. به طور مثال افزایش فرکانس در 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 با کاهش سختی متناسب با محل هر کدام از اتصالات در هر پایه شبیه‌سازی شده است، قاعدتاً بایستی شاهد کاهش فرکانس طبیعی می‌بودیم. که دلیل این امر را می‌توان در رفتارهای هر کدام از اتصالات مختلف تحت آسیب‌های مختلف در اثر بارهای فشاری کم‌انرژی تعریف شده در مرحله‌ی مدل‌سازی دکل انتقال نیرو دانست که این مساله با نتایج مقاله‌ی ژانگ و همکاران<sup>20</sup> در سال 2020 که در ارتباط با شناسایی آسیب در اتصالات یک قاب خمشی فولادی آزمایشگاهی بود، نیز قابل استنتاج است.

## 6- 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 به سختی 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 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

<sup>25</sup> Stacking

<sup>26</sup> Bootstrap Aggregation

<sup>27</sup> Bootstrap

<sup>20</sup> Zhang et,al

<sup>21</sup> Tibaduiza et,al

<sup>22</sup> Vitola et,al

<sup>23</sup> Bagging

<sup>24</sup> Boosting

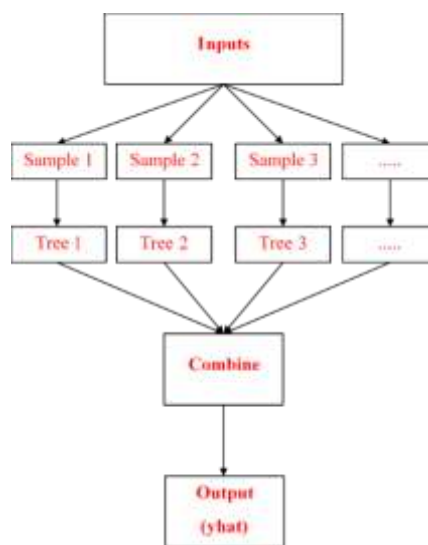
برای این امر، کار طبقه‌بندی سناریوهای خرابی مختلف در 2 قسمت انجام گردید. در ابتدا سعی شد تعداد اتصالاتی را که در آنها کاهش تعداد پیچ مختلف رخ داده است (خرابی در 1 تا 4 اتصال، بدون توجه به کاهش پیچ‌ها) شناسایی شوند. سپس با استفاده از نتایج بخش قبلی، سعی شد تعداد پیچ‌های کاهش یافته (کاهش 1 تا 3 پیچ) در 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 پایه‌ی مختلف دکل انتقال در محدوده‌ی بررسی به صورت جداگانه برای تعداد مختلف نصب حسگر با مکان‌های مختلف بررسی شود.

نمودارهای شکل (11) نشان‌دهنده‌ی دقت تشخیص سناریو-های 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 برچسب-گذاری شده است (شکل (11)). 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 (تیپ-های 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 (4 حالت کلی) مطابق با جدول (2) دانست که باعث شده داده‌های کمتری برای طبقه‌بندی ایجاد گردد. در واقع در اینجا تشخیص آسیب سناریوهای کلی خرابی (که نشان‌دهنده‌ی آسیب در تعداد اتصالات مختلف است) دارای جامعه‌ی آماری کمتری می‌باشد که مسلماً با در نظر گرفتن هر چه بیشتر سناریوهای کلی خرابی (خرابی در اتصالات مختلف) دقت شناسایی نیز افزایش می‌یابد.

رگرسیون یا طبقه بندی برای هر نمونه اعمال می شود. در نهایت، در مورد رگرسیون، یک میانگین از تمام خروجی‌های پیش‌بینی شده توسط تک تک فراگیران گرفته می‌شود.

یکی از الگوریتم‌های یادگیری فردی موثر و شناخته شده روش درختان تصمیم‌گیری<sup>28</sup> می‌باشد که یکی از اشکالات آن تمایل به بیش‌برازش<sup>29</sup> می‌باشد. در این روش همه گره‌های برگ همگن هستند (به یک کلاس تعلق دارند). این منجر به درختی می‌شود که به طور دقیق با داده‌های آموزشی مطابقت دارد. بنابراین، به خوبی تعمیم نمی‌یابد و در داده‌های آزمایشی عملکرد خوبی نخواهد داشت. درختان تصمیم‌گیری مدلهایی 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 راه انداز از مجموعه داده‌های آموزشی و سپس ساختن درخت‌ها بر روی نمونه‌های خود راه انداز و سپس تجمیع خروجی از همه درخت‌ها و پیش‌بینی خروجی انجام می‌شود (شکل (10)).



