

## بررسی جامع اضافه‌ولتاژهای صاعقه در مزارع بادی با پیکربندی‌های متفاوت به همراه تأثیر

### سیستم زمین

مهرداد محمودیان<sup>۱\*</sup>، احمد غلامی<sup>۲</sup>، محسن گیتی‌زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

m\_mahmoudian@elec.iust.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

gholami@iust.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

gitizadeh@sutech.ac.ir

**چکیده:** احداث مزارع بادی در مناطقی با عدد ایزوکرونیک بالا، زیاد بودن ارتفاع برج، شدت گرفتن میدان الکتریکی ناشی از تیز بودن نوک پره‌ها و تماس احتمالی پره‌ها با ابرهای مجاور، اهمیت بررسی اضافه‌ولتاژ فرکانس بالای ناشی از صاعقه به مزارع بادی را روشن‌تر می‌سازد. به‌علاوه سیستم زمین توربین بادی باید طوری طراحی شود تا علاوه بر دست‌یابی به مشخصات امپدانس با مقادیر حالت ماندگار استاندارد، جریان صاعقه را به‌طور مؤثر به درون زمین تخلیه کند. توجه به این نکات و همچنین بهره‌برداری از آن دسته از مزارع بادی که با پیکربندی‌های متنوع و متناسب با محل نصب احداث می‌گردند، سبب می‌شود که مطالعه و ارزیابی اضافه‌ولتاژ صاعقه در مزارع بادی به‌صورت جامع اهمیت زیادی پیدا کند. در این مقاله، در شبیه‌سازی سیستم زمین پدیده یونیزاسیون خاک و رفتار فرکانس بالای الکترودهای آن مد نظر قرار گرفته است تا بتوان از آن به‌عنوان یک پتانسیل مرجع برای سنجش ولتاژ تمام نقاط استفاده نمود. سپس از روش برازش برداری برای مدل‌سازی سیستم زمین بهره گرفته شده است. لذا از آنجایی که استفاده از روش محاسباتی دقیق‌تر نتایجی با قابلیت اعتماد بیشتر را در اختیار بهره‌برداران قرار می‌دهد، در این مقاله به بررسی اضافه‌ولتاژ در یک مزرعه بادی با دوازده توربین دو مگاواتی با پیکربندی‌های متفاوت، با استفاده از نرم‌افزار تخصصی حالت گذرا پرداخته شده است.

**واژه‌های کلیدی:** توربین بادی، حالات گذرای الکترومغناطیسی، سیستم زمین، روش برازش برداری، مزارع بادی.

## ۱. مقدمه

و نیروگاه‌های سستی تفاوت‌هایی وجود دارد. از جمله این تفاوت‌ها می‌توان به استفاده گسترده از انواع کابل‌ها، استفاده بسیار زیاد از مدارشکن‌ها، قطع و وصل مداوم کلیدهای قدرت، عدم استفاده از ژنراتورهای سستی و همچنین عدم استفاده از ترانسفورماتور با عایق خشک اشاره کرد. این تفاوت‌ها بیشتر در رفتار گذرای که معمولاً در نیروگاه‌های معمولی دیده نشده‌اند، در نیروگاه‌های بادی خود را نشان می‌دهند [۸].

در گذشته، مطالعات بسیاری در زمینه اضافه‌ولتاژ صاعقه در مزارع بادی انجام شده است. برای مثال در مرجع [۹] مالکوم و همکارانش به بررسی اضافه‌ولتاژ صاعقه در مزارع بادی در جامائیکا می‌پردازند. اما از تأثیر برقگیر و سیستم کنترلی چشم پوشی شده است و دقت مدل‌سازی سیستم زمین پایین است. در مرجع [۱۰] از یک امپدانس ثابت برای مدل‌سازی سیستم زمین صورت گرفته است. در مرجع [۱۱] تنوع پیکربندی مزارع بادی لحاظ نشده است. در [۱۲] مدلی نسبتاً مناسب برای اتصال کابل‌های سیستم‌های زمین به هم ارائه می‌گردد، اما از مدل ژنراتور توربین بادی صرف‌نظر شده است. در مراجع [۱۳ و ۱۴] نیز علی‌رغم استفاده از مدل‌های شایسته برای مدل‌سازی رفتار گذرای تجهیزات مزارع بادی، برای پره‌های توربین، فقط یک پره در نظر گرفته شده و سیستم‌های زمین در یک مزرعه بادی با دو توربین، به‌منظور کاهش امپدانس معادل به یکدیگر متصل نشده‌اند.

در مقاله پیش رو، به‌منظور واقعی‌تر شدن نتایج، از روش برازش‌برداری برای مدل‌سازی سیستم زمین و اثرات فرکانس بالای آن استفاده شده است. همچنین مدل پره‌ها، برج و کابل‌های اتصال به زمین، همگی وابسته به فرکانس در نظر گرفته شده‌اند. سیستم کنترلی نیز توسط بارهای غیر خطی لحاظ شده است. به‌علاوه اتصال معینی از سیستم‌های زمین نیز به‌منظور کاهش امپدانس کل نیز منظور شده است. سپس یک مزرعه بادی نوعی با دوازده توربین با پیکربندی‌های متفاوت ساخته می‌شود و هماهنگی عایقی آن در پیکربندی‌های متفاوت به کمک نرم‌افزار EMTP<sup>۲</sup> مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

## ۲. مزرعه بادی مورد مطالعه

مزرعه بادی مورد مطالعه در این مقاله، شامل دوازده توربین بادی دو مگاواتی است که با پیکربندی‌های مختلف به یکدیگر متصل شده‌اند. در هر نوع پیکربندی، سیستم‌های زمین به‌طور متناسب و متناظر مطابق شکل (۲) به یکدیگر متصل شده‌اند [۱۲]. اتصال هر توربین با توربین مجاور، توسط کابل‌هایی با طول ۲۰۰ متر صورت گرفته است. همچنین

در دنیای امروز با توجه به سرعت پیشرفت دانش، توربین‌های بادی به یکی از مهم‌ترین عناصر تولیدکننده توان الکتریکی در شبکه‌های قدرت تبدیل شده‌اند. جانمایی یک ژنراتور پر قدرت در بالای برج توربین بادی، احتمال آسیب ناشی از ضربه‌های صاعقه را در آن‌ها افزایش می‌دهد [۱]. همچنین چون اکثر تجهیزات حفاظتی در پای برج قرار می‌گیرند، با توجه به پیکربندی اصلی توربین بادی و پره‌ها، حفاظت از ژنراتور در مقابل صاعقه در آن ارتفاع بالا، امری دشوار تلقی می‌شود. بیشتر روش‌های حفاظت از صاعقه در استانداردهای IEC<sup>۱</sup> تشریح شده‌اند [۲]. اما کاربرد این استانداردها تنها در ساختارهایی مانند برج‌های مخابراتی نسبتاً سراسر است [۳]. مطالعات و بررسی‌های سیستم‌های قدرت مانند پخش بار، کلیدزنی، کنترل توان راکتیو و خطاهای اتصال کوتاه به‌منظور تأمین بخشی از توان مورد نیاز شبکه توسط مزارع بادی امری مهم تلقی می‌شود. این بررسی‌ها اطلاعاتی درباره ریسک‌های اعمالی ناشی از اضافه‌ولتاژهای موقت و گذرا بر اجزای مزارع بادی در اختیار بهره‌برداران قرار می‌دهند [۴]. برای طراحی یک مزرعه بادی قابل اعتماد و مناسب، میزان اضافه‌ولتاژها و نرخ وقوع آن‌ها باید با دقت قابل قبولی بررسی شوند تا حالات مختلفی که اضافه‌ولتاژهای مخربی را به شبکه اعمال می‌کنند، تحلیل و ارزیابی گردند.

اجزای مختلف نیروگاه بادی مانند ترانسفورماتورها و ژنراتورهای توربین بادی در محدوده‌های فرکانسی مختلف، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند [۵]. برای مثال، رفتار غالب یک سیم‌پیچ این‌گونه است که در فرکانس‌های پایین، خاصیت سلفی و در فرکانس‌های بالا، خاصیت خازنی از خود نشان می‌دهد. مقاومت کابل‌ها نیز بر اثر افزایش فرکانس، طبق اثر پوستی افزایش می‌یابد و اثر میراکنندگی به وجود می‌آورد. همچنین در مورد مدارشکن‌ها، در نظر گرفتن اثر سیستم بر عملکرد آن‌ها (نوع اغتشاشی که منجر به پاسخ کلیدها می‌شوند) و همچنین اثر آن‌ها بر سیستم مانند مقاومت خود کلید یا خازن موازی شده با کلید، امری ضروری به نظر می‌رسد. در این میان باید این نکته را نیز مد نظر قرارداد که بعضی از ابزارهای شبیه‌سازی حالات گذرای الکترومغناطیسی، دقت کافی را در مدل کردن اجزای اصلی شبکه قدرت نیروگاه بادی ندارند، لذا در برخی موارد استفاده از مدل تعریف‌شده به‌وسیله کاربر می‌تواند در بالا بردن دقت شبکه برای لحاظ کردن مدار معادل اجزا، نقشی تأثیرگذار ایفا کند [۶ و ۷]. با توجه به این موارد، در طراحی، برنامه‌ریزی و ساخت تجهیزات نیروگاه بادی

مشخصات ۱۰/۳۵۰ میکروثانیه، به مزرعه بادی اعمال می شود [۱۴]. در هر مرحله، صاعقه به یک توربین برخورد می کند و اضافه ولتاژهای خودی و متقابل ثبت می شوند. این اضافه ولتاژها در سه نقطه بررسی می شوند: اضافه ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی، به ثانویه ترانسفورماتور کمکی و به ثانویه ترانسفورماتور اصلی. در پایان تأثیر پیکربندی های متفاوت در به وجود آمدن این اضافه ولتاژها بررسی، مقایسه و ارزیابی می شوند. البته دانستن این نکته نیز خالی از لطف نیست که ترانسفورماتور کمکی به منظور تأمین برق مصرف داخلی توربین بادی و ادوات الکترونیک قدرت تعبیه شده است. مدل سیستم زمین نیز طبق روش برازش برداری لحاظ شده است که نویسندگان، آن را به تفصیل در مرجع [۱۵] بیان کرده اند.

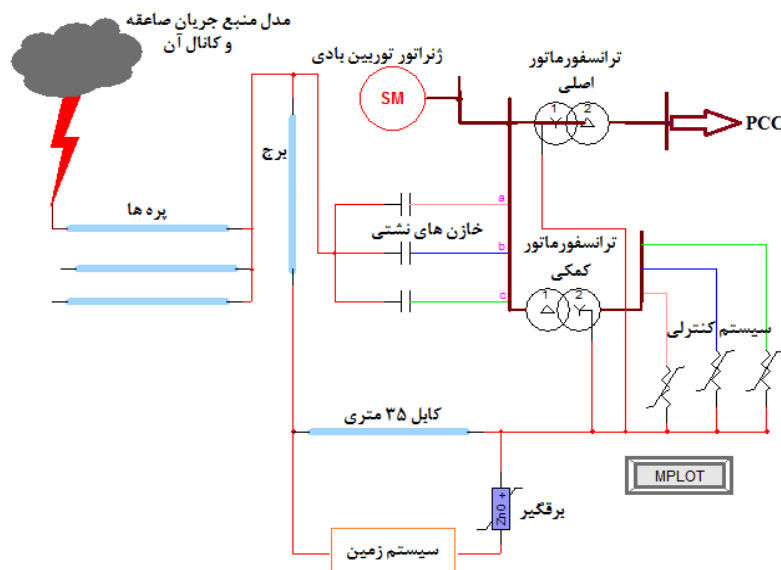
نمایی از یک توربین و اتصالات آن به شبکه قدرت در مزرعه بادی مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.

در این مقاله اضافه ولتاژهای اعمال شده به تک تک توربین ها در اثر برخورد صاعقه به هر توربین بادی ارزیابی و تحلیل می شود. لازم به ذکر است که در سه نقطه اصلی از مزرعه بادی، اضافه ولتاژها اندازه گیری شده اند:

- اضافه ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی؛
- اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور اصلی در نقطه اتصال به شبکه یا اتصال به توربین مجاور؛
- اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور کمکی.

