



Semnan University



Research Article

## Wind farm Collector Cable Network Protection against Direct Lightning Strokes

Saeed Shirmohamadi <sup>a,\*</sup>, Reza Shariatinasab <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

### PAPER INFO

#### Paper history:

Received: 2023-05-06

Revised: 2024-06-17

Accepted: 2024-08-28

#### Keywords:

Wind farm;  
Collector cable network;  
Direct lightning strokes;  
Cable sheath bonding.

### ABSTRACT

Wind farms are often located in regions with high keraunic levels. The high rate of lightning occurrence together with the high resistance of the soil can negatively affect wind farms or individual wind turbines. Therefore, a proper protection system against direct lightning strokes is essential for wind farms. In this paper, by modeling the wind farm in EMTP software, the protection of the collector cable network of wind farms against direct lightning strokes is investigated. To do that, the metallic sheath of the Collector cable and sheath bonding are modeled in the EMTP environment, and the overvoltages on the collector cable caused by direct lightning strokes to wind turbines are calculated. Also, different topologies of wind farms are considered to determine the effect of wind turbine arrangements on lightning protection of collector cables. To this aim, the best method to protect against direct lightning strokes is selected by implementing different sheath bonding methods in collector cables. Then, various sheath grounding methods and grounding systems are examined. Finally, the proper protection scheme to protect the wind farm collector cable against direct lightning strokes is proposed owing to the wind turbine topology.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.30565.2447>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address: [shirmohamadi@birjand.ac.ir](mailto:shirmohamadi@birjand.ac.ir)

### How to cite this article:

Shirmohamadi, S. and Shariatinasab, R. (2025). Wind farm Collector Cable Network Protection against Direct Lightning Strokes. Journal of Modeling in Engineering, 23(Special Issue 81), 91-108. doi: 10.22075/jme.2024.30565.2447

## حفاظت شبکه کابلی مزارع بادی در برابر ضربات مستقیم صاعقه

سعید شیرمحمدی<sup>۱\*</sup>، رضا شریعتی نسب<sup>۱</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
مزرعه بادی، شبکه کابلی، ضربات مستقیم صاعقه، پیوند زدن غلاف کابل.	مزارع بادی عموماً در مناطق با سطح کرونیک بالا احداث می‌گردند. نرخ بالای وقوع صاعقه به همراه مقاومت بالای خاک، می‌تواند تاثیر منفی روی عملکرد انفرادی و گروهی توربین‌های بادی داشته باشد؛ از این رو سیستم حفاظتی مناسب در برابر ضربات مستقیم صاعقه برای مزرعه بادی ضروری است. در این مقاله، با مدل‌سازی مزرعه بادی در نرم‌افزار EMTP حفاظت شبکه کابلی مزارع بادی در برابر ضربات مستقیم صاعقه بررسی می‌گردد. در مدل‌سازی شبکه کابلی مزرعه بادی، هادی‌های غلاف و پیوند بین آن‌ها در نظر گرفته شده و اضافه‌ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم صاعقه در نقاط مختلف محاسبه می‌شود. همچنین آرایش‌های مختلف مزارع بادی مطالعه می‌شود تا تاثیر آرایش توربین‌ها در حفاظت شبکه کابلی مزرعه بادی تعیین گردد. به این منظور در اولین مرحله، با اجرای روش‌های مختلف پیوند غلاف در شبکه کابلی، روش مناسب پیوند غلاف جهت حفاظت در برابر ضربات صاعقه انتخاب شده و سپس، روش‌های مختلف زمین کردن غلاف و سیستم زمین بررسی می‌گردد. در پایان با ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، طرح مناسب حفاظتی در برابر ضربات مستقیم صاعقه برای هر مزرعه بادی با آرایش خاص پیشنهاد شده است.
DOI: <a href="https://doi.org/10.22075/jme.2024.30565.2447">https://doi.org/10.22075/jme.2024.30565.2447</a>	
© 2025 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> )	

## ۱- مقدمه

مزارع بادی نقش مهمی در تولید انرژی تجدیدپذیر در سراسر جهان پیدا کرده‌اند. مزارع بادی مدرن در سطوح ولتاژی فشارمتوسط و در ناحیه‌هایی با مساحت چند ده کیلومتر مربع احداث می‌گردند [۱]. معمولاً مناطقی با سطح ارتفاع بالا که انرژی باد قابل ملاحظه است، برای احداث مزارع بادی انتخاب می‌شود. این مناطق عموماً دارای سطح کرونیک بالا و در بعضی موارد مقاومت بالای خاک نیز می‌باشند [۲]. با توجه به این موضوع که توربین‌های بادی ارتفاع بالایی دارند، اغلب مورد برخورد صاعقه قرار می‌گیرند. بنابراین نرخ وقوع بالای صاعقه در کنار مقاومت بالای خاک،

می‌تواند تاثیر منفی روی عملکرد انفرادی و گروهی توربین‌های بادی داشته باشد [۲-۳]. اصابت صاعقه به مزارع بادی مطابق شکل (۱) می‌تواند به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم رخ دهد [۴]. در برخورد مستقیم، صاعقه به پره‌ها یا برج بادی و در برخورد غیرمستقیم، به زمین مجاور توربین بادی اصابت می‌کند. به دلیل ارتفاع بالا، توربین‌های بادی بیشتر مستعد برخورد مستقیم هستند و تنها درصد بسیار پایینی از صاعقه‌های برخوردی در مزارع بادی از نوع غیرمستقیم است [۵]. بنابراین در طراحی سیستم حفاظتی صاعقه در مزارع بادی، عمدتاً ضربات مستقیم صاعقه اهمیت دارند و طراحی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shirmohamadi@birjand.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

استناد به این مقاله:

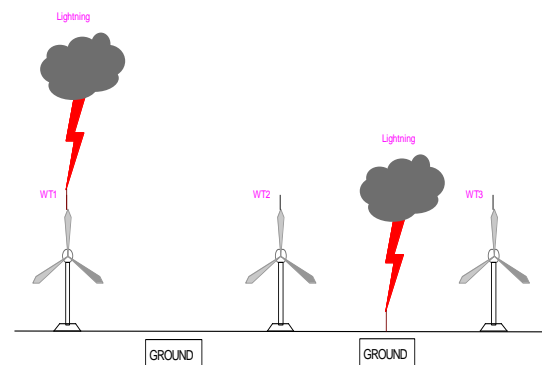
شیرمحمدی، سعید و شریعتی نسب، رضا. (۱۴۰۴). حفاظت شبکه کابلی مزارع بادی در برابر ضربات مستقیم صاعقه. مدل سازی در مهندسی، ۲۳(شماره ویژه ۸۱)، ۹۱-

doi: 10.22075/jme.2024.30565.2447 .۱۰۸

رخ خواهد داد. آلپیو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۰] افزایش پتانسیل زمین در مزارع بادی به دلیل برخورد صاعقه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظرگیری تعداد مختلف از سیستم زمین به هم پیوسته و مقاومت خاک یک مدل باند پهن برای سیستم زمین مزارع بادی در حوزه زمان ارائه دادند. ریزک<sup>۷</sup> و همکاران [۱۱] میدان‌های الکترومغناطیسی القایی روی شبکه کابلی مزرعه بادی ناشی از برخورد صاعقه به برج توربین بادی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داده که وجود برج بادی باعث افزایش قابل ملاحظه میدان‌های الکترومغناطیسی القایی روی غلاف کابل خصوصا در فواصل نزدیک بین برج توربین بادی و شبکه کابلی می‌شود. سکویکا<sup>۸</sup> و همکاران [۱۲،۵] اضافه‌ولتاژهای ناشی از ضربات مستقیم صاعقه به توربین روی شبکه کابلی و تاثیر زمین کردن غلاف فلزی را بررسی کرده‌اند. او همچنین با شبیه‌سازی اصابت مستقیم صاعقه به توربین مزرعه بادی در EMTP، تاثیر پارامترهایی چون روش زمین کردن غلاف فلزی شبکه کابلی و جریان صاعقه را روی اضافه‌ولتاژهای ایجاد شده در پست افزایشنده مزرعه بادی بررسی نموده است. نتایج او نشان داد که وضعیت غلاف فلزی شبکه کابلی مزرعه بادی تاثیر مهمی بر روی اضافه‌ولتاژهای صاعقه در پست افزایشنده مزرعه دارد.