شکل 10- معماری Ensemble Bagging

برای طبقه‌بندی سناریوهای مختلف خرابی ارائه شده در این مقاله از روش تجمعی بسته بندی درختی<sup>30</sup> موجود در نرم‌افزار متلب استفاده گردید. مزایای به کارگیری روش بسته بندی درختی عبارتند از:

- ✓ واریانس مدل کاهش می‌یابد.
- ✓ چندین درخت را می‌توان به طور همزمان آموزش داد.

<sup>30</sup> Bagging trees

<sup>28</sup> Decision trees

<sup>29</sup> Overfit

پایه‌های دیگر)، نسبت به آسیب‌های پایه‌ی مورد بررسی حساس‌تر بوده و همین امر موجب دقت بیشتر شناسایی آسیب‌های مختلف نسبت به حالات مختلف استفاده‌ی تکی از حسگرها روی پایه‌های دیگر می‌شود. لازم به توضیح است که داده‌های موجود را به داده‌های آموزش و آزمایش تقسیم بندی نموده بودیم (با نسبت 70 به 30). نتایج ارائه شده در شکل (11) برای داده‌های آموزش هستند.

## 7- نتیجه‌گیری

این پژوهش در سه مرحله انجام پذیرفت:

- 1) مدل‌سازی دکل مشبک مورد بررسی در نرم‌افزار سپ 2000 و تحلیل آن تحت بارشبهه سازی شده تاریخچه زمانی باد،
- 2) مدل‌سازی اتصالات وصله‌ای دکل مورد بررسی،
- 3) 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:

- 1) اتصالات مختلف آسیب‌دیده در هر پایه
- 2) شناسایی تعداد پیچ‌هایی که در اتصالات آسیب‌دیده‌ی 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 شبهه‌سازی طیف باد به وجود آمده بود) که شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی (5 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 طوریکه 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 مقایسه‌ی کلی بین سناریوهای مختلف آسیب در این پژوهش، سناریوهای که دارای تیپ‌های کسری پیچ مشابه بودند نسبت به سناریوهای آسیب که تیپ‌های مختلف با



(الف)



(ب)

شکل 11- (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 4 حسگر دقت بیشتری نسبت به سایر حالات تکی حسگر دارند. دلیل این امر را می‌توان در ثبت سیگنال بیشتر و متنوع‌تر توسط 4 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 پایه‌ی 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

## 8- مراجع

- Yin, T., Lam, H.F., Chow, H.M. and Zhu, H.P., 2009. Dynamic reduction-based structural damage detection of transmission tower utilizing ambient vibration data. *Engineering Structures*, 31(9).
- Skarbek, L., Zak, A. and Ambroziak, D., 2014, July. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system. In *EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring*.
- Zhao, L., Huang, X., Zhang, Y., Tian, Y. and Zhao, Y., 2019. A vibration-based structural health monitoring system for transmission line towers. *Electronics*, 8(5), p.515.
- Karami-Mohammadi, R., Mirtaheri, M., Salkhordeh, M. and Hariri-Ardebili, M.A., 2020. Vibration anatomy and damage detection in power transmission towers with limited sensors. *Sensors*, 20(6), p.1731.
- Ungkurapinan, N., 2000. *A study of joint slip in galvanized bolted angle connections* (Master's thesis).
- Szafran, J. and Rykaluk, K., 2017. Steel lattice tower under ultimate load-chosen joint analysis. *Civil and environmental engineering reports*, 25(2), pp.199-210.
- Zhao, Y., Xiao, Y., Wang, H., Wang, T., Wu, C. and Zhang, B., 2021. Effect of bolt tightening force on the transmission tower modal parameters and a method for looseness identification. *Energy Reports*, 7, pp.842-849.
- "مشخصات فنی عمومی و اجرایی پستها، خطوط فوق توزیع و انتقال، ترکیب بارگذاری نیروها بر سازه‌های پست‌های فشار قوی". نشریه شماره 457، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی، دی 1387.
- Dyrbye, C. and Hansen, S.O., 1997. Wind loads on structures.
- Chen, J.W. and Li, L., 2012. Investigation on dynamic response of steel tower structure under time-history wind load. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 166, pp. 699-707). Trans Tech Publications Ltd.
- Zhang, T., Biswal, S. and Wang, Y., 2020. SHMnet: Condition assessment of bolted connection with beyond human-level performance. *Structural Health Monitoring*, 19(4), pp.1188-1201.

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 افزایش پیدا می‌کند. دلیل آن را می‌توان در تعداد کم حالات مختلف هر سناریو در مقایسه با سناریوهای (کلی) مختلف خرابی (4 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 4 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.