### ۳. شرح مسئله

با توجه به اینکه حدود درصد قابل توجهی از آسیب های وارد به توربین بادی ناشی از برخورد مستقیم صاعقه به پره ها است، در این مقاله نیز تنها آسیب های مستقیم مد نظر قرار گرفته اند [۱۳]. به این منظور، ضربه جریان صاعقه با میزان جریان ماکزیمم ۱۰۰ کیلوآمپر و با



شکل (۱): نمایی از یک توربین بادی مورد مطالعه

نوع پیکربندی مختلف بررسی می شود. در هر پیکربندی، مزرعه بادی شامل ۱۲ توربین است که با اتصالاتی متفاوت توسط کابل مخصوص و وابسته به فرکانس به طول ۲۰۰ متر به یکدیگر متصل شده است. شایان ذکر است که تعداد توربین ها را می توان به سادگی ارتقا داد. اما برای بررسی اضافه ولتاژها در مزارع بادی، همین تعداد توربین کفایت می کند و اثر اضافه ولتاژ روی توربین های دورتر نادیده گرفته می شود. انتها نیز مزرعه بادی مورد مطالعه با یک ترانسفورماتور افزاینده به شبکه قدرت فشارقوی (مدار معادل تونن<sup>۱</sup> شبکه قدرت) متصل می شود.

### ۴. نحوه اتصال توربین ها

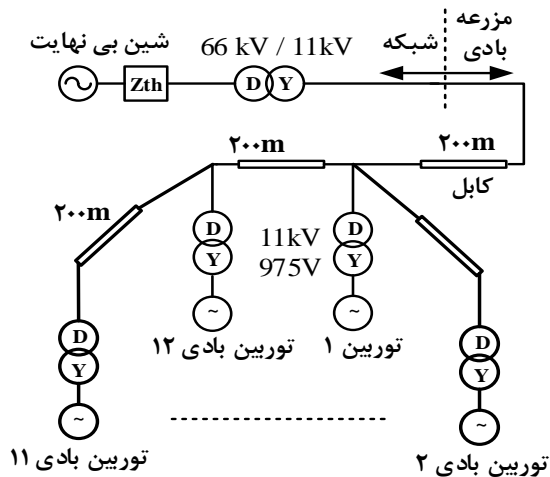
در مزارع بادی مورد مطالعه، نحوه اتصال توربین ها به یکدیگر مطابق شکل (۲) می باشد. شایان ذکر است که در این مقاله از یک مقاومت ۴۰۰ اهمی موازی با منبع جریان صاعقه، به عنوان مدل کانال صاعقه استفاده شده است.

### ۵. پیکربندی مزرعه بادی

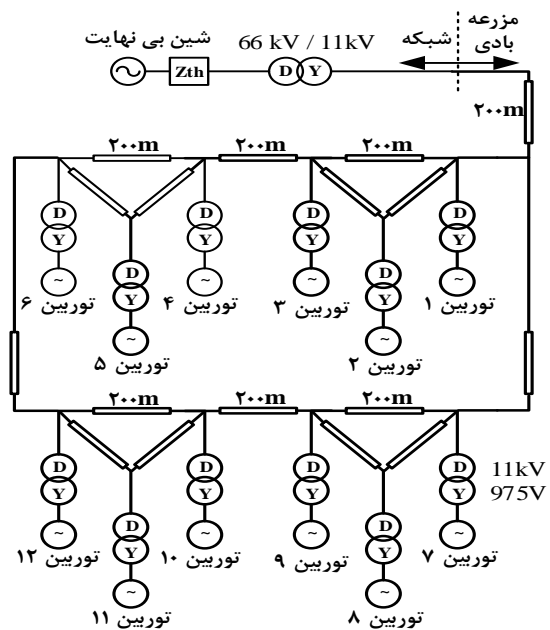
در این مقاله، اضافه ولتاژهای اعمالی توسط موج صاعقه در قالب چهار

۳.۵. پیکربندی مثلثی

در پیکربندی مثلثی، توربین‌های بادی بر روی رئوس مثلث‌های متساوی الاضلاع جانمایی می‌شوند. تمامی مثلث‌های متساوی الاضلاع به منظور یکنواخت شدن و زیبایی مزرعه بادی، هم‌نهشت در نظر گرفته می‌شوند. نمایی از یک مزرعه بادی با شش توربین که مطابق با پیکربندی مثلثی به هم متصل شده‌اند، در شکل (۵) آورده شده است.



شکل (۴): پیکربندی ستاره‌ای

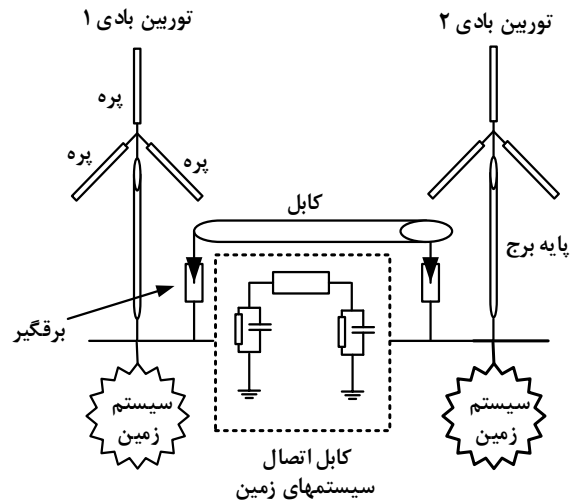


شکل (۵): پیکربندی مثلثی

۴.۵. پیکربندی شاخه‌ای

در واقع پیکربندی شاخه‌ای را می‌توان مخلوطی از دو نوع پیکربندی‌های ستاره‌ای و مثلثی بی‌نظم در نظر گرفت. شکل (۶) اتصالات شش توربین بادی در یک مزرعه بادی را نشان می‌دهد.

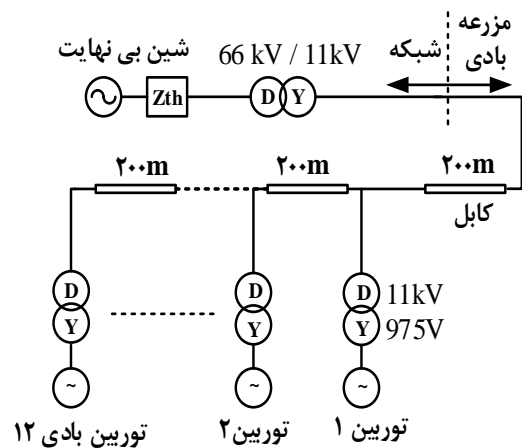
انواع پیکربندی‌ها عبارت‌اند از: پیکربندی خطی، ستاره‌ای، مثلثی و شاخه‌ای.



شکل (۲): روش اتصال توربین‌های بادی به یکدیگر

۱.۵. پیکربندی خطی

در پیکربندی خطی که معمول‌ترین نوع مورد استفاده در مزارع بادی است، توربین‌ها به صورت خطی و پشت سر هم با فاصله ۲۰۰ متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. نمایی از یک مزرعه بادی با ۱۲ توربین که مطابق با پیکربندی خطی به هم متصل شده‌اند، در شکل (۳) نشان داده شده است.

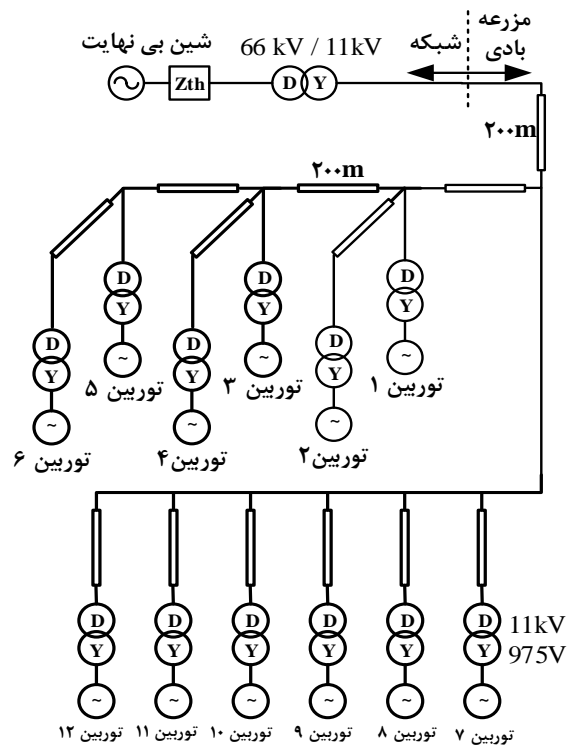


شکل (۳): پیکربندی خطی

۲.۵. پیکربندی ستاره‌ای

توربین‌های بادی در پیکربندی ستاره‌ای روی رئوس یک ستاره ۱۲ گوشه قرار گرفته‌اند. فاصله بین توربین‌ها در این حالت ۲۰۰ متر است. طرحی گرافیکی از شش توربین از یک مزرعه بادی نوعی در پیکربندی ستاره‌ای در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است.

- باشد؛  
ولتاژ نامی ثانویه ترانسفورماتور کمکی ( $m_4$ ) باید ۵۶۶ ولت باشد؛
- ولتاژ نامی ثانویه ترانسفورماتور اصلی ( $m_1$ ) باید حدود ۱۱ کیلوولت باشد؛
- خانه‌هایی از جدول که با خط تیره پر شده‌اند، نشانگر آن هستند که در برخورد صاعقه به مزرعه بادی، اضافه‌ولتاژی این دسته توربین‌ها را تهدید نمی‌کند و همواره با ولتاژ نامی به فعالیت خود ادامه می‌دهند.
- عنصر  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) از جدول اضافه‌ولتاژها نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $j$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود (۱، ۲، ...، ۱۲). برای مثال درایه  $v_{27}$  نشان می‌دهد که در برخورد صاعقه به توربین شماره هفتم، چه مقدار اضافه‌ولتاژ به توربین شماره (۲) اعمال شده است.



شکل (۶): پیکربندی شاخه ای

### ۱.۶. اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در پیکربندی خطی

جدول‌های (۱) و (۲) و (۳) به ترتیب اضافه‌ولتاژهای پدیدآمده را در ژنراتور توربین بادی ( $m_2$ )، ثانویه ترانسفورماتور کمکی ( $m_4$ ) و ثانویه ترانسفورماتور اصلی ( $m_1$ ) نشان می‌دهند. از جدول‌های (۱) و (۲) این مهم به دست می‌آید که در پیکربندی خطی، اضافه‌ولتاژ اعمال شده به توربین آسیب‌دیده بیشترین مقدار است. اما توزیع این اضافه‌ولتاژها به صورت نزولی و با شروع از توربین آسیب دیده و به ترتیب شماره توربین‌هاست. اگر صاعقه به توربین‌های ابتدایی یا انتهایی برخورد کند، این روند کاملاً ملموس و مشخص است. اما اگر صاعقه به توربین‌های میانی برخورد نماید، اضافه‌ولتاژهای اعمال شده به سایر توربین‌ها از دو سمت توربین آسیب دیده، به صورت نزولی و به ترتیب شماره توربین توزیع می‌شوند. برای فهم بهتر این موضوع، نمودارهای ستونی اضافه‌ولتاژهای به دست آمده از جدول (۱) یا نقطه ( $m_2$ ) در این مزرعه بادی، پس از برخورد صاعقه به توربین شماره (۱) و شماره (۴)، به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) قابل رؤیت است. ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله از توربین آسیب دیده، اضافه‌ولتاژ رسیده به توربین‌های انتهایی کمتر و کمتر می‌شود. این یک نتیجه علمی و قابل پیش‌بینی است. اما اگر با نگاه تیزبینانه نمودارهای شکل‌های (۷) و (۸) بررسی شوند، این نتیجه نیز قابل استناد خواهد بود که در برخورد صاعقه به توربین‌ها، توربین‌های هم‌فاصله از توربین آسیب دیده، اضافه‌ولتاژ تقریباً یکسانی را متحمل می‌شوند. لذا باید

- در این پیکربندی‌ها، سه نمونه ترانسفورماتور استفاده شده است:
- ترانسفورماتور ۹۷۵ ولت به ۱۱ کیلوولت به منظور افزایش ولتاژ توربین بادی به ولتاژ فشار ضعیف؛
  - ترانسفورماتور ۹۷۵ ولت به ۵۶۶ ولت به منظور کاهش ولتاژ توربین بادی برای مصرف داخلی و سیستم کنترلی؛
  - ترانسفورماتور ۱۱ کیلوولت به ۶۶ کیلوولت به منظور افزایش ولتاژ توربین بادی به ولتاژ فشار متوسط و اتصال آن به شبکه قدرت.