با توجه به ماهیت شبکه‌های کابلی زیرزمینی هرگونه بروز خطای عایقی در این شبکه‌ها منجر به خسارات اقتصادی و فنی زیادی می‌شود. در مراجع [۱۲،۱۱،۱۰،۹] فقط در مورد آسیب و اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه کابلی بحث شده و در مورد نحوه حفاظت شبکه کابلی در برابر صاعقه موارد خاصی ذکر نشده است. مرجع [۵] نیز صرفا به بررسی وضعیت غلاف فلزی شبکه کابلی نسبت به زمین (متصل به زمین یا ایزوله بودن از آن) و تاثیر آن روی اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه پرداخته است. در مقاله حال حاضر نحوه حفاظت شبکه کابلی مزرعه بادی در برابر ضربات مستقیم صاعقه برای مزارع بادی با آرایش‌های مختلف بدون ایجاد تلفات توان مورد بحث قرار گرفته است. شبکه‌های کابلی دارای ساختار متفاوتی نسبت به خطوط هوایی می‌باشند که بررسی حالات گذرا و همچنین حفاظت آن‌ها در برابر صاعقه را از خطوط هوایی متمایز می‌کند [۱۴]. به دلیل ساختار

سیستم حفاظتی بر مبنای آن انجام می‌شود. در این مقاله نیز برخورد مستقیم صاعقه به توربین بادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

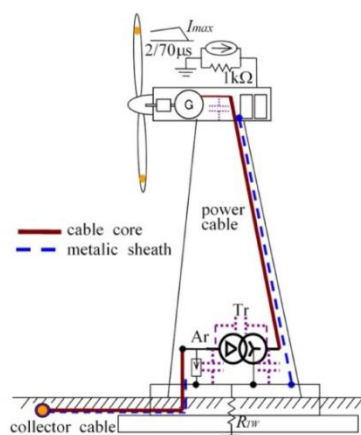


شکل ۱- وقوع پدیده صاعقه در مزرعه بادی

در گذشته تحقیقات زیادی در زمینه تنش‌های ولتاژی ناشی از صاعقه در مزارع بادی انجام شده است. به عنوان مثال، آسودا<sup>۲</sup> و همکاران [۶] با شبیه‌سازی مزرعه بادی، انتشار موج ضربه صاعقه در آن را بررسی کرده‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن مقادیر مختلف امپدانس ضربه زمین، نتیجه گرفتند که انتشار امواج سیار ناشی از صاعقه در مزرعه بادی می‌تواند اضافه‌ولتاژهای خطرناکی حتی دور از محل توربین مورد اصابت ایجاد کند که باعث آسیب‌های جدی در بخش‌های الکتریکی و الکترونیکی می‌گردد. رادیسویچ<sup>۳</sup> و همکاران [۷] تاثیر چرخش پره‌های توربین روی رفتار صاعقه برخوردی به توربین را در یک آزمایشگاه فشارقوی مطالعه و روش حفاظت از پره‌ها را بر مبنای نتایج آزمایشات خود ارائه کردند. اوکار<sup>۴</sup> و همکاران [۸] نیز رفتار گذرای سیستم زمین مزرعه بادی را مطالعه کرده و با در نظر گرفتن انواع سیستم‌های زمین از نقطه نظر عمق، هندسه، فاصله و پیوستگی بین یکدیگر، تاثیر حالات مختلف روی اضافه‌ولتاژهای گذرا را بررسی و بهترین سیستم زمین جهت حفاظت در برابر اضافه‌ولتاژهای صاعقه را انتخاب کردند. سکی<sup>۵</sup> و همکاران [۹] مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی به وجود آمدن جرقه در شبکه کابلی مزارع بادی به واسطه برخورد صاعقه به توربین‌ها انجام داده‌اند. مطالعه آن‌ها نشان داد هنگامی که پتانسیل زمین در مجاورت توربین محل برخورد صاعقه افزایش می‌یابد بین غلاف و عایق کابل جرقه

<sup>6</sup> Alipio  
<sup>7</sup> Rizk  
<sup>8</sup> Sekioka

<sup>2</sup> Asuda  
<sup>3</sup> Radičević  
<sup>4</sup> Ukar  
<sup>5</sup> Seki



شکل ۲- سیستم تولید توان بادی [۵]

جدول ۱- مشخصات ژنراتور و ترانسفورماتور [۵]

نوع اتصال ترانسفورماتور	ستاره - مثلث (Y-D)
توان نامی ژنراتور	1.5 MVA
ولتاژ نامی ترانسفورماتور	0.69/22 kV
فرکانس نامی	60 HZ
امپدانس درصدی ترانسفورماتور	6%

## ۲-۱- برج توربین بادی

چون جریان صاعقه از طریق بدنه برج به سمت زمین جاری می‌شود، بایستی مدل برج بادی وابسته به فرکانس باشد [۱۳]. بنابراین برای مدل‌سازی برج از مدل یک خط وابسته به فرکانس با پارامترهای توزیع شده و امپدانس ضربه ثابت که از رابطه (۱) به دست می‌آید، استفاده می‌شود [۱۹].

$$Z_s = 60 \ln \frac{H}{e \cdot r_{tower}} \quad (1)$$

که در آن  $H$  ارتفاع برج بادی،  $e$  عدد نپر و  $r_{tower}$  شعاع متوسط برج بادی است که نحوه محاسبه آن در [۲۰] ذکر شده است.

## ۲-۲- برقگیر

برقگیر استفاده شده در مزرعه بادی از نوع اکسید فلزی است. این نوع برقگیر دارای مشخصه دینامیکی بوده که بایستی در بررسی پدیده‌های با زمان پیشانی کوتاه، مانند صاعقه مورد توجه قرار گیرد. بنابراین برای مدل‌سازی برقگیر از مدل وابسته به فرکانس پیشنهاد داده شده توسط IEEE مطابق شکل (۳) استفاده می‌شود [۲۲، ۲۱].

متمایز و ماهیت دومسیره بودن انتشار موج سیار در کابل‌ها، بایستی در بررسی رفتار گذرای صاعقه در کابل، غلاف فلزی نیز در مدل‌سازی لحاظ گردد. در این مقاله با بررسی پارامترهای تاثیرگذار در سیستم حفاظت شبکه کابلی از جمله آرایش توربین‌ها، نوع پیوند غلاف، نوع سیستم زمین و مقاومت آن، حفاظت شبکه کابلی مزرعه‌های بادی با آرایش مختلف در برابر صاعقه بدون ایجاد تلفات توان مطرح می‌شود. بدین منظور در اولین مرحله، مدل‌سازی مزرعه بادی در نرم‌افزار EMTP به صورت وابسته به فرکانس انجام می‌شود. در مدل‌سازی شبکه کابلی مزرعه بادی، هادی‌های غلاف و پیوند بین آن‌ها در نظر گرفته شده و اضافه‌ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم صاعقه در نقاط مختلف محاسبه می‌شود. همچنین آرایش‌های مختلف مزارع بادی، روش‌های مختلف پیوند زدن غلاف فلزی شبکه کابلی و زمین کردن غلاف و سیستم زمین مطالعه می‌شود تا پارامترهای تاثیرگذار در اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه و نحوه حفاظت شبکه کابلی مزرعه بادی تعیین گردد. همچنین تعیین فاصله مناسب بین توربین‌ها در مزرعه بادی با در نظر گرفتن روش پیوند غلاف فلزی انجام می‌شود. در پایان نیز با ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، طرح مناسب حفاظتی در برابر ضربات مستقیم صاعقه برای هر مزرعه بادی با آرایش خاص پیشنهاد شده است.

## ۲- مدلسازی وابسته به فرکانس مزرعه بادی

مزرعه بادی دارای سیستم الکتریکی پیچیده و اجزای مختلفی است که به منظور مطالعه تنش‌های ولتاژی ناشی از صاعقه هر کدام از آن‌ها بایستی به صورت مناسب در بازه فرکانسی صاعقه مدل‌سازی شوند [۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸]. علاوه بر این، مدل‌سازی برخی از بخش‌ها به اطلاعاتی نیاز دارد که تنها از طریق سازنده آن قابل دستیابی بوده و بعضی اجزای دیگر مانند سیستم زمین نیز دارای پیچیدگی زیاد در مدل‌سازی می‌باشد. شکل (۲) بخش‌های مختلف سیستم تولید توان بادی که بایستی برای محاسبه اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه در نرم‌افزار EMTP مدل‌سازی شود را نشان می‌دهد [۵]. مشخصات ژنراتور و ترانسفورماتور مورد استفاده در مزرعه بادی نیز در جدول ۱ ذکر شده است. در ادامه جزئیات مربوط به هر بخش بیان می‌شود.

کانال صاعقه نیز که به صورت موازی با منبع جریان صاعقه قرار می‌گیرد،  $1 \text{ k}\Omega$  در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات موج صاعقه

پیک موج جریان صاعقه (kA)	زمان پیشانی موج ( $\mu\text{s}$ )	زمان دنباله پشت موج ( $\mu\text{s}$ )	پارامترهای موج جریان صاعقه
۴۲	۳	۷۰	مقدار

### ۲-۶- سیستم زمین

رفتار گذرای سیستم زمین تحت تأثیر رفتار غیرخطی وابسته به زمان ناشی از یونیزاسیون خاک و اثرات وابسته به فرکانس پارامترهای الکتریکی خاک در خلال تخلیه جریان صاعقه می‌باشد [۲۷]. پس از برخورد صاعقه به توربین، جریان از طریق بدنه برج به سمت زمین جاری می‌شود. در نتیجه، مقاومت زمین از حالت خطی خارج شده و متناسب با مقدار جریان تغییر می‌کند. مقاومت متغیر الکتروود زمین از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$R_T = R_0 / \sqrt{1 + \frac{I}{I_g}} \quad (2)$$

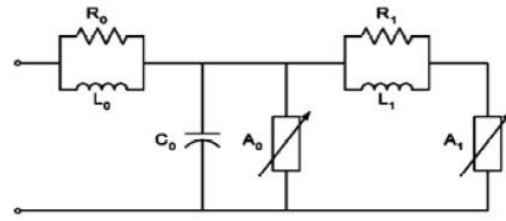
که  $R_0$  مقاومت زمین در جریان های کمتر از  $I_g$  و  $I$  مقدار جریان جاری شده به سمت سیستم زمین می باشد.  $I_g$  از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_0^2} \quad (3)$$

که در آن  $E_0$  شدت میدان یونیزه شدن خاک و  $\rho$  مقاومت ویژه می‌باشد. مقاومت زمین در این مقاله  $R_0 = 16 \Omega$  و ثابت  $E_0 = 400 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$  و  $\rho = 75 \Omega \cdot \text{m}$  می‌باشد.

### ۳- آرایش و نحوه اتصال توربین‌ها در مزرعه بادی

مزرعه مورد مطالعه در این مقاله مطابق شکل (۵) شامل ۷ توربین بادی است که با آرایش سری و موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. توربین‌ها را به هر تعداد دلخواه می‌توان افزایش داد، اما با توجه به اینکه تأثیر صاعقه در توربین‌های دور از محل برخورد ناچیز است، برای بررسی اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه کابلی همین تعداد توربین کفایت می‌کند. فاصله توربین‌ها در هر دو آرایش ۲۱۷ متر است. در انتها نیز مزرعه بادی توسط یک ترانسفورماتور افزایشدهنده به شبکه قدرت متصل شده است.

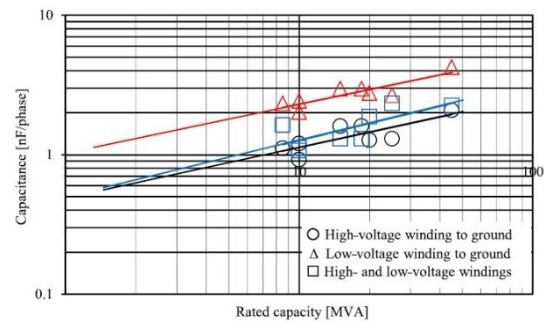


شکل ۳- مدل برقگیر IEEE

در این مدل برای نشان دادن رفتار غیرخطی برقگیر از دو مقاومت غیرخطی  $A_0$  و  $A_1$  استفاده گردیده که مشخصه ولتاژ-جریان آن‌ها در [۵] ارائه شده است.

### ۲-۳- ترانسفورماتور

برای مدل‌سازی ترانسفورماتور از یک مدل وابسته به فرکانس، شامل یک ترانسفورماتور معمولی برای فرکانس پایین و خازن‌هایی بین سیم‌پیچ‌ها برای فرکانس بالا استفاده می‌شود [۲۳]. شکل (۴) ظرفیت‌های خازنی بین بخش‌های مختلف را برای یک ترانسفورماتور Y-D نشان می‌دهد [۲۴]. با توجه به شکل (۴) برای یک ترانسفورماتور با ظرفیت ۱/۵ MVA، مقدار ظرفیت خازنی بین سیم‌پیچ فشارقوی و بدنه برج  $1/2 \text{ nF}$ ، بین سیم‌پیچ فشارضعیف و بدنه برج برابر  $560 \text{ pF}$  و بین سیم‌پیچ‌های فشارقوی و ضعیف  $580 \text{ pF}$  می‌باشد.



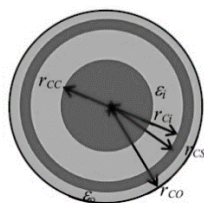
شکل ۴- ظرفیت‌های خازنی ترانسفورماتور [۲۴]

### ۲-۴- ژنراتور

در حالت گذرای صاعقه، مدل‌سازی ژنراتور با استفاده از خازن انجام می‌شود [۲۵]. در این مقاله برای مدل‌سازی ژنراتور سنکرون از خازن‌هایی با ظرفیت  $10 \text{ nF}$  که بین فازهای ژنراتور و بدنه برج بادی قرار گرفته‌اند، استفاده شده است [۵].

### ۲-۵- جریان صاعقه

جریان صاعقه با استفاده از مدل سیگره [۲۶] که پارامترهای آن در جدول ۲ ذکر شده، مدل‌سازی می‌شود. امپدانس



شکل ۷- سطح مقطع کابل استفاده شده در مزرعه بادی  
 $r_{CO} = 19.5 \text{ mm}, r_{CC} = 8.5 \text{ mm}, r_{CI} = 15.5 \text{ mm},$   
 $r_{CS} = 15.8 \text{ mm}, \epsilon_i = 2.3, \epsilon_r = 6$

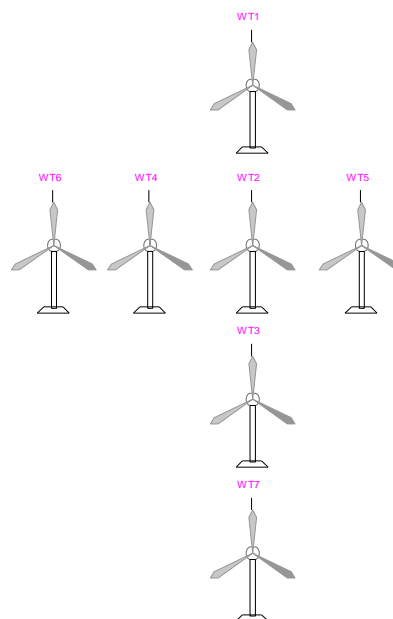
#### ۴- شبیه‌سازی و نتایج

طراحی یک سیستم حفاظتی برای شبکه کابلی مزرعه بادی شامل انتخاب روش پیوند زدن غلاف کابل، تعیین وضعیت غلاف نسبت به زمین (متصل یا ایزوله)، روش اتصال به زمین، استفاده از محدودساز ولتاژ غلاف و سیستم زمین می‌باشد. روش پیوند زدن غلاف فلزی کابل روی اضافه-ولتاژهای ناشی از صاعقه تاثیرگذار است [۲۸]. در [۵] نشان داده شده که غلاف فلزی شبکه کابلی مزرعه بادی بایستی در تمامی نقاط انتهایی به زمین متصل گردد؛ به عبارت دیگر زمین کردن تنها یک طرف کابل جهت حفاظت در برابر صاعقه کافی نیست. با این وجود، اتصال تمام نقاط انتهایی غلاف فلزی به زمین باعث ایجاد تلفات حالت دائمی شده که در درازمدت خسارت اقتصادی به دنبال دارد.

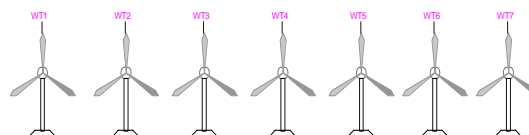
در این مقاله، با بررسی پارامترهای تاثیرگذار در سیستم حفاظت شبکه کابلی از جمله آرایش توربین‌ها، نوع پیوند غلاف، نوع سیستم زمین و مقاومت آن، حفاظت شبکه کابلی مزرعه بادی در برابر صاعقه بدون ایجاد تلفات توان مطرح می‌شود. بدین منظور در ابتدا در هر کدام از آرایش‌های مزرعه بادی، روش‌های مختلف پیوند زدن غلاف پیاده‌سازی و روش مناسب از نظر کاهش اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه برای هر مزرعه استخراج می‌گردد. سپس با محاسبه انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف و تنش ولتاژی ایجاد شده در آن‌ها، مشخصات مناسب محدودساز ولتاژ غلاف تعیین می‌گردد. در نهایت، روش‌های مختلف زمین کردن غلاف کابل و سیستم زمین بررسی و سیستم حفاظتی مناسب استخراج می‌گردد.

#### ۴-۱- پیوند زدن غلاف کابل و SVL

پیوند زدن غلاف کابل، بسته به شرایط می‌تواند در نقاط ابتدا، انتها یا بین مسیر کابل انجام شود. نقاط پیوند زده شده می‌تواند به زمین متصل یا از آن ایزوله باشد. در این بخش روش‌های مختلف پیوند زدن غلاف کابل که قابلیت اجرا در



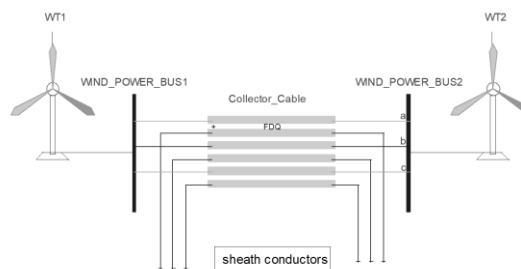
الف) مزرعه بادی با آرایش موازی



ب) مزرعه با آرایش سری

شکل ۵- آرایش توربین‌ها در مزرعه بادی

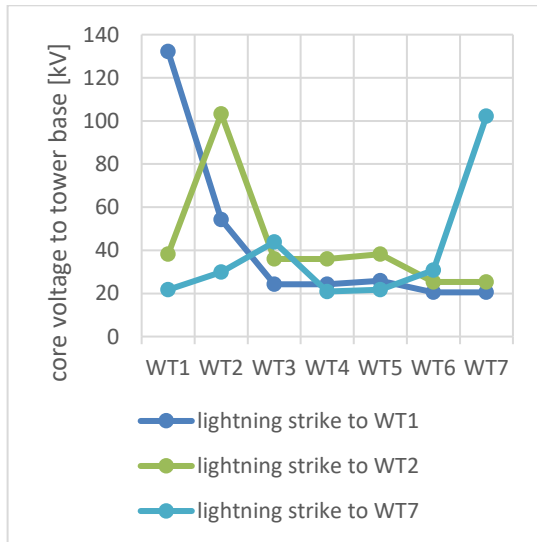
نحوه اتصال توربین‌ها در مزرعه بادی نیز مطابق شکل (۶) می‌باشد که در آن اتصال هر توربین با توربین مجاور توسط یک کابل فشارم متوسط XLPE ساخت شرکت Nexans با مشخصات  $200 \text{ mm}^2 \text{ CVT } 22 \text{ kV}$  و  $144 \text{ kV BIL}$  صورت گرفته که در عمق  $0.6$  متری از سطح زمین دفن شده است. سطح مقطع و پارامترهای این کابل در شکل (۷) نشان داده شده است. در مدل‌سازی کابل در EMTP، ماتریس ادمیتانس و ماتریس تبدیل مودال به صورت وابسته به فرکانس محاسبه می‌شود. در این مدل، تاثیر پیوند غلاف در نظر گرفته شده و ثوابت موردنیاز برای مدل‌سازی کابل در مدهای انتشاری گوناگون محاسبه می‌گردد.