### ۶. تحلیل نتایج و اعتبارسنجی

- در این قسمت اضافه‌ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی در مزرعه بادی تحت مطالعه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در ابتدا صاعقه به تک‌تک توربین‌ها برخورد می‌کند و سپس با تغییر پیکربندی اتصال توربین‌ها، این اضافه‌ولتاژها در جدول‌های (۱) تا (۱۲) ثبت می‌شوند. البته دانستن این نکته نیز خالی از لطف نیست که در شکل (۱)، اضافه‌ولتاژهای پدیدآمده در واقع ولتاژهای نقاط  $m_1$  و  $m_4$ ،  $m_2$  می‌باشند که در ادامه شرح داده می‌شوند.
- در تحلیل این جداول توجه به چند نکته ضروری است:
  - اعداد به دست آمده در تمامی جدول‌ها برحسب کیلوولت است؛
  - در این جداول ماکزیمم ولتاژ درج شده است؛
  - ولتاژ نامی ژنراتور توربین بادی ( $m_2$ ) باید حدود ۹۷۵ ولت

انتظار داشت که اضافه‌ولتاژ اعمال‌شده به توربین‌های شماره (۱۰)، میانی برخورد کند، توربین‌های بیشتری متحمل اضافه‌ولتاژ خواهند بود. (۱۱) و (۱۲) در برخورد صاعقه به توربین شماره (۱)، از تمامی اضافه‌ولتاژ کسب‌شده توسط سایر توربین‌ها در برخورد صاعقه به توربین چهارم کمتر باشد.

همچنین در پیکربندی خطی هرچه صاعقه بیشتر به توربین‌های

جدول (۱): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ژنراتور توربین بادی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود ( $i, j=1, 2, \dots, 12$ ).

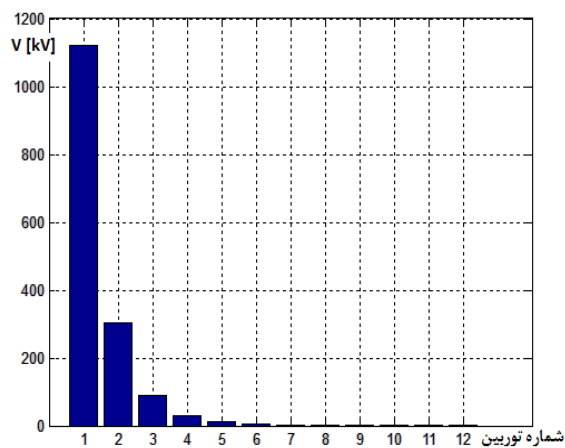
توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
توربین ۱	۱۱۲۱/۹	۳۰۴/۷	۹۱/۱۱	۲۹/۴۲	۱۲/۴۲	۵/۳۰	۱/۸۸	۱/۴۱	۱/۰۹	-	-
توربین ۲	۳۰۴/۶	۹۹۷/۹	۲۴۸	۷۴/۰	۲۳/۴۵	۹/۱۳	۲/۲۴	۱/۵۶	۱/۱۴	۰/۸۹	-
توربین ۳	۹۰/۵۶	۲۴۸/۹	۹۹۸	۲۵۱	۷۴/۸۹	۲۳/۹۰	۴/۱۰	۲/۳۲	۱/۴۸	۱/۲۳	۱/۰۸
توربین ۴	۲۳/۵۸	۷۵/۱۴	۲۴۸	۹۹۸	۲۴۹	۷۵/۲۹	۹/۶۳	۴/۰۶	۲/۳۲	۱/۴۵	۱/۴۰
توربین ۵	۱۲/۴۸	۲۳/۴۴	۷۵/۳۱	۲۵۲	۲۴۹	۷۵/۲۹	۲۴/۰۴	۹/۴۴	۴/۲۷	۲/۲۳	۱/۸۵
توربین ۶	۵/۲۱	۹/۱۵	۲۳/۸۹	۷۴/۱۷	۲۴۹	۹۹۸	۲۴۹	۲۳/۸۹	۹/۵۴	۴/۰۰	۲/۹۰
توربین ۷	۲/۹۰	۳/۹۷	۹/۵۵	۲۳/۹	۷۴/۸۸	۹۹۸/۵	۲۴۹/۳	۷۴/۱۴	۲۳/۸	۹/۱۵	۵/۲۱
توربین ۸	۱/۸۵	۲/۳	۴/۱	۹/۴۵	۲۴/۰۴	۷۵/۲۹	۲۴۹/۳	۲۵۱/۱	۷۵/۳۱	۲۳/۴۴	۱۲/۴۹
توربین ۹	۱/۳۲	۱/۵۸	۲/۱۳	۴/۰۷	۹/۶۴	۲۴/۰	۷۵/۲۹	۲۴۹/۳	۹۹۷/۸	۷۵/۱۵	۲۸/۵۳
توربین ۱۰	۱/۱۸	۱/۲۳	۱/۶۲	۲/۳۲	۴/۱۰	۹/۵۱	۲۳/۹۰	۷۴/۸۹	۹۸۸/۵	۲۴۸/۹	۹۰/۵۷
توربین ۱۱	-	۱/۰۶	۱/۱۴	۱/۵۶	۲/۲۴	۳/۹۶	۹/۱۳	۲۳/۴۵	۷۴/۰	۹۹۷/۸	۳۰۴/۶
توربین ۱۲	-	-	۱/۱۰	۱/۴۱	۱/۸۸	۳/۰۵	۱/۸۸	۱/۴۱	۹۱/۱۹	۳۰۴/۷	۱۱۲۱/۹

جدول (۲): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ثانویه ترانسفورماتور کمکی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود ( $i, j=1, 2, \dots, 12$ ).

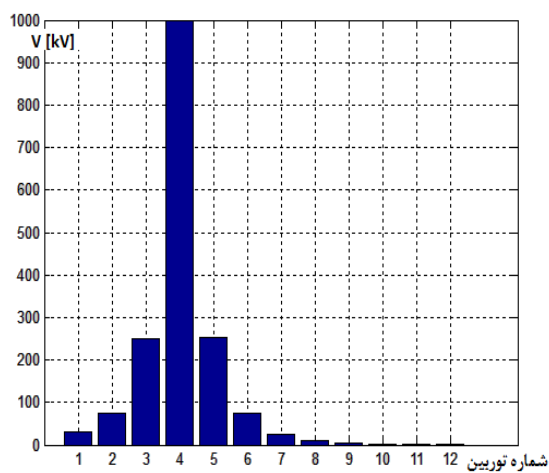
توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
توربین ۱	۱۲۱۲	۳۲۸	۹۷/۵	۳۱/۴۳	۵/۳۹	۲/۶۰	۱/۶۰	۱/۱۲	۰/۸۸	۰/۷۲	۰/۷۱
توربین ۲	۳۲۷	۱۰۷۹	۲۶۷	۷۹/۶۳	۲۴/۸۳	۹/۵۶	۱/۸۴	۱/۲۴	۰/۹۳	۰/۷۵	۰/۷۲
توربین ۳	۹۷	۲۶۷	۱۰۸۱	۲۷۱	۸۰/۲۰	۲۵/۲۴	۴/۱۳	۱/۹۹	۱/۲۹	۰/۹۳	۰/۸۷
توربین ۴	۳۰/۵	۸۰/۱۵	۲۶۸	۱۰۷۷	۲۶۸	۸۰/۳۱	۱۰/۰۶	۴/۰۳	۲/۰۰	۱/۲۷	۱/۱۲
توربین ۵	۱۳/۱	۲۴/۷۹	۸۰/۳۳	۲۷۱	۲۶۸	۱۰۸۰	۲۵/۴۸	۹/۸۴	۴/۱۲	۱/۸۶	۱/۵۸
توربین ۶	۵/۲۹	۹/۵۷	۲۵/۵۱	۷۹/۸۲	۲۶۸	۱۰۷۹	۸۰/۱۸	۲۵/۴۸	۹/۹۱	۴/۰۰	۲/۵۳
توربین ۷	۲/۵۴	۴/۰۰	۹/۹۲	۲۵/۴۸	۲۶۸	۸۰/۱۸	۲۶۸/۳	۷۹/۸۰	۲۵/۵۱	۹/۵۷	۵/۲۹
توربین ۸	۱/۵۸	۱/۸۷	۴/۱۲	۹/۸۴	۲۶۸	۸۰/۳۱	۱۰۷۹/۸	۲۷۱/۴	۸۰/۳۳	۲۴/۷۹	۱۳/۱۰
توربین ۹	۱/۱۲	۱/۲۷	۲/۰۹	۴/۱	۲۵/۴۳	۸۰/۳۱	۲۶۸/۳	۱۰۷۷	۲۶۸/۳	۸۰/۱۵	۳۰/۵۶
توربین ۱۰	۰/۸۷	۰/۹۳	۱/۲۹	۱/۹۹	۴/۱۳	۹/۸۹	۸۰/۲۰	۲۷۱/۴	۱۰۷۹/۹	۲۶۷/۹	۹۷/۰
توربین ۱۱	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۹۳	۱/۲۴	۳/۹۷	۹/۵۶	۱/۸۴	۱/۲۴	۲۶۷/۸	۱۰۷۹/۲	۳۲۷/۷
توربین ۱۲	۰/۷۰	۰/۷۲	۰/۸۸	۱/۱۳	۳/۰۵	۵/۳۹	۱۳/۰۲	۳۱/۴۳	۹۷/۵۹	۳۲۷/۹	۱۲۱۲

جدول (۳): اضافه ولتاژ پدید آمده در ثانویه ترانسفورماتور اصلی بر حسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه ولتاژ در سطر  $i$  ام و ستون  $j$  ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین ۱ زام برخورد کند، چه اضافه ولتاژهایی به توربین های  $i$  ام اعمال می شود ( $i=1,2,\dots,12$ ).

توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
۱۲۰۷/۱	۳۳۲/۹	۹۲/۵۷	۲۶/۵۳	۱۴/۸۹	-	-	-	-	-	-	-
۳۳۲/۷	۱۰۷۴/۱	۲۶۲/۹	۷۴/۶۰	۲۴/۱۲	۱۲/۳۲	-	-	-	-	-	-
۹۱/۹۸	۲۶۲/۹	۱۰۷۴/۹	۲۶۶/۴	۷۵/۱۸	۲۴/۱۸	۱۲/۳۷	-	-	-	-	-
۳۱/۲۷	۷۵/۱۲	۲۶۳/۶	۱۰۷۲/۳	۲۶۳/۳	۷۵/۲۸	۲۴/۲۰	۱۲/۳۶	-	-	-	-
۱۵/۰۵	۲۴/۱۶	۷۵/۲۵	۲۶۶/۳	۱۰۷۴/۵	۲۶۳/۱	۷۵/۲۶	۲۴/۲۵	۱۲/۳۴	-	-	-
-	۱۲/۳۹	۲۴/۳۶	۷۴/۱۲	۲۶۳/۲	۱۰۷۴/۷	۲۶۳/۲	۷۵/۱۱	۲۴/۱۴	۱۲/۴۴	-	-
-	-	۱۲/۴۷	۲۴/۱۹	۷۵/۰۷	۲۶۳/۲	۱۰۷۴/۷	۲۶۳/۲	۷۴/۶۸	۲۴/۴۰	۱۲/۴۳	-
-	-	-	۱۲/۴۶	۲۴/۳۷	۷۵/۱۳	۲۶۳/۱	۱۰۷۴/۷	۲۶۶/۲	۷۵/۱۶	۲۹/۹	۱۵/۲۰
-	-	-	-	۱۲/۶۰	۲۴/۴۲	۷۵/۰۵	۲۶۳	۱۰۷۲	۲۶۳/۱	۷۴/۴۴	۳۱/۵۲
-	-	-	-	-	۱۲/۸۸	۲۴/۶۰	۷۴/۷۶	۲۶۶	۱۰۷۴/۵	۲۶۲/۵	۹۱/۵۶
-	-	-	-	-	-	-	۲۴/۸۰	۷۳/۲	۲۶۲/۲	۱۰۷۳/۴	۳۲۲
-	-	-	-	-	-	-	-	۱۵/۹۸	۳۲/۰۵	۹۱/۴۸	۱۲۰۶



شکل (۷): نمودار ستونی توزیع اضافه ولتاژها در برخورد صاعقه با توربین شماره یک



شکل (۸): نمودار ستونی توزیع اضافه ولتاژها در برخورد صاعقه با توربین شماره چهار

آسیب‌دیده می‌باشد. بنابراین می‌توان استنباط کرد که در پیکربندی ستاره‌ای، میانگین اضافه‌ولتاژ اعمال شده به توربین‌ها باید بیشتر از پیکربندی خطی باشد. برای فهم بهتر این موضوع، مثال زیر می‌تواند راه‌گشا باشد.