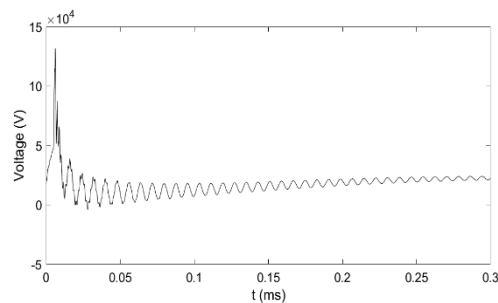
شکل ۶- نحوه اتصال توربین‌ها در مزرعه بادی

شبکه کابلی آن، نحوه اتصال غلاف کابل‌ها در مزرعه مطابق شکل (۸-ب) می‌باشد که در آن هر بلوک SVL متشکل از سه برقگیر می‌باشد.

شکل (۹) توزیع اضافه‌ولتاژ در شبکه کابلی مزرعه بادی موازی را به‌ازای اصابت مستقیم صاعقه به توربین‌های مختلف نشان می‌دهد. طبق نتایج، مقدار بیشینه اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در اثر برخورد صاعقه برابر با ۱۳۲ kV بوده که هنگام اصابت به توربین ۱ بوجود آمده است. شکل موج مربوط به این حالت در شکل (۱۰) ارائه شده است. این مقدار از BIL کابل کمتر است؛ با این وجود، مقدار ماکزیمم اضافه‌ولتاژ ایجاد شده بسیار نزدیک به BIL کابل بوده و حاشیه امنیت زیادی وجود ندارد. همچنین مشاهده می‌شود که هنگام اصابت صاعقه به توربین‌های بیرونی تنش ولتاژی بیشتری ایجاد می‌شود.



شکل ۹- توزیع اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی مزرعه بادی موازی با پیوند تک نقطه‌ای



شکل ۱۰- شکل موج بیشترین اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در مزرعه بادی موازی با پیوند تک نقطه‌ای ناشی از اصابت صاعقه به توربین ۱

مزارع بادی مورد مطالعه را دارند، پیاده‌سازی شده و تاثیر هر یک از آن‌ها روی اضافه‌ولتاژهای صاعقه بررسی می‌شود. در هر روش پیوند غلاف، سه پارامتر زیر بررسی و سپس طرح مناسب جهت حفاظت شبکه کابلی در برابر ضربات مستقیم صاعقه ارائه می‌گردد:

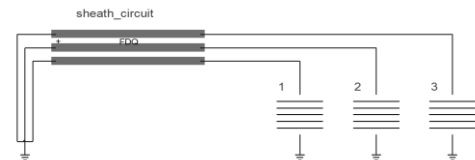
(۱) اضافه‌ولتاژهای ناشی از ضربات مستقیم صاعقه

در شبکه کابلی مزرعه بادی

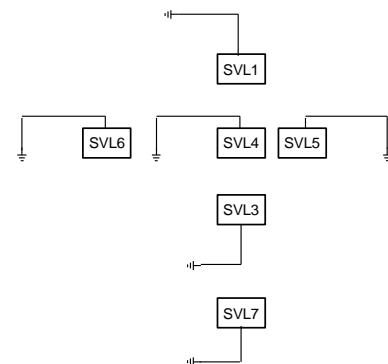
(۲) انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف

(۳) تنش ولتاژی در محدودسازهای ولتاژ غلاف

در مزارع بادی مورد مطالعه از بدنه برج توربین بادی که دارای مقاومت  $16 \Omega$  است، به منظور زمین کردن تجهیزات استفاده شده است. در شبیه‌سازی، بیشترین ولتاژ فاز بین هسته کابل و زمین (بدنه برج بادی) اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.



(الف) نحوه اجرای پیوند تک نقطه‌ای



(ب) آرایش نصب محدودسازهای ولتاژ غلاف در مزرعه بادی

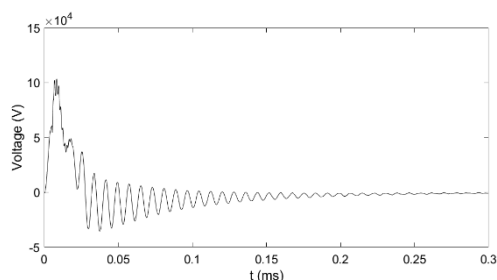
موازی با پیوند تک نقطه‌ای

شکل ۸- اجرای پیوند تک نقطه‌ای در مزرعه بادی موازی

### الف) پیوند تک نقطه‌ای شبکه کابلی

در این روش، مطابق شکل (۸-الف)، غلاف کابل در سمت توربین‌های بادی بیرونی پیوند زده شده و مستقیماً زمین می‌شود؛ اما در سمت منتهی به توربین‌های بادی داخلی توسط محدودساز ولتاژ غلاف موسوم به (SVL) که یک برقگیر است، به زمین متصل می‌شود. به همین دلیل هیچ مسیر بسته‌ی جریان دائمی برای غلاف ایجاد نخواهد شد. با توجه به آرایش موازی مزرعه بادی (شکل ۵-الف) و

سری موثرتر عمل کرده است زیرا اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه را به میزان بیشتری کاهش داده است.



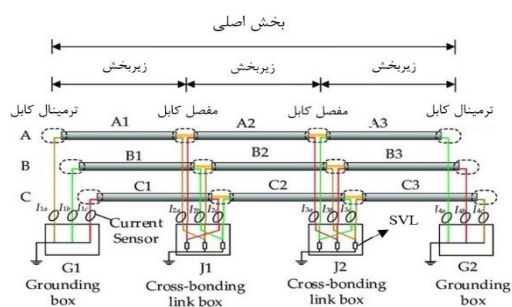
شکل ۱۳- شکل موج بیشترین اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در مزرعه بادی سری با پیوند تک نقطه‌ای ناشی از اصابت صاعقه به توربین ۴

جدول ۴- بیشینه انرژی تلف شده و تنش ولتاژی در محدودسازهای ولتاژ غلاف در آرایش سری با پیوند تک نقطه‌ای

مقدار	توربین مورد اصابت	شماره SVL	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۴۰۹۰	۲	۱	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۲۲۳	۲،۳،۴	۱،۲،۳	بیشینه تنش ولتاژی (kV)

### ب) پیوند ضربداری شبکه کابلی

پیوند ضربداری از پیوند تک نقطه‌ای پیچیده‌تر و اجرای آن از نظر شبیه‌سازی و فنی مشکل‌تر است. در این روش به دلیل جمع شدن جریان‌های القایی حالت دائمی با یکدیگر در غلاف کابل، مقدار جریان کل غلاف نزدیک صفر خواهد بود؛ زیرا جریان‌های القایی به میزان ۱۲۰ درجه با یکدیگر اختلاف فاز داشته و جمع برداری آن‌ها برابر صفر است. لذا می‌توان مقدار تلفات را به صفر کاهش داد [۳]. شکل (۱۴) اساس پیوند ضربداری را نشان می‌دهد. برای اجرای پیوند ضربداری، طول کابل به تعدادی بخش اصلی و بخش‌های اصلی نیز به تعدادی زیربخش تقسیم شده و عملیات پیوند ضربداری روی آن انجام می‌شود.



شکل ۱۴- نمایش اجرای پیوند ضربداری در یک کابل [۲۹]

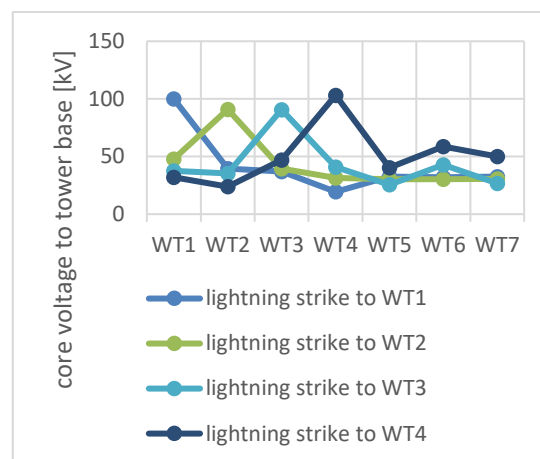
جدول ۳- بیشینه انرژی تلف شده و تنش ولتاژی در محدودسازهای ولتاژ غلاف در آرایش موازی با پیوند تک نقطه‌ای

مقدار	توربین مورد اصابت	شماره SVL	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۴۱۳۵	۲	۴	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۱۶۵	۲	۱،۲،۴،۵	بیشینه تنش ولتاژی (kV)

شکل (۱۱) آرایش قرارگیری SVLها در پیوند تک نقطه‌ای را در مزرعه بادی سری شکل (۵-ب) نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در این حالت به ۶ بلوک SVL به منظور انجام پیوند تک نقطه‌ای در مزرعه بادی نیاز می‌باشد.