فرض می‌شود در پیکربندی خطی، صاعقه به توربین شماره (۱۰) برخورد کرده است. لذا چون اضافه‌ولتاژها به صورت نزولی و به ترتیب شماره توربین، روی توربین‌ها توزیع می‌شوند، پس از گذر امواج اضافه‌ولتاژ از چند توربین نزدیک، سایر اضافه‌ولتاژها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابند. اما اگر در شرایط یکسان، صاعقه به توربین شماره (۱۰) در پیکربندی ستاره‌ای تزیق شود، اضافه‌ولتاژ پدیدآمده روی سایر توربین‌ها از دو سمت توربین آسیب‌دیده با نرخ تقریباً یکسان کاهش می‌یابند. اما این کاهش اضافه‌ولتاژ مانند روند طی شده در پیکربندی خطی نخواهد بود. زیرا با طی تعداد توربین‌های کمتری نسبت به حالت قبل، اضافه‌ولتاژها دوباره شروع به افزایش می‌کنند. به عبارت دیگر، اگر ابتدا و انتهای پیکربندی خطی به هم وصل شوند، پیکربندی ستاره‌ای پدید می‌آید. بنابراین انتظار می‌رود پس از گذشت روند موقتی کاهش اضافه‌ولتاژها، مقادیر ولتاژ دوباره روند افزایشی به خود بگیرند و میانگین اضافه‌ولتاژها را افزایش دهند.

این نتیجه را می‌توان وابسته به این موضوع دانست که اضافه‌ولتاژ صاعقه بستگی به امیدانس موجی‌ای دارد که در لحظه برخورد از نقطه تزیق صاعقه اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین اگر مدل گذرای سریع اجزای به کار رفته در مزرعه بادی نیز در نظر گرفته شود، واضح است که امیدانس تونن دیده‌شده از ابتدا و انتهای خط بیشتر از امیدانس تونن دیده‌شده از سایر توربین‌هاست و این موضوع ایجاب می‌کند که توربین‌های ابتدایی و انتهایی اضافه‌ولتاژ بیشتری را متحمل شوند.

### ۲.۶. اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در پیکربندی ستاره‌ای

جدول‌های (۴) و (۵) و (۶) به ترتیب اضافه‌ولتاژهای پدیدآمده را در ژنراتور توربین بادی ( $m_2$ )، ثانویه ترانسفورماتور کمکی ( $m_4$ ) و ثانویه ترانسفورماتور اصلی ( $m_1$ ) نشان می‌دهند. در پیکربندی ستاره‌ای، اضافه‌ولتاژ اعمال شده به توربین‌های متساوی الفاصله از توربین آسیب‌دیده یکسان است. لذا می‌توان دریافت که مثلاً اگر صاعقه به توربین شماره (۷) تزیق شود، میزان اضافه‌ولتاژ اعمال شده به توربین‌های شماره (۶) و شماره (۸) باید اعداد تقریباً یکسانی به دست آیند. صحت این نتایج با استناد از جداول (۴) تا (۶) و مقایسه درایه‌های  $v_{87}$  و  $v_{67}$  نیز تأیید می‌شود. همچنین مطابق پیکربندی خطی، توزیع اضافه‌ولتاژها روی سایر توربین‌ها به صورت نزولی و با شروع از توربین

جدول (۴): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ژنراتور توربین بادی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود ( $i=1,2,\dots,12$ ).

	توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
توربین ۱	۱۰۷۹/۹	۲۶۸/۴	۸۰/۴۹	۲۴/۹۹	۹/۶۸	۳/۱۲	۴/۱۹	۳/۴۸	۹/۲۴	۲۵/۱۶	۸۰/۱۵	۲۶۸/۲
توربین ۲	۲۶۸/۳	۱۰۸۰/۴	۲۶۸/۴	۸۰/۱۵	۲۵/۷۴	۹/۴۸	۳/۴۹	۴/۱۶	۳/۶۱	۹/۱۲	۲۵/۹۵	۸۰/۲۱
توربین ۳	۸۰/۳۱	۲۶۸/۳	۱۰۷۸/۹	۲۶۸/۲	۸۰/۴۹	۲۵/۰۱	۹/۸۷	۳/۴۸	۴/۹۱	۳/۶۷	۹/۲۶	۲۵/۶۶
توربین ۴	۲۵/۷۲	۸۰/۲۴	۲۶۸/۳	۱۰۷۹/۹	۲۶۸/۳	۸۰/۱۲	۲۵/۳۵	۹/۳۵	۳/۴۸	۴/۰۰	۳/۲۴	۹/۱۴
توربین ۵	۹/۸۴	۲۵/۳۱	۸۰/۵۰	۲۶۸/۳	۱۰۷۹/۰	۲۶۸/۲	۸۰/۴۶	۲۵/۶۴	۹/۳۴	۳/۴۹	۴/۵۹	۳/۳۵
توربین ۶	۳/۸۲	۹/۱۲	۲۵/۴۱	۸۰/۵۱	۲۶۸/۲	۱۰۷۸/۹	۲۶۸/۳	۸۰/۳۹	۲۵/۸۹	۹/۱۲	۳/۹۴	۴/۴۸
توربین ۷	۳/۶۵	۳/۷۹	۹/۱۵	۲۵/۴۵	۸۰/۳۲	۲۶۸/۳	۱۰۷۸/۹	۲۶۸/۲	۸۰/۳۵	۲۵/۳۶	۹/۵۳	۳/۶۸
توربین ۸	۳/۸۳	۴/۱۱	۳/۸۵	۹/۲۴	۲۵/۹۷	۸۰/۳۵	۲۶۸/۳	۱۰۸۷/۸	۲۶۸/۳	۸۰/۹۶	۲۵/۴۶	۹/۲۱
توربین ۹	۹/۸۱	۳/۸۱	۴/۱۷	۳/۷۵	۹/۵۶	۲۵/۸۵	۸۰/۵۰	۲۶۸/۳	۱۰۷۹	۲۶۸/۳	۸۰/۸۷	۲۵/۱۶
توربین ۱۰	۲۵/۷۱	۹/۱۵	۳/۸۵	۴/۲۰	۳/۴۵	۹/۴۷	۲۵/۴۱	۸۰/۴۵	۲۶۸/۳	۱۰۷۹/۹	۲۶۸/۳	۸۰/۱۹
توربین ۱۱	۸۰/۳۲	۲۵/۲۴	۹/۱۹	۳/۶۹	۴/۴۸	۳/۱۹	۹/۱۵	۲۵/۳۲	۸۰/۴۰	۲۶۸/۲	۱۰۷۹/۹	۲۶۸/۳
توربین ۱۲	۲۶۸/۳	۸۰/۱۰	۲۵/۳۷	۹/۲۴	۳/۶۵	۴/۱۶	۳/۸۵	۹/۱۱	۲۵/۴۶	۸۰/۱۵	۲۶۸/۳	۱۰۷۹/۰



جدول (۵): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ثانویه ترانسفورماتور کمکی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $j$ ام اعمال می‌شود ( $i, j=1, 2, \dots, 12$ ).

	توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
توربین ۱	۹۹۸/۴	۲۴۹/۲	۷۵/۰۱	۲۴/۵۱	۹/۸۹	۳/۲۶	۴/۱۸	۳/۵۸	۹/۳۲	۲۴/۰۳	۷۴/۵۶	۲۴۹/۳
توربین ۲	۲۴۹/۳	۹۹۸/۱	۲۴۹/۷	۷۵/۱۳	۲۴/۷۸	۹/۶۸	۳/۶۳	۴/۱۲	۳/۶۵	۹/۸۲	۲۴/۵۵	۷۴/۱۲
توربین ۳	۷۵/۲۴	۲۴۹/۲	۹۹۸/۱۵	۲۴۹/۳	۷۵/۶۳	۲۴/۱۱	۹/۴۴	۳/۴۵	۴/۶۳	۳/۹۶	۹/۴۸	۲۴/۶۹
توربین ۴	۲۴۹/۱۰	۷۵/۱۵	۲۴۹/۱	۹۹۸/۶۵	۲۴۹/۲	۷۵/۲۶	۲۴۹/۹۵	۹/۱۶	۳/۱۶	۴/۵۳	۳/۳۳	۹/۴۶
توربین ۵	۹/۳۲	۲۴/۱۵	۷۵/۶۴	۲۹/۳	۹۹۸/۴۶	۲۴۹/۱	۷۵/۶۴	۲۴/۲۶	۹/۲۲	۳/۹۹	۴/۳۶	۳/۶۱
توربین ۶	۳/۸۴	۹/۱۲	۲۴/۱۹	۷۵/۴۸	۲۴۹/۱	۹۹۸/۷	۲۴۹/۳	۷۵/۹۱	۲۴/۳۵	۹/۲۵	۳/۱۹	۴/۴۲
توربین ۷	۴/۳۹	۳/۲۶	۳/۲۶	۲۴/۷۸	۷۵/۶۵	۲۴۹/۵	۹۹۸/۲	۲۴۹/۲	۷۵/۸۸	۲۴/۵۹	۹/۶۳	۳/۵۸
توربین ۸	۳/۹۱	۴/۴۵	۳/۱۶	۹/۵۵	۲۴/۵۶	۷۵/۳۲	۲۴۹/۶	۹۹۸/۳	۲۴۹/۲	۷۵/۱۸	۲۴/۸۶	۹/۱۵
توربین ۹	۹/۳۳	۳/۰۷	۴/۲۶	۳/۲۵	۹/۸۲	۲۴/۳۲	۷۵/۱۱	۲۴۹/۶	۹۹۸/۲	۲۴۹/۷	۷۵/۶۴	۲۴/۰۰
توربین ۱۰	۲۴/۱۵	۹/۴۲	۳/۵۱	۴/۸۴	۳/۵۸	۹/۷۳	۲۴/۱۲	۷۵/۸۶	۲۴۹/۳	۹۹۸/۶	۲۴۹/۳	۷۵/۱۵
توربین ۱۱	۷۴/۹۷	۲۴/۵۶	۹/۷۶	۳/۷۶	۴/۶۰	۳/۳۵	۹/۴۳	۲۴/۱۹	۷۵/۹۰	۲۴۹/۴	۹۹۸/۴	۲۴۹/۵۵
توربین ۱۲	۲۴۹/۱	۷۵/۰۱	۲۵/۰۰	۹/۵۴	۳/۸۹	۴/۰۵	۳/۹۷	۳/۹۷	۲۴/۸۹	۷۵/۴۲	۲۴۹/۷	۹۹۸/۲

جدول (۶): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ثانویه ترانسفورماتور اصلی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $j$ ام اعمال می‌شود ( $i, j=1, 2, \dots, 12$ ).

	توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
توربین ۱	۱۰۷۴/۳	۲۶۲/۸	۷۵/۱۵	۲۵/۶۱	۱۲/۳۱	-	-	-	۱۲/۵۶	۲۴/۱۶	۷۵/۹۱	۲۶۳/۲
توربین ۲	۲۶۳/۰	۱۰۷۴/۴	۲۶۳/۱	۷۴/۵۵	۱۲/۳۴	-	-	-	-	۱۲/۴۳	۲۴/۶۹	۷۵/۳۳
توربین ۳	۷۵/۰۹	۲۶۳/۱	۱۰۷۴/۱	۲۴۳/۲	۷۴/۳۵	۲۵/۹۱	۱۲/۳۵	-	-	-	۱۲/۵۳	۲۴/۹۱
توربین ۴	۲۴/۴۴	۷۴/۹۹	۲۶۳/۳	۱۰۷۳/۳	۲۶۳/۲	۷۵/۸۴	۲۵/۶۲	۱۲/۴۵	-	-	-	۱۲/۱۰
توربین ۵	۱۲/۴۹	۲۵/۰۱	۷۵/۱۱	۲۶۳/۳	۱۰۷۴/۴	۲۶۳/۲	۷۵/۱۲	۲۵/۶۸	۱۱/۹۵	-	-	-
توربین ۶	-	۱۲/۶۳	۲۵/۶۳	۷۵/۲۰	۲۶۳/۳	۱۰۷۴/۱	۲۶۳/۲	۷۵/۴۳	۲۵/۲۱	۱۲/۵۰	-	-
توربین ۷	-	-	۱۱/۹۹	۲۵/۶۱	۷۵/۹۰	۲۶۳/۲	۱۰۷۴/۳	۲۶۳/۳	۷۵/۳۴	۲۵/۱۹	۱۱/۳۷	-
توربین ۸	-	-	-	۱۲/۴۲	۲۵/۴۶	۷۵/۶۰	۲۶۳/۳	۱۰۷۴/۲	۲۶۳/۱	۷۵/۶۱	۲۵/۶۱	۱۲/۳۵
توربین ۹	۱۲/۵۸	-	-	-	۱۱/۴۱	۲۵/۳۲	۲۵/۲۱	۷۵/۲۱	۲۶۳/۳	۱۰۷۴/۲	۲۶۳/۳	۲۵/۴۲
توربین ۱۰	۲۴/۶۱	۱۲/۵۹	-	-	-	۱۲/۳۲	۲۵/۶۹	۷۵/۴۵	۲۶۳/۲	۱۰۷۴/۰	۲۶۳/۳	۷۵/۱۹
توربین ۱۱	۷۵/۱۸	۲۴/۳۵	۱۲/۵۴	-	-	-	۱۱/۵۹	۲۵/۷۹	۷۵/۱۴	۲۶۳/۱	۱۰۷۴/۳	۲۶۳/۱
توربین ۱۲	۲۶۳/۱۵	۷۵/۲۳	۲۴/۶۲	۱۲/۸۵	-	-	-	۱۲/۳۰	۲۵/۴۹	۷۵/۲	۲۶۳/۲	۱۰۷۴/۴

انتقال داده شوند، نمودار شکل (۱۰) به دست می‌آید. همچنین این نکته نیز قابل توجه است که میزان اضافه‌ولتاژ اعمال شده در برخورد مستقیم صاعقه، ماکزیمم ولتاژ پدیدآمده روی توربین‌های آسیب‌دیده (قطر اصلی ماتریس اضافه‌ولتاژ) تقریباً یکسان است. زیرا امیدانس تونن دیده شده از دید هر توربین مشابه امیدانس تونن دیده‌شده از دید سایر توربین‌هاست که این نتایج سازگار با [۱۶] نیز می‌باشد.

برای نمونه، نمودار ستونی اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در برخورد صاعقه به توربین‌های شماره (۱) و شماره (۴) به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌گردد. مقایسه نمودارهای شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که در پیکربندی ستاره‌ای، می‌توان توزیع اضافه‌ولتاژ روی توربین‌ها را تنها با داشتن یک ستون از جدول (۴) پیش بینی کرد. برای مثال، اگر ستون‌های نمودار شکل (۹) چهار واحد به سمت راست

در پیکربندی مثلثی، با توجه به شکل (۵)، می‌توان توربین‌ها را به گروه‌های سه‌تایی تقسیم کرد. در هر گروه سه‌تایی، سیستم زمین هر سه توربین به یکدیگر وصل شده‌اند. اما در اتصال گروه‌های سه‌تایی میانی به یکدیگر، سیستم زمین توربین‌های نزدیک‌تر به منظور کاهش مقاومت معادل زمین، به یکدیگر وصل شده‌اند. در هر گروه سه‌تایی، توربینی که در اتصال به گروه‌های مجاور نقشی ایفا نمی‌کند، سرگروه نامیده می‌شود. اتصال سیستم‌های زمین گروه‌های مجاور سبب می‌شود تا در تحلیل اضافه‌ولتاژ در پیکربندی مثلثی، همواره توربین سرگروه اضافه‌ولتاژ بیشتری متحمل شود و اضافه‌ولتاژ روی دو توربین دیگر، به شکل تقریباً مساوی توزیع گردد. برای نمونه در گروه توربین‌های (۴) و (۵) و (۶)، توربین‌های شماره (۴) و (۶) فرایند تقریباً یکسانی را طی می‌کنند. در این گروه، توربین شماره (۵) به‌عنوان سرگروه انتخاب می‌شود. در گروه‌های کناری، سرگروه می‌تواند به‌طور دلخواه یکی از دو توربینی باشد که نقشی در اتصال به گروه‌های مجاور ندارند.

در این قسمت چهار گروه توربین وجود دارد:

گروه اول: توربین‌های شماره (۱) و (۲) و (۳) که توربین شماره

(۲) سرگروه است.

گروه دوم: توربین‌های شماره (۴) و (۵) و (۶) که توربین شماره

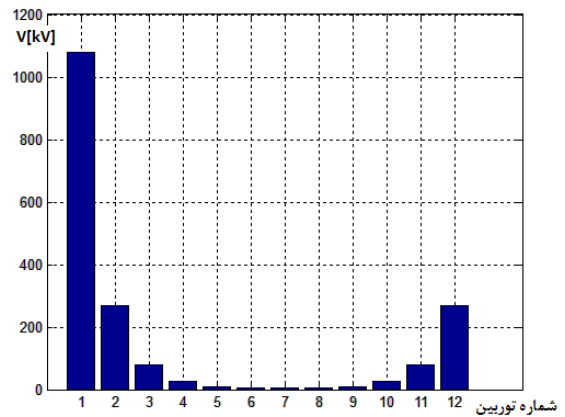
(۵) سرگروه است.

گروه سوم: توربین‌های شماره (۷) و (۸) و (۹) که توربین شماره

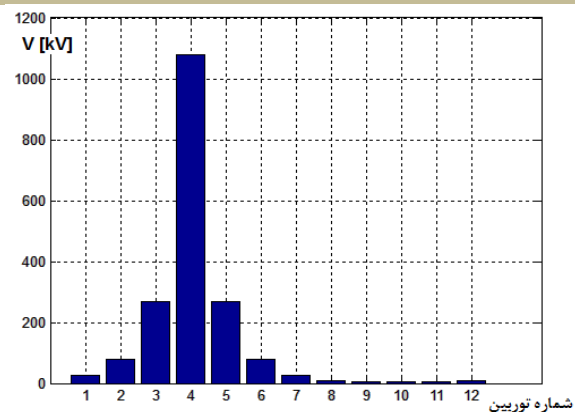
(۸) سرگروه است.

گروه چهارم: توربین‌های شماره (۱۰) و (۱۱) و (۱۲) که توربین

شماره (۱۱) سرگروه است.



شکل (۹): نمودار ستونی توزیع اضافه‌ولتاژها در برخورد صاعقه با توربین شماره یک



شکل (۱۰): نمودار ستونی توزیع اضافه‌ولتاژها در برخورد صاعقه با توربین شماره چهار

### ۳.۶ اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در پیکربندی مثلثی

جدول‌های (۷) و (۸) و (۹) به ترتیب اضافه‌ولتاژهای پدیدآمده را در ژنراتور توربین بادی ( $m_2$ )، ثانویه ترانسفورماتور کمکی ( $m_4$ ) و ثانویه ترانسفورماتور اصلی ( $m_1$ ) نشان می‌دهند.

جدول (۷): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ژنراتور توربین بادی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود ( $i=1,2,\dots,12$ ).

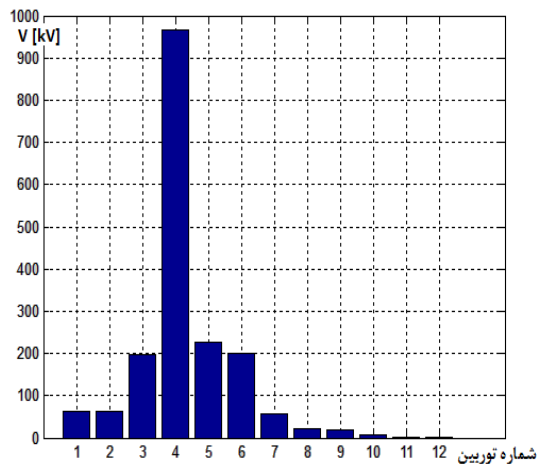
توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
۱۰۸۰/۵	۲۶۷/۶	۲۲۶/۸	۶۴/۰۸	۲۳/۴۴	۲۱/۴۲	۶/۷۱	۲/۸۶	۲/۷۲	۱/۱۹	۰/۸۶	۰/۸۶
۲۶۷/۶	۱۰۸۰/۱	۲۲۶/۸	۶۴/۰۷	۲۳/۴۴	۲۱/۴۲	۶/۷۱	۲/۸۵	۲/۷۲	۱/۱۸	۰/۸۷	۰/۸۷
۲۲۶/۴	۲۲۶/۴	۹۶۶/۵	۱۹۷/۲	۲۳/۴۵	۲۱/۴۲	۱۶/۶۱	۶/۲۷	۵/۸۴	۲/۰۲	۱/۱۸	۱/۱۸
۶۳/۰۸	۶۳/۰۸	۱۹۷/۳	۹۶۶/۴۱	۶۰/۱۸	۵۵/۳۸	۵۵/۹۲	۲۰/۶۶	۱۸/۹۵	۵/۷۲	۲/۶۴	۲/۶۴
۲۳/۳۵	۲۳/۳۶	۶۱/۱۷	۲۲۷/۱	۲۲۶/۸	۱۹۸/۸	۶۱/۴۵	۲۲/۵۷	۲۰/۹۵	۶/۱۹	۲/۸۸	۲/۸۸
۲۱/۳۷	۲۱/۳۵	۵۵/۴۰	۱۹۸/۸	۱۰۸۱/۰	۲۲۷/۱	۱۹۷/۴	۶۰/۶۸	۵۵/۷۴	۱۶/۷۰	۶/۸۰	۶/۸۰
۶/۸۰	۶/۸۱	۶/۸۱	۱۶/۷۰	۵۵/۷۵	۲۶۸/۱	۹۶۶/۴	۲۲۶/۸	۱۹۸/۸	۵۵/۴۰	۲۱/۳۷	۲۱/۳۸
۲/۸۸	۲/۸۷	۶/۱۹	۲۰/۹۵	۶۰/۶۷	۱۹۷/۴	۲۲۷/۱	۱۰۸۰/۹	۲۲۷/۱	۶۱/۱۶	۲۳/۳۴	۲۳/۳۴
۲/۶۴	۲/۶۵	۵/۷۱	۱۸/۹۳	۲۲/۵۷	۶۱/۴۵	۱۹۸/۸	۲۲۶/۸	۹۶۶/۴	۱۹۷/۴	۶۳/۱۰	۶۳/۱۰
۱/۱۸	۱/۱۷	۲/۰۱	۵/۸۴	۲۰/۶۶	۵۵/۹۱	۵۵/۳۸	۶۰/۱۸	۱۹۷/۳	۹۶۶/۳	۲۲۶/۵	۲۲۶/۵
۰/۸۶	۰/۸۷	۱/۱۸	۲/۷۲	۶/۲۷	۱۶/۶۱	۲۱/۴۲	۲۳/۴۴	۶۴/۰۷	۲۲۶/۷	۲۶۷/۶	۲۶۷/۶
۰/۸۶	۰/۸۶	۱/۱۸	۲/۷۲	۲/۸۵	۶/۷۱	۲۱/۴۲	۲۳/۴۵	۶۴/۰۸	۲۲۶/۸	۱۰۸۰/۶	۱۰۸۰/۶

جدول (۸): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ثانویه ترانسفورماتور کمکی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $j$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود ( $i=1,2,\dots,12$ ).