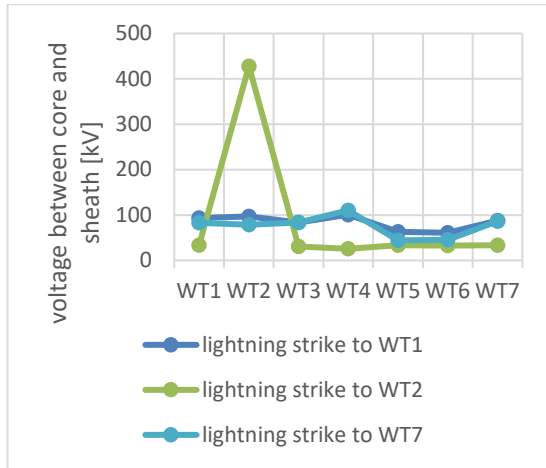
شکل ۱۱- پیوند تک نقطه‌ای در مزرعه بادی سری



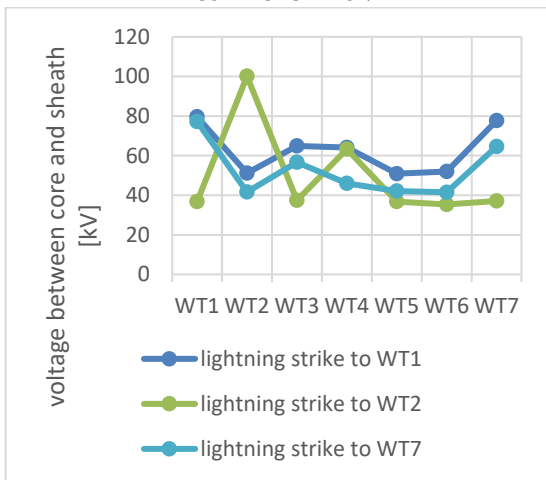
شکل ۱۲- اضافه‌ولتاژهای ایجاد شده در نقاط مختلف شبکه کابلی مزرعه بادی سری با پیوند تک نقطه‌ای

شکل (۱۲) اضافه‌ولتاژهای ایجاد شده در شبکه کابلی مزرعه بادی سری در اثر اصابت مستقیم صاعقه به توربین ۱ و ۲ و ۳ و ۴ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۲)، بیشترین اضافه‌ولتاژ در محل توربین مورد اصابت ایجاد می‌شود. مقدار ماکزیمم اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در این حالت برابر ۱۰۳ kV است که هنگام برخورد صاعقه به توربین ۴ در محل توربین ۴ ایجاد شده است (شکل (۱۳)). همچنین مشاهده می‌شود که هنگام برخورد صاعقه به توربین‌های بیرونی تنش ولتاژی کمتری ایجاد می‌شود که دقیقاً برخلاف نتیجه به دست آمده برای مزرعه بادی موازی است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پیوند تک نقطه‌ای در مزرعه بادی





الف) پیوند ضربدردی بدون SVL

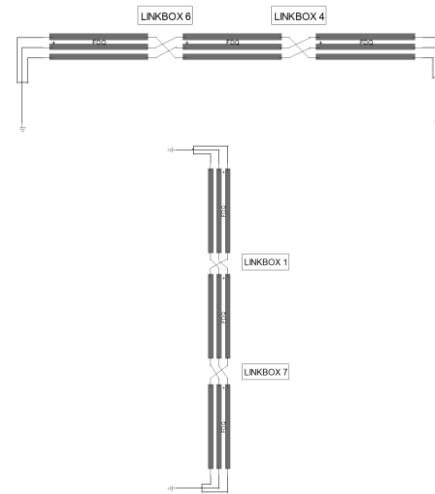


ب) پیوند ضربدردی با استفاده از SVL

شکل ۱۶- اضافه‌ولتاژها در نقاط مختلف شبکه کابلی مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدردی

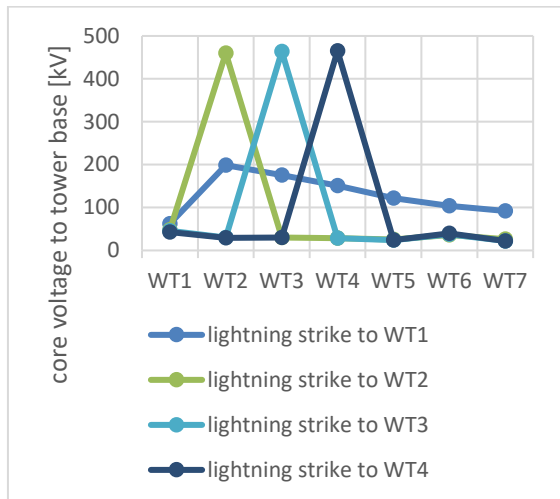
در شبکه کابلی با پیوند ضربدردی، لزوماً بیشترین اضافه‌ولتاژ در محل توربین مورد اصابت صاعقه ایجاد نمی‌شود. به عنوان مثال، هنگام برخورد صاعقه به توربین ۷، بیشترین اضافه‌ولتاژ در محل توربین ۴ ایجاد شده است. همچنین مقدار تنش ولتاژی ایجاد شده در محل توربین‌های بیرونی نسبت به بقیه کمتر است. این مطلب دقیقاً خلاف نتیجه به دست آمده برای مزرعه بادی موازی با پیوند تک نقطه‌ای است؛ لذا نوع پیوند زدن غلاف در شبکه کابلی تاثیر قابل توجهی روی توزیع تنش‌های ولتاژی در نقاط مختلف مزرعه دارد.

در مزارع بادی مورد مطالعه در این مقاله، فاصله بین دو توربین بادی مجاور یک زیربخش در نظر گرفته شده و عملیات پیوند ضربدردی در محل هر توربین بادی انجام می‌شود. این روش می‌تواند با حضور یا عدم حضور SVL شبیه‌سازی شود، زیرا بدون SVL نیز تلفات حالت دائمی صفر خواهد بود. در شکل (۱۵) از SVL برای زمین کردن غلاف کابل در نقاط مفصل استفاده شده است. در صورت عدم استفاده از SVL، غلاف کابل در نقاط مفصل به صورت ضربدردی پیوند زده شده ولی نسبت به زمین ایزوله می‌باشد و فقط در ترمینال‌ها غلاف به زمین متصل می‌شود.

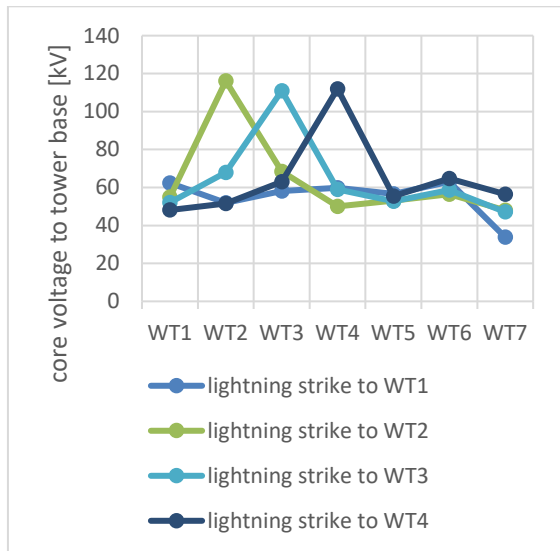


شکل ۱۵- اجرای پیوند ضربدردی در آرایش موازی توربین‌ها

اضافه‌ولتاژهای ناشی از اصابت صاعقه به توربین‌های ۱، ۲ و ۷ در نقاط مختلف شبکه کابلی مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدردی و شکل موج مربوط به بیشترین اضافه‌ولتاژها در دو حالت حضور/عدم حضور SVL، مطابق شکل (۱۶) و (۱۷) می‌باشد. بیشترین تنش ولتاژی در شبکه کابلی با پیوند ضربدردی بدون SVL در اثر اصابت صاعقه به توربین وسط مزرعه بادی (توربین ۲) و در محل همان توربین ایجاد شده است. با این وجود، مقدار اضافه‌ولتاژها به ازای بقیه حالات در محدوده مناسبی قرار دارد. با توجه به شکل (۱۶) مقدار ماکزیمم اضافه‌ولتاژها در این محل بدون حضور SVL برابر ۴۲۸ kV است که در صورت استفاده از SVL بیشینه اضافه‌ولتاژها به ۱۰۰ kV کاهش پیدا می‌کند.

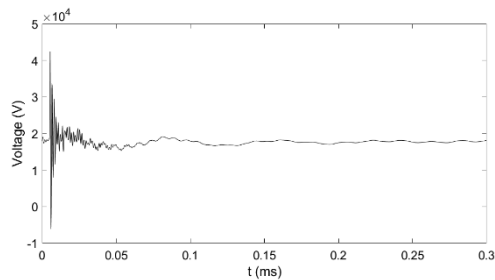


الف) اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی با پیوند ضربدری بدون SVL

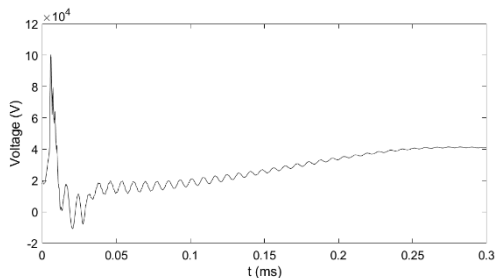


ب) اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی با پیوند ضربدری با SVL  
 شکل ۱۹- اضافه‌ولتاژهای ایجاد شده در شبکه کابلی مزرعه بادی سری به ازای روش‌های مختلف پیوند ضربدری

با توجه به نتایج به دست آمده، در پیوند ضربدری بدون استفاده از SVL در صورت برخورد صاعقه به توربین‌های ۲ و ۳ و ۴ اضافه‌ولتاژ بسیار بالایی (در حدود ۴۶۰ kV) در محل توربین مورد اصابت ایجاد می‌شود. بنابراین طرح پیوند ضربدری بدون SVL برای مزرعه مورد مطالعه رد می‌شود. لذا با توجه به اضافه‌ولتاژ بالای ایجاد شده، استفاده از SVL در اجرای پیوند ضربدری در مزرعه بادی با آرایش سری توربین‌ها الزامی است. همچنین مقدار تنش ولتاژی ایجاد شده در محل توربین‌های بیرونی نسبت به بقیه کمتر است. مشاهده می‌شود که در این حالت، پیوند ضربدری در مزرعه بادی موازی عملکرد بهتری نسبت به مزرعه بادی سری داشته است.