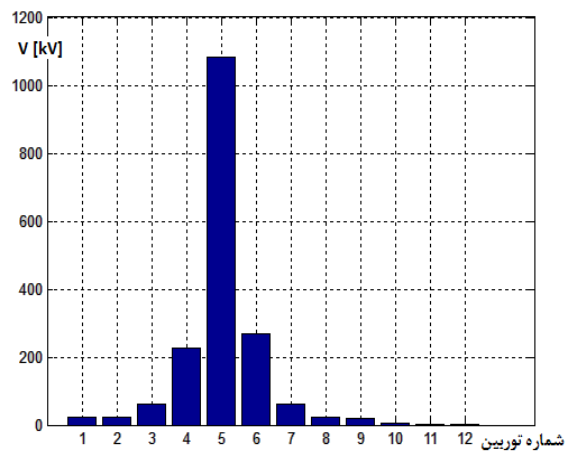
توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
۹۹۹/۷	۲۴۸/۷	۲۱۰/۵	۶۰/۱۶	۲۱/۹۱	۲۰/۱۵	۶/۵۱	۲/۹۳	۲/۸۰	۱/۳۷	۱/۰۹	۲۴۸/۶
۲۴۸/۷	۹۹۹/۸	۲۱۰/۵	۶۰/۱۷	۲۱/۹۱	۵۵/۳۸	۶/۵۲	۲/۹۴	۲/۸۱	۱/۳۷	۱/۰۹	۱/۰۸
۲۱۰/۲	۲۱۰/۵	۸۹۳/۱	۱۸۳/۰	۵۶/۱۴	۵۱/۸۰	۱۵/۶۶	۶/۰۸	۵/۷۴	۲/۱۵	۱/۳۷	۱/۰۸
۵۸/۸۵	۵۸/۴۵	۱۸۳/۱	۸۹۲/۳	۲۱۰/۵	۱۸۴/۵	۵۲/۳۹	۱۹/۳۹	۱۷/۸۹	۵/۵۸	۲/۷۳	۱/۳۷
۲۱/۹۱	۲۱/۲۶	۵۷/۳۹	۲۱۰/۸	۱۰۰۰/۰	۲۱۰/۸	۵۷/۴۴	۲۱/۲۱	۱۹/۴۱	۶/۰۳	۲/۹۴	۲/۷۲
۲۰/۰۶	۲۰/۱۴	۵۲/۰۳	۱۸۴/۶	۲۱۰/۵	۸۹۲/۴	۱۸۳/۱	۵۶/۶۲	۵۲/۳۵	۱۵/۷۳	۶/۵۹	۲/۹۴
۶/۵۹	۶/۱۵	۱۵/۷۳	۵۲/۳۵	۵۶/۶۰	۱۸۳/۱	۸۹۲/۴	۲۱۰/۵	۱۸۴/۵	۵۲/۰۳	۲۰/۰۷	۶/۵۷
۲/۹۴	۲/۹۵	۶/۰۲	۱۹/۶۳	۲۱/۲۱	۵۷/۴۳	۲۱/۲۱	۲۱۰/۸	۲۱۰/۸	۵۷/۴۰	۲۱/۹۱	۲۰/۰۸
۲/۷۳	۲/۱۵	۵/۵۹	۱۷/۸۹	۱۹/۳۹	۵۲/۳۳	۱۸۴/۵	۲۱۰/۵	۱۸۴/۵	۱۸۳/۱	۵۸/۸۵	۲۱/۹۱
۱/۳۷	۱/۶۲	۲/۱۴	۵/۷۳	۶/۰۹	۱۵/۶۶	۵۱/۸۲	۵۶/۱۴	۱۸۳/۰۰	۸۹۳/۱	۲۱۰/۲	۵۸/۸۴
۱/۰۸	۱/۰۴	۱/۳۷	۲/۸۰	۲/۹۲	۶/۵۱	۲۰/۱۵	۲۱/۹۱	۶۰/۱۵	۲۱۰/۵	۹۹۹/۸	۲۱۰/۱
۱/۰۸	۱/۰۴	۱/۳۸	۲/۸۰	۲/۹۱	۶/۵۱	۲۰/۱۵	۲۱/۹۱	۶۰/۱۷	۲۱۰/۵	۲۴۸/۷	۹۹۹/۷

جدول (۹): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ثانویه ترانسفورماتور اصلی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $j$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود ( $i=1,2,\dots,12$ ).

توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
۱۰۷۵/۰	۲۶۲/۱	۲۲۱/۲	۵۸/۴۴	۱۷/۸۰	۲۲/۸۶	-	-	-	-	-	-
۲۶۲/۱	۱۰۷۵/۱	۲۲۱/۲	۵۸/۴۴	۲۱/۳۳	۲۲/۸۶	-	-	-	-	-	-
۲۲۰/۷	۲۲۰/۴	۹۶۰/۶	۱۹۱/۵	۵۴/۴۲	۱۸/۸۰	۵۲/۴۹	۲۱/۲۱	-	-	-	-
۵۷/۷۳	۵۷/۴۹	۱۹۲/۰	۹۶۱/۱	۲۲۱/۵	۱۹۳/۵	۵۲/۷۲	۲۱/۲۱	۲۲/۲۱	-	-	-
۲۱/۱۴	۲۱/۲۴	۵۵/۸۱	۲۲۱/۵	۱۰۷۵/۷	۲۲۱/۸	۵۶/۱۰	۱۹/۹۷	۲۱/۲۲	-	-	-
۲۲/۶۲	۲۲/۶۴	۵۱/۹۵	۱۹۳/۴	۲۲۱/۴	۹۶۱/۱	۱۹۲/۰	۲۹/۷۵	۵۳/۲۰	۱۸/۵۵	-	-
-	-	۱۸/۳۷	۵۰/۵۲	۵۵/۴۴	۱۹۲/۲	۹۶۱/۲	۲۲۱/۶	۱۹۳/۶۸	۵۱/۷۶	۲۲/۴۴	۲۲/۴۴
-	-	-	۲۱/۰۹	۱۹/۸۵	۵۶/۲۳	۲۲۱/۹	۱۰۷۵/۸	۲۲۱/۹۵	۵۵/۹۴	۲۱/۰۱	۲۱/۰۰
-	-	-	۲۲/۱۲	۲۱/۱۲	۵۰/۶۶	۱۹۳/۶	۲۲۱/۶	۹۶۱/۰	۱۹۲/۱	۵۷/۸۲	۵۷/۸۱
-	-	-	-	-	۱۸/۲۴	۵۱/۹۱	۵۵/۰۰	۱۹۲/۱	۹۶۱/۲	۲۲۱/۳	۲۲۱/۳
-	-	-	-	-	-	۲۲/۴۱	۲۰/۸۸	۵۸/۹۰	۲۲۱/۶	۱۰۷۵/۵	۱۰۷۵/۵
-	-	-	-	-	-	۲۲/۴۴	۲۰/۹۰	۵۸/۹۰	۲۲۱/۶	۲۶۲/۵	۲۶۲/۴



شکل (۱۲): نمودار ستونی توزیع اضافه‌ولتاژها در برخورد صاعقه با توربین شماره چهار

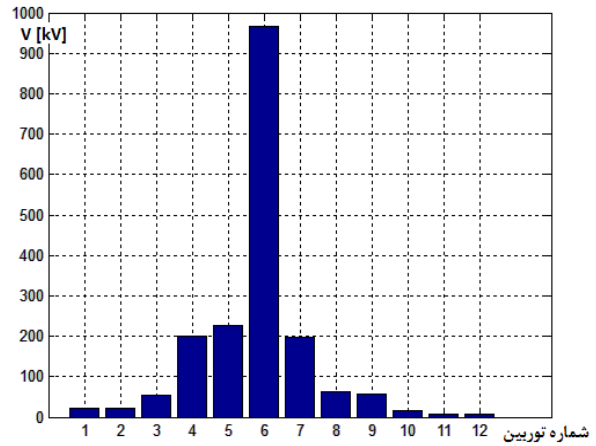


شکل (۱۱): نمودار ستونی توزیع اضافه‌ولتاژها در برخورد صاعقه با توربین شماره پنج

اعتبارسنجی نمود. بنابراین این موضوع ایجاب می‌کند که توزیع اضافه‌ولتاژها روی توربین‌های زیرگروه از این دو دسته توربین نیز فرایندهای تقریباً مشابهی را طی کنند. همچنین توربین‌هایی که از دید این دو گروه مدار معادل تونن زیر گذرای مشابهی دارند، اضافه‌ولتاژ تقریباً یکسانی را متحمل می‌شوند. شایان ذکر است که این نتایج برای گروه‌های اول و چهارم نیز کاملاً صادق می‌باشد.

#### ۴.۶. اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در پیکربندی شاخه‌ای

جدول‌های (۱۰) و (۱۱) و (۱۲) به ترتیب اضافه‌ولتاژهای پدیدآمده را در ژنراتور توربین بادی ( $m_2$ )، ثانویه ترانسفورماتور کمکی ( $m_4$ ) و ثانویه ترانسفورماتور اصلی ( $m_1$ ) نشان می‌دهند. در پیکربندی شاخه‌ای، شش توربین به صورت خطی دابل و شش توربین دیگر به صورت دسته‌های دوتایی سری و شروع از یک نقطه (مانند شاخه‌های درخت) به هم وصل شده‌اند. بنابراین انتظار می‌رود که اضافه‌ولتاژها به صورت دو دسته شش‌تایی تقریباً مستقل روی توربین‌ها توزیع شوند. چون پیکربندی شاخه‌ای از نظم مشخصی نسبت به پیکربندی‌های پیشین برخوردار نیست، لذا پیش‌بینی می‌شود که اضافه‌ولتاژهای اعمال‌شده به تمامی توربین‌ها، روند مشخصی را طی نکنند. بنابراین در حالت کلی نمی‌توان درباره توزیع اضافه‌ولتاژها اظهار نظر نمود.



شکل (۱۳): نمودار ستونی توزیع اضافه‌ولتاژها در برخورد صاعقه با توربین شماره شش

از سوی دیگر، چون امپدانس تونن دیده‌شده از توربین سرگروه متفاوت از دو توربین دیگر است، لذا انتظار می‌رود که ماکزیمم اضافه‌ولتاژ اعمال‌شده به این توربین با سایر توربین‌های آن گروه متفاوت باشد. این موضوع را به آسانی می‌توان در نمودار ستونی توزیع اضافه‌ولتاژها در شکل (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) مشاهده کرد. از لحاظ تحلیل مداری، گروه‌های دوم و سوم مدار معادل تونن یکسانی دارند. لذا باید اضافه‌ولتاژهایی که توربین‌های سرگروه متحمل می‌شوند، با یکدیگر برابر باشند. صحت این نتیجه را می‌توان با مقایسه اعداد به‌دست‌آمده از جدول (۷) (مقایسه  $v_{55}$  و  $v_{88}$ )

جدول (۱۰): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ژنراتور توربین بادی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $j$ ام اعمال می‌شود ( $i=1,2,\dots,12$ ).

توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
۹۶۶/۰	۲۷۷/۶	۱۹۶/۷	۶۹/۸۳	۵۷/۷۲	۲۰/۶۱	۱۹۶/۹	۷۰/۳۴	۴۹/۰۵	۱۷/۵۴	۱۴/۵۹	۶/۲۵
۲۷۸/۲	۱۲۱۳/۶	۷۰/۷۰	۲۵/۶۸	۲۰/۹۲	۱۰/۴۸	۷۰/۷۹	۲۶/۱۰	۱۷/۸۶	۷/۸۸	۶/۲۳	۳/۳۸
۱۹۶/۷	۷۰/۲۴	۹۶۵/۷	۲۷۵/۵	۲۲۶/۸	۸۲/۲۸	۴۹/۰۴	۱۷/۶۵	۱۲/۸۶	۵/۰۷	۴/۳۰	۲/۰۷
۷۰/۷۱	۲۵/۷۸	۲۷۸/۱	۱۲۱۰/۱	۸۳/۱۵	۳۱/۲۲	۱۷/۸۶	۷/۸۸	۵/۲۴	۲/۷۰	۲/۱۷	۱/۳۲
۵۷/۸۶	۲۰/۷۴	۲۲۷/۱	۸۲/۲۵	۱۰۷۹/۶	۳۲۷/۱	۱۴/۶۵	۶/۱۷	۴/۴۲	۲/۰۷	۱/۷۸	۱/۱۴
۲۰/۹۳	۱۰/۴۵	۸۳/۱۹	۳۱/۰۷	۳۲۸/۳	۱۲۰۹/۴	۶/۱۷	۳/۳۸	۲/۱۲	۱/۳۴	۱/۱۹	۰/۹۴
۱۹۶/۹	۷۰/۳۳	۴۹/۰۵	۱۷/۵۶	۱۴/۶۵	۶/۲۳	۹۶۶/۰	۲۷۷/۶	۱۹۶/۷	۶۹/۸۴	۵۷/۷۲	۲۰/۶۱
۷۰/۸۰	۲۶/۰۹	۱۷/۸۶	۷/۸۸	۶/۲۲	۳/۳۸	۲۷۸/۳	۱۲۱۳/۶	۷۰/۷۱	۲۵/۶۹	۲۰/۹۲	۱۰/۴۵
۴۹/۰۵	۱۷/۶۵	۱۲/۸۶	۵/۰۷	۴/۳۰	۲/۰۸	۱۹۶/۷	۷۰/۲۴	۹۶۵/۷	۲۷۵/۵	۲۲۶/۸	۸۲/۲۸
۱۷/۸۶	۷/۸۸	۵/۲۴	۲/۷۰	۲/۱۷	۱/۳۲	۷۰/۷۲	۲۷۸/۱	۲۵/۷۶	۱۲۱۰/۱	۸۳/۱۴	۳۱/۲۱
۱۴/۶۵	۶/۱۷	۴/۴۱	۲/۰۸	۱/۷۷	۱/۱۲	۵۷/۸۷	۲۰/۷۵	۲۲۷/۱	۸۲/۲۶	۱۰۷۹/۶	۳۲۷/۱
۶/۱۷	۳/۳۸	۲/۱۲	۱/۳۴	۱/۲۰	۰/۹۴	۲۰/۹۳	۱۰/۴۵	۸۳/۱۹	۳۱/۰۶	۳۲۸/۳	۱۲۰۹/۴

جدول (۱۱): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ثانویه ترانسفورماتور کمکی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود ( $i=1,2,\dots,12$ ).

	توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
توربین ۱	۸۹۲/۸	۲۵۸/۰	۱۸۲/۶	۶۵/۳۲	۵۳/۸۶	۱۹/۴۲	۱۸۲/۷۳	۶۵/۶۶	۴۵/۷۸	۱۶/۵۷	۱۳/۸۳	۶/۰۷
توربین ۲	۲۵۸/۵	۱۱۲۲/۲	۶۵/۹۴	۲۴/۱۹	۱۹/۷۲	۱۰/۰۰	۶۶/۰۲	۲۴/۴۸	۱۶/۸۶	۷/۶۰	۶/۰۵	۳/۴۶
توربین ۳	۱۸۲/۵	۶۵/۵۴	۸۹۲/۵	۲۵۶/۴	۲۱۰/۵	۷۷/۲۲	۴۵/۷۸	۱۶/۶۸	۱۱/۸۲	۵/۰۰	۴/۲۶	۲/۲۱
توربین ۴	۶۵/۹۶	۲۴/۲۱	۲۵۸/۴	۱۱۲۶/۴	۷۷/۵۳	۲۹/۲۹	۱۶/۸۸	۷/۶۴	۵/۱۴	۲/۷۸	۲/۲۹	۱/۵۱
توربین ۵	۵۳/۹۹	۱۹/۵۵	۲۱۰/۸	۷۶/۸۵	۹۹۸/۳	۳۰۵/۱	۱۳/۸۸	۵/۹۹	۴/۴۴	۲/۲۰	۱/۹۱	۱۳/۴۲
توربین ۶	۱۹/۷۴	۱۰/۰۰	۷۷/۵۷	۲۹/۲۶	۳۰۵/۰	۱۱۱۹/۳	۵/۹۸	۳/۴۱	۲/۳۴	۱/۵۲	۱/۴۱	۱/۱۵
توربین ۷	۱۸۲/۷	۶۵/۶۶	۴۵/۷۹	۱۶/۵۷	۱۳/۸۳	۶/۰۸	۸۹۲/۸	۲۵/۸۰	۱۸۲/۶	۶۵/۳۲	۵۳/۸۶	۱۹/۴۴
توربین ۸	۶۶/۰۲	۲۴/۴۷	۱۶/۸۵	۷/۵۹	۶/۰۴	۳/۴۶	۲۵۸/۶	۱۲۲۲/۲	۶۵/۹۶	۲۴/۱۹	۱۹/۷۲	۱۰/۰۰
توربین ۹	۴۵/۷۸	۱۶/۶۷	۱۲/۵۸	۵/۰۰	۴/۲۶	۲/۲۷	۱۸۲/۵	۶۵/۵۷	۸۹۲/۶	۲۵۶/۵	۲۱۰/۵	۷۷/۲۲
توربین ۱۰	۱۶/۸۹	۷/۶۴	۵/۱۴	۲/۷۴	۲/۲۸	۱/۶۴	۶۵/۹۴	۲۴/۲۱	۲۵۸/۴	۱۱۲۶/۴	۷۷/۵۵	۲۹/۲۹
توربین ۱۱	۱۳/۸۸	۵/۹۹	۴/۳۷	۲/۳۴	۱/۹۸	۱/۴۶	۵۳/۹۹	۱۹/۵۵	۲۱۰/۸	۷۶/۸۷	۹۹۸/۳	۳۰۵/۱
توربین ۱۲	۵/۹۸	۳/۴۱	۲/۳۴	۱/۵۱	۱/۴۸	۱/۲۶	۱۹/۷۴	۱۰/۰۰	۷۷/۵۷	۲۹/۲۸	۳۰۵/۰	۱۱۱۹/۳

جدول (۱۲): اضافه‌ولتاژ پدیدآمده در ثانویه ترانسفورماتور اصلی برحسب کیلوولت. درایه  $V_{ij}$  (اضافه‌ولتاژ در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام) نشانگر آن است که مثلاً اگر صاعقه به توربین  $i$ ام برخورد کند، چه اضافه‌ولتاژهایی به توربین‌های  $i$ ام اعمال می‌شود ( $i=1,2,\dots,12$ ).

	توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵	توربین ۶	توربین ۷	توربین ۸	توربین ۹	توربین ۱۰	توربین ۱۱	توربین ۱۲
توربین ۱	۹۶۰/۵	۲۷۲/۲	۱۹۱/۳	۴۵/۹۵	۵۱/۷۴	۲۰/۹۵	۱۹۱/۴۶	۶۴/۸۸	۴۹/۶۲	۱۷/۸۲	۱۸/۹۴	-
توربین ۲	۲۷۲/۹	۱۲۰۸/۲	۶۵/۳۳	۲۶/۵۳	۲۰/۶۶	۱۳/۴۸	۶۵/۴۱	۲۶/۷۷	۱۷/۹۴	-	-	-
توربین ۳	۱۹/۱۵	۶۴/۹۶	۹۶۰/۴	۲۷۰/۲	۲۲۱/۵	۷۶/۹۹	۴۹/۴۷	۱۷/۶۵	۱۷/۳۴	-	-	-
توربین ۴	۶۵/۴۸	۲۶/۵۸	۲۷۲/۸	۱۲۰۴/۹	۷۷/۹۲	۳۲/۷۰	۱۷/۹۲	-	-	-	-	-
توربین ۵	۵۱/۲۵	۲۰/۶۴	۲۲۱/۹	۷۷/۰۴	۱۰۷۴/۴	۳۲۱/۹	۱۸/۸۰	-	-	-	-	-
توربین ۶	۲۰/۵۸	۱۳/۳۰	۷۸/۰۲	۳۲/۳۶	۳۲۳/۲	۱۲۰۴/۳	-	-	-	-	-	-
توربین ۷	۱۹۱/۶	۶۴/۹۲	۴۹/۵۷	۱۷/۷۹	۱۸/۹۲	-	۹۶۰/۶	۲۷۲/۲	۱۹۱/۴	۶۴/۴۲	۵۱/۷۱	۲۰/۹۱
توربین ۸	۶۵/۴۴	۲۶/۷۳	۱۷/۹۱	-	-	-	۲۷۲/۹	۱۲۰۸/۳	۶۵/۳۶	۲۶/۵۲	۲۰/۶۵	۱۳/۴۵
توربین ۹	۴۹/۵۰	۱۷/۶۸	۱۷/۳۶	-	-	-	۱۹۱/۴	۶۴/۹۴	۹۶۰/۴	۲۷۰/۲	۲۲۱/۵	۷۶/۹۷
توربین ۱۰	۱۷/۹۴	-	-	-	-	-	۶۵/۴۵	۲۶/۵۹	۲۷۲/۸	۱۲۰۴/۸	۷۷/۸۹	۲۵/۸۹
توربین ۱۱	۱۸/۸۹	-	-	-	-	-	۵۲/۵۵	۲۰/۷۴	۲۲۱/۸	۷۶/۹۵	۱۰۷۴/۳	۳۲۱/۸
توربین ۱۲	-	-	-	-	-	-	۲۰/۶۵	۱۳/۳۵	۷۷/۹۴	۳۲/۴۴	۳۲۳/۰	۱۲۰۴/۲

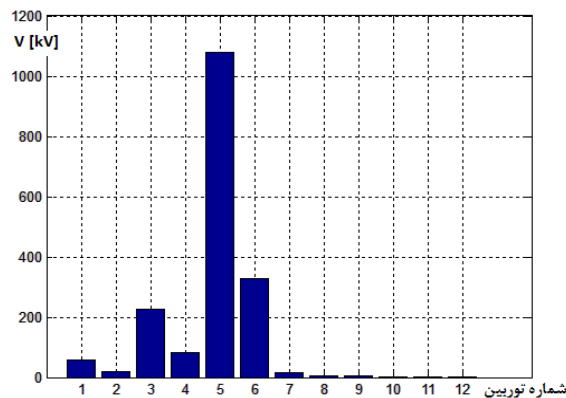
برای نمونه، نمودار ستونی اضافه‌ولتاژ توزیع‌شده روی توربین‌های شماره (۵) و شماره (۱۱) به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.

نتیجه نمی‌تواند اثبات کند که به تمامی توربین‌های پیکربندی خطی اضافه‌ولتاژ کمتری نسبت به سه پیکربندی دیگر اعمال می‌شود. بالعکس، با توجه به اینکه ضریب تغییرات در پیکربندی خطی از سایر پیکربندی‌ها بالاتر است، می‌توان فهمید که در این مزرعه بادی، بعضی از توربین‌ها اضافه‌ولتاژ بسیار زیادی را متحمل می‌شوند و بعضی دیگر اصلاً در معرض اعمال اضافه‌ولتاژ قرار ندارند یا اضافه‌ولتاژ اعمالی به آن‌ها قابل چشم پوشی است. این موضوع حاکی از آن است که توربین‌های این نوع پیکربندی آسیب‌پذیرتر از سایر پیکربندی‌ها می‌باشند. در جامعه آماری به‌دست‌آمده از پیکربندی خطی، توزیع داده‌ها (اضافه‌ولتاژها) بسیار نایک‌نواخت است. بیشترین اضافه‌ولتاژ ولتاژ پدیدآمده در پیکربندی خطی ۱۱۲۱ کیلوولت، کمترین میزان اضافه‌ولتاژ مقدار صفر و میانگین اضافه‌ولتاژهای اعمال‌شده ناشی از برخورد مستقیم صاعقه (میانگین قطر اصلی جدول (۱)) ۱۰۷۱ کیلوولت‌اند.

در پیکربندی ستاره‌ای میانگین اعمال اضافه‌ولتاژها به توربین‌های این مزرعه بادی از سایر پیکربندی‌ها بالاتر است. لذا در برخورد صاعقه به این پیکربندی، برای اینکه توربین‌ها آسیب زیادی نبینند، باید عایق‌بندی را بهبود بخشید. ضریب تغییرات آن نسبت به سایر پیکربندی‌ها در رتبه دوم قرار دارد؛ یعنی توزیع اضافه‌ولتاژها در پیکربندی ستاره‌ای تنها از پیکربندی خطی یکنواخت‌تر است. بیشترین اضافه‌ولتاژ ولتاژ پدیدآمده در پیکربندی ستاره‌ای ۱۰۸۰ کیلوولت، کمترین میزان اضافه‌ولتاژ ۳/۱۲ کیلوولت و میانگین اضافه‌ولتاژهای اعمال‌شده ناشی از برخورد مستقیم صاعقه (میانگین قطر اصلی جدول (۳)) ۱۰۷۹ کیلوولت‌اند.

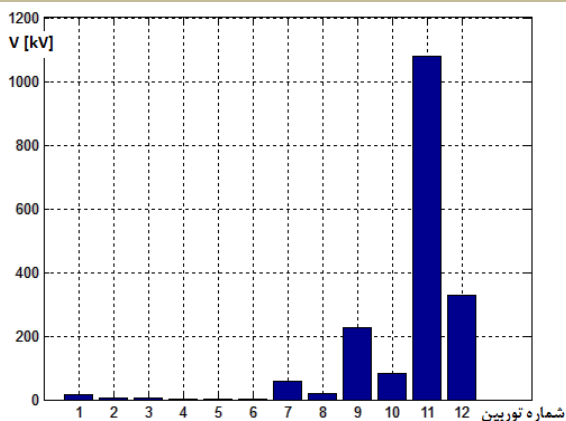
شاید پیکربندی مثلثی را بتوان نمونه‌ای از یک مزرعه بادی با قابلیت اعتماد بالاتری نسبت به سه پیکربندی دیگر در نظر گرفت، زیرا در این نمونه، با وجود اینکه میانگین اضافه‌ولتاژها از پیکربندی خطی بالاتر است، از دو پیکربندی دیگر پایین‌تر است. به‌علاوه ضریب تغییرات در این مزرعه بادی، از سایر پیکربندی‌ها کمتر است. این موضوع نشان می‌دهد که تقریباً تمامی توربین‌ها به‌طور یکنواخت‌تری متحمل اضافه‌ولتاژ می‌شوند و آسیب‌پذیری توربین‌ها در این پیکربندی به حداقل خود رسیده است. بیشترین اضافه‌ولتاژ ولتاژ پدید آمده در پیکربندی مثلثی ۱۰۸۱ کیلوولت، کمترین میزان اضافه‌ولتاژ ۰/۸۶ کیلوولت و میانگین اضافه‌ولتاژهای اعمال‌شده ناشی از برخورد مستقیم صاعقه (میانگین قطر اصلی جدول (۷)) ۱۰۲۳ کیلوولت‌اند.