الف) بدون SVL



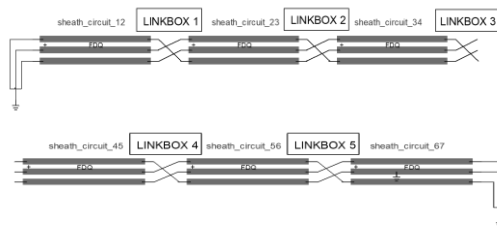
ب) با SVL

شکل ۱۷- شکل موج‌های بیشترین اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در شبکه کابلی مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدری ناشی از اصابت صاعقه به توربین ۲

جدول ۵- بیشینه انرژی تلف شده و تنش ولتاژی در SVL مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدری

مقدار	توربین مورد اصابت	شماره SVL	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۳۰۹۰	۲	۴	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۱۶۳	۲	۱،۴،۵	بیشینه تنش ولتاژی (kV)

مشابه آرایش موازی، در مزرعه بادی با آرایش سری نیز پیوند ضربدری شبکه کابلی در دو حالت حضور یا عدم حضور SVL انجام شده و اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه، انرژی تلف شده و تنش ولتاژی در محدودسازهای ولتاژ غلاف در این دو حالت بررسی می‌گردد. شکل (۱۸) اجرای پیوند ضربدری با استفاده از SVL را در مزرعه بادی سری نشان می‌دهد. طرح پیوند ضربدری بدون SVL با حذف محفظه‌های پیوند از شکل (۱۸) حاصل می‌شود.

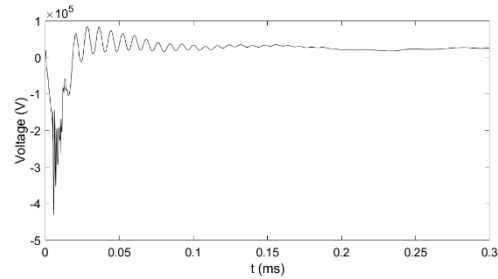


شکل ۱۸- پیوند ضربدری در مزرعه بادی سری با SVL

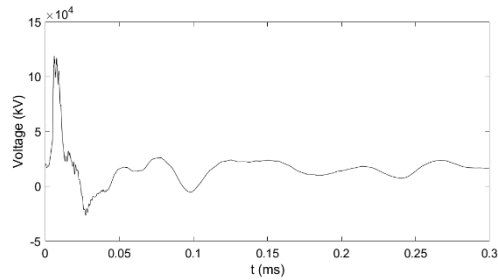
بادی موازی و سری نشان می‌دهد. طبق جدول ۷، روش پیوند ضربدری در مزرعه موازی عملکرد بهتری دارد. این روش، همزمان باعث کاهش محسوس اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی مزرعه بادی و انرژی تلف شده در SVL ها می‌گردد. در مزرعه بادی سری، استفاده از پیوند تک نقطه ای برای حفاظت شبکه کابلی در برابر ضربات مستقیم صاعقه نسبت به پیوند ضربدری با SVL موثرتر است؛ زیرا باعث کاهش موثرتر اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی و انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف شده است. پیوند تک نقطه‌ای در ساده‌تر بودن پیاده‌سازی نیز نسبت به پیوند ضربدری برتری دارد. نکته مهم به دست آمده این است که آرایش مزرعه بادی تاثیر به سزایی در انتخاب روش پیوند غلاف شبکه کابلی جهت حفاظت در برابر صاعقه دارد برای مثال، در مزرعه بادی سری، روش پیچیده و گران‌تر پیوند ضربدری به اندازه پیوند تک نقطه‌ای کارآمد نبوده است.

جدول ۶- بیشینه انرژی تلف شده و تنش ولتاژی در SVL مزرعه بادی سری با پیوند ضربدری

مقدار	توربین مورد اصابت	شماره SVL	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۵۱۹۶	۲	۲	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۲۲۲	۲	۱،۲	بیشینه تنش ولتاژی (kV)



الف) بدون SVL



ب) با SVL

شکل ۲۰- شکل موج‌های بیشترین اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در شبکه کابلی مزرعه بادی سری با پیوند ضربدری ناشی از اصابت صاعقه به توربین ۲

پ) مقایسه عملکرد روش‌های پیوند زدن غلاف در مزارع بادی مورد مطالعه  
جدول ۷ تفاوت عملکرد روش‌های مختلف پیوند را در مزارع

جدول ۷- مقایسه عملکرد روش‌های مختلف پیوند زدن غلاف در مزارع بادی مورد مطالعه

	مزرعه بادی موازی			مزرعه بادی سری		
	پیوند تک نقطه‌ای	پیوند ضربدری با SVL	درصد تفاوت عملکرد پیوند ضربدری	پیوند ضربدری با SVL	پیوند تک نقطه‌ای	درصد تفاوت عملکرد پیوند تک نقطه‌ای
بیشینه تنش ولتاژی در شبکه کابلی (kV)	۱۳۲/۱	۱۰۰	+٪۳۲/۱	۱۱۶/۲	۱۰۳/۲	+٪۱۲/۶
بیشینه تنش ولتاژی در SVL ها (kV)	۱۶۵	۱۶۳	+٪۱/۲	۲۲۲	۲۲۳	-٪۰/۴۵
بیشینه انرژی تلف شده در SVL ها (J)	۴۱۳۵	۳۰۹۰	+٪۳۱/۸۱	۵۱۹۳	۴۰۹۰	+٪۲۶/۹۶

از صاعقه، انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف و تنش ولتاژی اعمال شده به آن‌ها به منظور تعیین فاصله مناسب بین توربین‌ها بررسی می‌گردد. مطالعات این بخش به ازای فواصل بین ۲۱۷ متر تا ۲۰ متری انجام می‌گردد. لازم به ذکر است که در مزارع بادی معمولاً توربین‌های بادی

۴-۲- تعیین فاصله بهینه بین توربین‌ها در مزرعه بادی

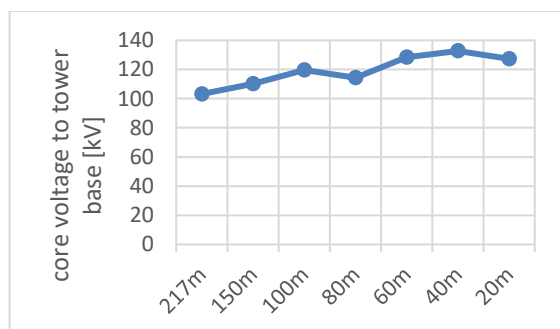
در این بخش برای مزارع بادی سری و موازی به ازای روش بهینه پیوند غلاف برای آن‌ها که در قسمت قبل انتخاب گردید، با کاهش فاصله بین توربین‌ها، اضافه‌ولتاژهای ناشی

مشاهده می‌شود که تنش‌های ولتاژی در شبکه کابلی مزرعه بادی، هنگام کاهش فاصله به ۱۰۰ متر، افزایش قابل توجه دارد. با این وجود با کاهش بیشتر فاصله تا ۸۰ متر، اضافه-ولتاژها در شبکه افزایش نمی‌یابد، بلکه کاهش پیدا خواهد کرد. شکل (۲۱) وجود رابطه‌ای غیرخطی بین تنش‌های ولتاژی در شبکه کابلی مزرعه بادی موازی و فاصله بین توربین‌ها را بیان می‌کند.

شکل (۲۳) نشان می‌دهد که تنش ولتاژی اعمال شده به محدودسازهای ولتاژ غلاف به ازای تغییر فاصله دارای بازه تغییراتی به میزان ۲۰ kV است و رفتار کاهشی نسبت فاصله دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان در نظر گرفتن فاصله ۸۰ متری بین توربین‌ها را در مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدری پیشنهاد داد. با در نظر گرفتن فاصله ۸۰ متری بین توربین‌ها ضمن ایجاد حالت مناسب از جهت هزینه شبکه کابلی، تنش‌های ولتاژی ناشی از صاعقه نیز در محدوده امن خواهد بود.

#### ب) مزرعه بادی سری با پیوند تک‌نقطه‌ای

مشابه قسمت الف با کاهش فاصله بین توربین‌ها، تنش ولتاژی در نقاط مختلف مزرعه بادی، بیشینه تنش ولتاژی و انرژی تلف شده در SVL ها به دست آمده است. مطابق شکل (۲۴)، کاهش فاصله توربین‌ها تا فاصله ۱۰۰ متری باعث افزایش اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در شبکه کابلی می‌شود. در فاصله ۸۰ متری کاهش تنش ولتاژی نسبت به قبل ایجاد شده و سپس تا فاصله ۴۰ متری افزایش و بعد از آن کاهش خواهد یافت. همانطور که مشاهده می‌شود، رابطه فاصله با تنش ولتاژی ایجاد شده در شبکه کابلی مزرعه بادی سری کاملاً غیرخطی است. با این حال، با کاهش فاصله تا ۲۰ متر نیز ماکزیمم تنش ولتاژی در شبکه کابلی در حد تحمل شبکه کابلی می‌باشد.