در پیکربندی شاخه‌ای که میانگین و ضریب تغییرات نسبتاً بالایی نسبت به سایر پیکربندی‌ها مشاهده می‌شود، هم توربین‌ها اضافه‌ولتاژ زیادی را متحمل می‌شوند و هم توزیع اضافه‌ولتاژ روی آن‌ها نایک‌نواخت‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که در پیکربندی شاخه‌ای،



شکل (۱۴): نمودار ستونی توزیع اضافه‌ولتاژها در برخورد صاعقه با

توربین شماره پنج



شکل (۱۵): نمودار ستونی توزیع اضافه‌ولتاژها در برخورد صاعقه با

توربین شماره یازده

تمامی این نتایج با [۱۶] و [۱۷] نیز سازگار است.

## ۷. تحلیل نتایج با استفاده از شاخص‌های پراکندگی آماری

شاخص‌های آماری یک دسته از بهترین ابزارها برای تحلیل نتایج عددی به‌شمار می‌روند. در این مقاله نیز به‌منظور درک بهتر از مقادیر به‌دست‌آمده از اضافه‌ولتاژها در مزارع بادی، از شاخص‌های آماری کمک گرفته می‌شود. حال می‌توان اضافه‌ولتاژهای پدیدآمده در مزرعه بادی مورد نظر با پیکربندی‌های مختلف را با استفاده از جدول (۱۳) ارزیابی کرد. به‌دلیل اینکه روند توزیع اضافه‌ولتاژها در هر نقطه خاص نمونه خاص از یک مزرعه بادی معین، تقریباً یکسان است، بنابراین در این جدول فقط اضافه‌ولتاژ اعمال‌شده به ژنراتور توربین بادی (نقطه  $m_2$ ) تحلیل می‌گردد. برای نقاط دیگر، تحلیل و ارزیابی به روش مشابه صورت می‌پذیرد.

میانگین اضافه‌ولتاژ اعمال‌شده به توربین‌های بادی در پیکربندی خطی از سایر پیکربندی‌ها کمتر است. بنابراین در مجموع، توربین‌های بادی در پیکربندی خطی، اضافه‌ولتاژ کمتری را متحمل می‌شوند. اما این

- با استفاده از روش برازش برداری در این مقاله، با  $3/68$  درصد خطا سیستم زمین واقعی در نرم افزار EMTP با مقادیر RLC مدل گردید.
- با اتصال برق گیر به سیستم زمین واقعی به جای اتصال آن به سیستم زمین ایده آل، اضافه ولتاژ از  $6/9$  کیلوولت به  $4/4$  کیلوولت افزایش می یابد.
- در آسیب های مستقیم صاعقه، خطر آسیب دیدگی توربین های بادی در پیکربندی شاخه ای به ترتیب  $3/2$  درصد،  $2/5$  درصد و  $7/5$  درصد از پیکربندی های خطی، ستاره ای و مثلثی بیشتر است.
- در آسیب های مستقیم صاعقه، خطر آسیب دیدگی توربین های بادی در پیکربندی مثلثی به ترتیب  $4/6$  درصد،  $5/4$  درصد و  $8/2$  درصد از پیکربندی های خطی، ستاره ای و شاخه ای کمتر است؛
- با تقسیم توربین های بادی به دسته های کوچک تر و سپس تشکیل مزرعه بادی با اتصال معین این دسته به هم، می توان ضریب تغییرات توزیع اضافه ولتاژها را بهبود بخشید.

### ۸. نتیجه گیری

در مزرعه بادی مورد مطالعه به منظور قابلیت اطمینان بیشتر و در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، به هر توربین بادی یک برق گیر مجزا اختصاص داده شده است. سپس پدیده صاعقه با استفاده از مدل CIGRE مانند یک منبع جریان مدل می گردد و به پره های تمامی توربین های بادی برخورد می کند. این عمل همان شبیه سازی اضافه ولتاژ پدید آمده از آسیب های مستقیم نام دارد. پس از آن، یک سیستم زمین واقعی، به عنوان سیستم زمین به هر توربین بادی اختصاص داده می شود و با اتصال معینی از زیر خاک به یکدیگر متصل می شوند. اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه به صورت جامع و کاملی در چهار پیکربندی متداول در مزارع بادی تحلیل و ارزیابی می شوند. پرواضح است که تغییر پیکربندی مهم ترین عامل در توزیع اضافه ولتاژها می باشد. در پیکربندی های فوق، یکی از فاکتور مهم شایستگی پیکربندی، ضریب تغییرات است که در واقع نایکخواختی توزیع اضافه ولتاژها را روی توربین ها نشان می دهد. با تقسیم توربین های بادی به دسته های کوچک تر و سپس تشکیل مزرعه بادی با اتصال معین این دسته به هم، می توان ضریب تغییرات توزیع اضافه ولتاژها را بهبود بخشید. با بررسی سایر فاکتورها می توان یک پیکربندی مناسب جهت تحمل ماکزیمم استرس عایقی ممکن انتخاب کرد. بدین منظور و برای ادامه کار، می توان یک پیکربندی بهینه براساس مینیمم کردن استرس ولتاژ روی توربین ها و طبق روش مونت کارلو

- به توربین هایی که صاعقه به آنها برخورد نکرده است، اضافه ولتاژ بیشتری اعمال می شود. لذا توربین ها بیشتر در معرض آسیب دیدگی قرار دارند. بیشترین اضافه ولتاژ ولتاژ پدید آمده در پیکربندی شاخه ای  $1213$  کیلوولت، کمترین میزان اضافه ولتاژ  $1/12$  کیلوولت و میانگین اضافه ولتاژهای اعمال شده ناشی از برخورد مستقیم صاعقه (میانگین قطر اصلی جدول ۱۰)  $1107$  کیلوولت اند.

جدول (۱۳): ارزیابی اضافه ولتاژ صاعقه با استفاده از شاخص های

#### پراکندگی

شاخص های پراکندگی / نوع پیکربندی	میانگین [kV]	واریانس [kV] <sup>2</sup>	انحراف معیار [kV]	ضریب تغییرات
پیکربندی خطی	140/64	77773	278/878	1/98
پیکربندی ستاره ای	155/01	86443	264/011	1/89
پیکربندی مثلثی	147/71	75544	274/852	1/86
پیکربندی شاخه ای	152/01	88367	297/256	1/95

مهم ترین نتایجی که در این مقاله به منظور مطالعه جامع و کامل اضافه ولتاژها در مزارع بادی حاصل شده، عبارت اند از:

- نوع پیکربندی مزارع بادی تأثیر بسزایی در توزیع اضافه ولتاژهای اعمال شده ناشی از صاعقه بر مزارع بادی می گذارد، به طوری که میانگین اضافه ولتاژهای اعمال شده به توربین های بادی در پیکربندی های خطی، ستاره ای، مثلثی و شاخه ای به ترتیب  $140$ ،  $155$  و  $147$  کیلوولت است.
- میزان امپدانس و مقاومت زمین یکی از عوامل مهم در تحلیل اضافه ولتاژها برای حالات گذرای الکترومغناطیسی است، به طوری که اگر مقدار آن کمتر مقادیر ارائه شده در استانداردها نباشد، اندازه اضافه ولتاژ پدید آمده می تواند تا  $2$  برابر یا بیشتر افزایش یابد.
- اگر در شبیه سازی ها از سه پره به جای یک پره در مدل سازی توربین بادی استفاده شود، اضافه ولتاژها به میزان  $29/1$  درصد کاهش می یابند.

پیشنهاد کرد. استفاده از توابع چندهدفه به منظور دستیابی به نقطه کار بهینه در راستای هماهنگی عایقی بر مبنای امپدانس زمین موجود نیز می‌تواند ادامه راه پژوهشگران آینده باشد.

## مراجع

- [1] Visacro, S., Silveira, F.H., "Lightning Performance of Transmission Lines: Methodology to Design Grounding Electrodes to Ensure an Expected Outage Rate," Power Delivery, IEEE Transactions on , Vol.30, No.1, pp.237,245, Feb. 2015.
- [2] IEC International Standard. Lightning protection. IEC 61400-61424. In: Wind Turbine Generation System, Vol. 24. Geneva: International Electro-technical Commission; 2010.
- [3] Visacro, S., Silveira, F.H., R. Alipio,; De Conti, A., "Lightning-Induced Voltages Over Lossy Ground: The Effect of Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil," Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on , Vol.56, No.5, pp.1129,1136, Oct. 2014.
- [4] Hooshyar, A., Azzouz, M.A., El-Saadany, E.F., "Distance Protection of Lines Connected to Induction Generator-Based Wind Farms During Balanced Faults," Sustainable Energy, IEEE Transactions on , Vol.5, No.4, pp.1193,1203, Oct. 2014.
- [5] Hoerauf, R., "Considerations in Wind Farm Grounding Designs," Industry Applications, IEEE Transactions on , Vol.50, No.2, pp.1348,1355, March-April 2014.
- [6] Badrzadeh, B., Zamastil, M. H., N. K., "Transients in Wind Power Plants – Part I: Modelling Methodology and Validation," Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 48, No. 2, pp. 794-807, 2012.
- [7] Badrzadeh, B., Zamastil, M. H., Singh, N. K., "Transients in Wind Power Plants – Part II: Case Studies," Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 48, No. 5, pp. 1628-1638, 2012.
- [8] He, L., Chen-Ching, L., Pitto, A., Cirio, D., "Distance Protection of AC Grid With HVDC-Connected Offshore Wind Generators," Power Delivery, IEEE Transactions on , Vol.29, No.2, pp.493,501, April 2014.
- [9] Malcolm N., Aggarwal R. K.. "Transient Overvoltage Study of an Island Wind Farm." In Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International, pp. 1-6. IEEE, 2012.
- [10] Jinliang, H., Gao, Y., Zeng, R., Zou, J., Liang, X., Zhang, B., Lee, J., Chang, S.. "Effective Length of Counterpoise Wire Under Lightning Current." Power Delivery, IEEE Transactions on 20, No. 2, pp: 1585-1591, 2005.
- [11] Yasuda, Y., Uno, N., Kobayashi, H., Funabashi, T., "Surge Analysis on Wind Farm When Winter Lightning Strikes." Energy Conversion, IEEE Transactions on 23, No. 1, pp. 257-262, 2008.
- [12] Petar, S., Ranko, G., "An EMTF Model for Lightning Surge Analysis of Wind Farms", International Review on Modelling & Simulations, Vol. 3, issue 1, pp. 70-81, 2010.
- [13] Rodrigues, R. B., Mendes, V. M. F., Catalao, J. P. S., "Protection of Wind Energy Systems Against the Indirect Effects of Lightning", Renewable Energy, Elsevier, Vol. 36, Issue. 11, pp. 2888-2896, 2011.
- [14] Rodrigues, R.B., Mendes, V.M.F., Catalao, J.P.S., "Electromagnetic Transients Study due to Lightning Strikes on Two Interconnected Wind Turbines", Industrial Applications, IEEE Transactions on, No. 978-1-4673-0784, pp. 1103-1106, 2012.
- [15] Mahmoudian M., Gholami A., Sadrpour S.M., Arekhi A., "Transient Analysis of Grounding System in a Wind Farm Based on Antenna Theory Using Fast Relaxed Vector Fitting Method", 29<sup>th</sup> PSC Conference, Iran, 1393.
- [16] Martinez, J. A., "Power System Transients, Parameter Determination", CRC Press, 2010.
- [17] Kuffel, J., Kuffel, E., Zaengl, W. S., "High voltage engineering fundamentals", (2000). Newnes Press. 2000.