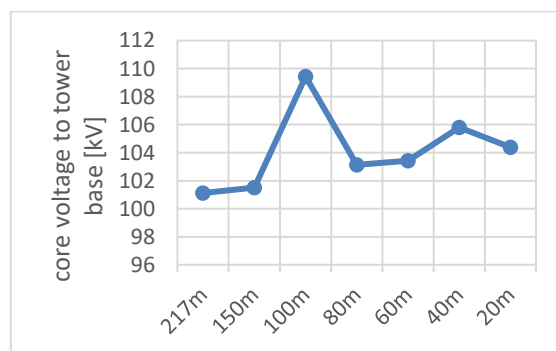


شکل ۲۴- تنش‌های ولتاژی در شبکه کابلی مزرعه بادی سری با پیوند تک‌نقطه‌ای به ازای کاهش فاصله بین توربین‌ها

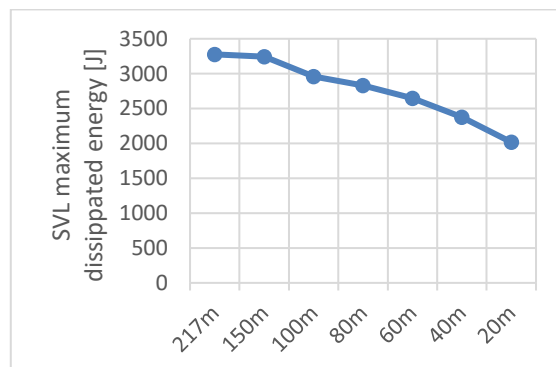
در فاصله زیر ۶۰ متر نسبت به یکدیگر نصب نمی‌شوند و در این قسمت صرفاً به خاطر بررسی رفتار پارامترها، فواصل زیر ۶۰ متر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

#### الف) مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدری

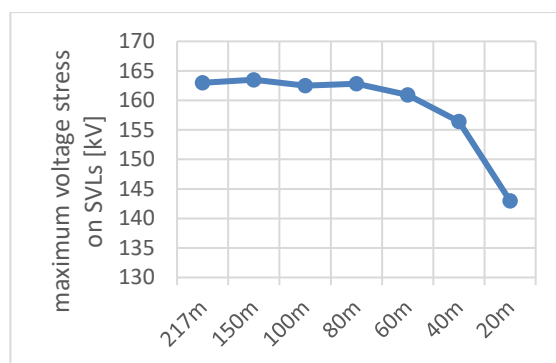
با کاهش فاصله بین توربین‌ها، تنش ولتاژی در نقاط مختلف مزرعه بادی، بیشینه تنش ولتاژی و انرژی تلف شده در SVL ها مطابق شکل (۲۱) تا (۲۳) به دست آمده است.



شکل ۲۱- تنش‌های ولتاژی در شبکه کابلی مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدری به ازای کاهش فاصله بین توربین‌ها



شکل ۲۲- بیشینه انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدری به ازای فواصل مختلف بین توربین‌ها



شکل ۲۳- بیشینه تنش ولتاژی در محدودسازهای ولتاژ غلاف مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدری به ازای فواصل مختلف بین توربین‌ها

### ۳-۴- بررسی روش‌های مختلف زمین کردن غلاف

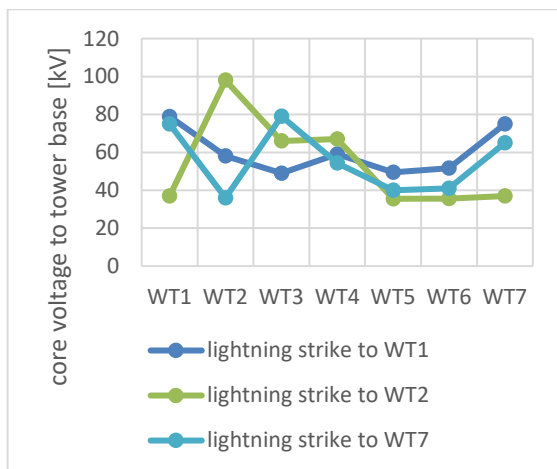
#### فلزی کابل و مقاومت سیستم زمین

تا این مرحله غلاف فلزی شبکه کابلی از طریق SVL و بدنه برج بادی با مقاومت  $16 \Omega$  به زمین متصل شد. در این قسمت، روش دیگری برای زمین کردن غلاف فلزی و همچنین تاثیر مقاومت سیستم زمین روی اضافه‌ولتاژهای ناشی از ضربات مستقیم صاعقه بررسی می‌شود. شبیه سازی‌های این بخش به برای مزارع بادی به ازای روش بهینه پیوند غلاف برای آن‌ها که در بخش ۴-۱ انتخاب شد صورت می‌پذیرد.

#### الف) استفاده از سیم زمین و تشکیل سیستم زمین

##### یکپارچه

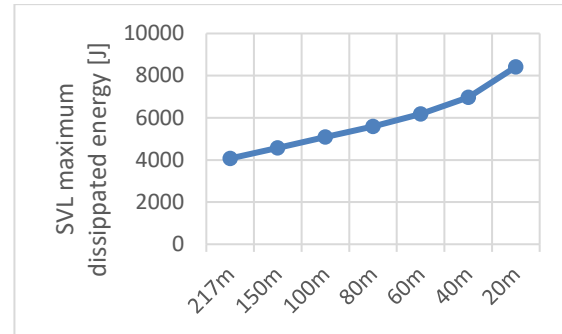
سیستم زمین یکپارچه با اتصال بدنه توربین‌های بادی به وسیله سیم زمین به یکدیگر تشکیل می‌شود. با اتصال غلاف فلزی به سیستم زمین یکپارچه، در واقع غلاف فلزی به همه توربین‌های مزرعه متصل است. در ادامه تاثیر سیستم زمین یکپارچه در مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدردی و مزرعه بادی سری با پیوند تک‌نقطه‌ای بررسی می‌شود.



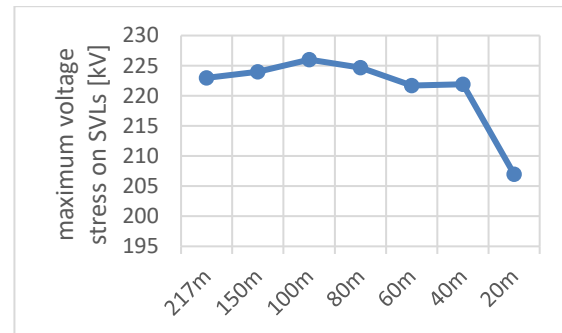
شکل ۲۷- اضافه‌ولتاژها در مزرعه بادی موازی با پیوند

ضربدردی و سیستم زمین یکپارچه

شکل (۲۷) توزیع اضافه‌ولتاژهای شبکه کابلی مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدردی را در حالت استفاده از سیستم زمین یکپارچه نشان می‌دهد. در جدول ۸ نیز انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف و تنش ولتاژی اعمال شده به آن‌ها ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از سیستم زمین یکپارچه تاثیر محسوسی در کاهش اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی مزرعه بادی موازی ندارد؛ به طوری که استفاده از سیستم زمین یکپارچه تنها ۲ kV از



شکل ۲۵- بیشینه انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف مزرعه بادی سری با پیوند تک‌نقطه‌ای به ازای فواصل مختلف بین توربین‌ها



شکل ۲۶- بیشینه تنش ولتاژی در محدودسازهای ولتاژ غلاف مزرعه بادی سری با پیوند تک‌نقطه‌ای به ازای فواصل مختلف بین توربین‌ها

همچنین با توجه به شکل (۲۵)، انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف با کاهش فاصله افزایش می‌یابد. در فاصله ۲۰ متری میزان انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف به دو برابر مقدار آن در فاصله ۲۱۷ متری می‌رسد. این نتیجه عکس نتیجه به دست آمده در مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدردی است. مطابق شکل (۲۶) نیز تنش ولتاژی به محدودساز ولتاژ غلاف نیز یک رفتار غیر خطی دارد. دامنه تغییرات تنش ولتاژی اعمالی به محدودساز ولتاژ غلاف ۱۹ kV است. مشاهده می‌شود که دامنه تغییرات تنش ولتاژی اعمال شده به محدودساز ولتاژ غلاف در مزرعه سری تقریباً با مزرعه موازی برابر است.

با توجه به نتایج دست آمده از این قسمت، در نظر گرفتن فاصله ۸۰ متری بین توربین‌ها از نظر فنی توجیه پذیر می‌باشد؛ زیرا با انتخاب این فاصله ضمن اینکه هزینه کابل کشی کاهش چشمگیری دارد، تنش‌های ولتاژی ناشی از صاعقه نیز در محدوده امن خواهد بود. در فاصله ۸۰ متر مشخصات محدودساز ولتاژ غلاف مورد نیاز نیز منطقی می‌باشد.

در مزرعه بادی سری با پیوند تک نقطه‌ای، مطابق جدول ۹ بیشترین انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف برابر  $J 3565$  است که  $12/4\%$  کاهش را نسبت به سیستم زمین ساده نشان می‌دهد. همچنین پیک تنش ولتاژی اعمال شده به محدودسازهای ولتاژ غلاف  $183 \text{ kV}$  است که نسبت به سیستم زمین ساده  $17/9\%$  کاهش را نشان می‌دهد.

جدول ۹- انرژی تلف شده و تنش ولتاژی در محدودسازهای ولتاژ غلاف در مزرعه بادی سری با پیوند تک نقطه‌ای و سیستم

زمین یکپارچه

مقدار	توربین مورد اصابت	شماره SVL	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۳۵۶۵	۱	۱	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۱۸۳	۴	۳	بیشینه تنش ولتاژی (kV)

با جمع‌بندی نتایج به دست آمده در این بخش، نکات ذیل درخصوص اجرای سیستم زمین یکپارچه در مزارع بادی مورد مطالعه قابل اشاره است:

(۱) سیستم زمین یکپارچه تاثیر قابل توجهی روی اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه در مزارع بادی مورد مطالعه نداشته است، بنابراین استفاده از سیستم زمین یکپارچه با هدف کاهش اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه کابلی مزارع بادی مورد مطالعه از نظر فنی چندان توجیهی ندارد.

(۲) در مزرعه بادی با آرایش موازی با پیوند ضربدری و مزرعه بادی سری با پیوند تک نقطه‌ای، استفاده از سیستم زمین یکپارچه باعث کاهش انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف و تنش ولتاژی اعمال شده به آن‌ها می‌گردد.

(۳) استفاده از سیستم زمین یکپارچه در مزرعه بادی با آرایش موازی و پیوند ضربدری باعث کاهش بیشتری در ماکزیمم انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف و تنش ولتاژی اعمال شده به آن‌ها نسبت به مزرعه بادی با آرایش سری و پیوند تک نقطه‌ای می‌گردد. به عبارت دیگر، اجرای سیستم زمین یکپارچه در مزرعه با آرایش موازی با پیوند ضربدری کارآمدتر بوده است. بنابراین کارایی سیستم زمین یکپارچه در مزارع بادی، به آرایش توربین‌ها در مزرعه و روش پیوند غلاف فلزی در شبکه کابلی وابستگی زیادی دارد.

مقدار پیک اضافه‌ولتاژ ایجاد شده در شبکه کابلی کاسته است. همچنین استفاده از سیستم زمین یکپارچه، توزیع اضافه‌ولتاژها را در شبکه کابلی مزرعه متفاوت می‌سازد.

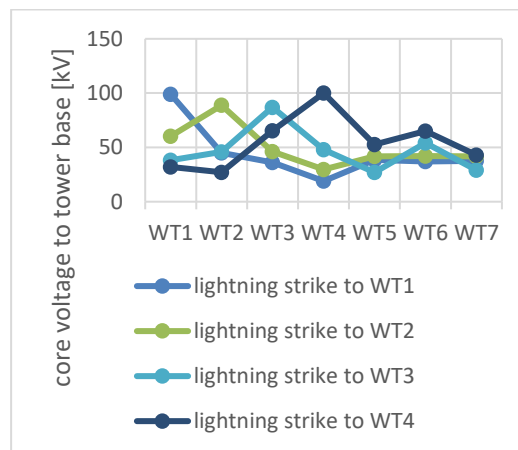
جدول ۸- انرژی تلف شده و تنش ولتاژی محدودسازهای ولتاژ غلاف در آرایش موازی با پیوند ضربدری و سیستم زمین

یکپارچه

مقدار	توربین مورد اصابت	شماره SVL	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۱۹۷۴	۷	۷	بیشینه انرژی تلف شده (J)
۱۳۰	۷	۷	بیشینه تنش ولتاژی (kV)

نکته قابل توجه این است که سیستم زمین یکپارچه تاثیر متفاوتی روی انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف و همچنین تنش ولتاژی اعمال شده به آن‌ها دارد. با استفاده از سیستم زمین یکپارچه، ماکزیمم انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف  $J 1974$  است که کاهش  $36/11\%$  نسبت به سیستم زمین ساده داشته است. پیک تنش ولتاژی اعمال شده به محدودسازهای ولتاژ غلاف نیز  $130 \text{ kV}$  است که  $20/24\%$  نسبت حالت سیستم زمین ساده کاهش پیدا کرده است.

با استفاده از سیم زمین و تشکیل سیستم زمین یکپارچه اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی مزرعه بادی سری مطابق شکل (۲۸) به دست آمده است. طبق شکل (۲۸)، در مزرعه با آرایش سری و پیوند تک نقطه‌ای نیز سیستم زمین یکپارچه تاثیر بسیار کمی روی کاهش اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی مزرعه داشته است. ماکزیمم اضافه‌ولتاژ ایجاد شده با استفاده از سیستم زمین یکپارچه برابر  $100 \text{ kV}$  است که فقط  $3 \text{ kV}$  نسبت به حالت سیستم زمین ساده کاهش داشته است.



شکل ۲۸- اضافه‌ولتاژها در مزرعه بادی سری با پیوند تک نقطه‌ای و سیستم زمین یکپارچه

مستقیم صاعقه حفاظت شود. به عبارت دیگر در مزارع بادی با مقاومت زمین پایین نیز پتانسیل وقوع اضافه‌ولتاژهای بالا در شبکه کابلی ناشی از صاعقه وجود دارد. بنابراین در مقاومت زمین پایین نیز بایستی از روش مناسب پیوند غلاف و SVL مناسب برای محافظت شبکه کابلی مزرعه بادی در برابر ضربات صاعقه استفاده شود.

(۲) کاهش مقاومت زمین تاثیر قابل توجهی روی کاهش انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف و تنش ولتاژی اعمالی به آن‌ها در هر دو مزرعه بادی (آرایش سری/موازی) مطالعه شده دارد.

(۳) کاهش مقاومت زمین در مزرعه بادی با آرایش سری با پیوند تک نقطه‌ای، تاثیر بیشتری بر کاهش اضافه‌ولتاژها در شبکه کابلی مزرعه بادی و تنش ولتاژی اعمال شده به محدودسازهای ولتاژ غلاف نسبت به مزرعه بادی با آرایش موازی با پیوند ضربدری دارد. طبق نتایج به دست آمده، به منظور کاهش اضافه‌ولتاژهای ایجاد شده در شبکه کابلی و تنش ولتاژی اعمال شده به محدودسازهای ولتاژ غلاف در مزرعه بادی با آرایش سری با پیوند تک نقطه‌ای، کاهش مقاومت زمین در محل توربین کارآمدتر است؛ حال آنکه در مزرعه با آرایش موازی و پیوند ضربدری تشکیل سیستم زمین یکپارچه موثرتر عمل می‌کند. لازم به ذکر است که سیستم زمین یکپارچه و کاهش مقاومت زمین، در هر دو مزرعه تاثیر قابل قبولی روی کاهش انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف داشته است.

لذا قبل از اجرای سیستم زمین یکپارچه در مزرعه بادی، بایستی کارایی آن با توجه به آرایش توربین‌ها در مزرعه بادی و روش پیوند غلاف فلزی شبکه کابلی سنجیده شود.

### ب) تاثیر کاهش مقاومت زمین در محل توربین بادی

در این قسمت تاثیر کاهش مقاومت سیستم زمین توربین بادی روی اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه کابلی، انرژی تلف شده در محدودسازهای ولتاژ غلاف و تنش ولتاژی اعمال شده به آن‌ها بررسی می‌گردد. نتایج برای دو مقدار مقاومت  $5 \Omega$  و  $10 \Omega$  به دست آمده و با نتایج مقدار مقاومت  $16 \Omega$  مقایسه می‌گردد. مطالعات این قسمت نیز برای هر دو مزرعه بادی مورد مطالعه با پیوند غلاف انتخاب شده در قسمت قبل انجام می‌شود. در نتایج این قسمت، از بیشترین مقادیر به دست آمده استفاده می‌شود. جدول ۱۰ نتایج به دست آمده برای دو مقدار مقاومت  $5 \Omega$  و  $10 \Omega$  در مزرعه بادی موازی با پیوند ضربدری و جدول ۱۱ نتایج برای مزرعه بادی سری با پیوند تک نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده، نکات زیر در مورد کاهش مقاومت سیستم زمین در محل توربین بادی در مزارع بادی مورد مطالعه قابل بیان است:

(۱) کاهش مقاومت زمین باعث کاهش اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه کابلی مزرعه بادی می‌شود، با این وجود این کاهش به گونه‌ای نیست که بدون انجام پیوند غلاف فلزی و استفاده از محدودساز ولتاژ غلاف از شبکه کابلی مزرعه بادی در برابر ضربات

جدول ۱۰- نتایج به دست آمده در مزرعه بادی موازی به ازای کاهش مقاومت زمین

	مقاومت زمین $10 \Omega$	درصد کاهش نسبت به سیستم زمین $16 \Omega$	مقاومت زمین $5 \Omega$	درصد کاهش نسبت به سیستم زمین $16 \Omega$
بیشینه تنش ولتاژی در شبکه کابلی (kV)	۱۰۰	٪۰/۰۹	۹۹/۳	٪۰/۷۹
بیشینه تنش ولتاژی در SVL (kV)	۱۳۳/۴	٪۱۸/۵	۸۲/۲۹۷	٪۴۳/۳
بیشینه انرژی تلف شده در SVL (J)	۲۲۷۸	٪۲۶/۲۷	۹۰۹	٪۷۰

جدول ۱۱- نتایج به دست آمده در مزرعه بادی سری به ازای کاهش مقاومت زمین

	مقاومت زمین $10 \Omega$	درصد کاهش نسبت به سیستم زمین $16 \Omega$	مقاومت زمین $5 \Omega$	درصد کاهش نسبت به سیستم زمین $16 \Omega$
بیشینه تنش ولتاژی در شبکه کابلی (kV)	۹۵/۱	٪۷/۶	۸۵	٪۱۷
بیشینه تنش ولتاژی در SVL (kV)	۱۷۳	٪۲۲/۴۲	۹۱/۶	٪۴۴/۵
بیشینه انرژی تلف شده در SVL (J)	۳۷۰۵	٪۹/۴	۲۲۵۸	٪۵۸/۹

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، استخراج طرح مناسب جهت حفاظت شبکه کابلی مزارع بادی در برابر ضربات مستقیم صاعقه به توربین مورد بررسی قرار گرفت. مدلسازی مزرعه بادی به صورت وابسته به فرکانس در نرم افزار EMTP صورت پذیرفت و نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که انتخاب روش پیوند غلاف فلزی در شبکه کابلی مزارع بادی کاملاً وابسته به آرایش توربین ها در مزرعه بادی می باشد. همچنین اجرای روش مرسوم سیستم زمین یکپارچه راهکار مناسبی جهت کاهش تنش های ولتاژی در شبکه کابلی مزرعه بادی نمی باشد اما استفاده از آن در جهت کاهش سطح انرژی محدودسازهای ولتاژ غلاف و تنش ولتاژی اعمال شده به آن ها موثر بوده و میزان بهبود عملکرد آن نیز وابسته به آرایش توربین ها در مزرعه بادی است. بررسی فواصل قرارگیری توربین ها در مزرعه بادی نیز نشان داد که بیشینه اضافه ولتاژهای ایجاد شده در شبکه کابلی مزرعه بادی رابطه غیر خطی با فاصله بین توربین ها دارد. نتایج حاصل از بررسی مقادیر مختلف مقاومت سیستم زمین نیز بیانگر موثر بودن کاهش مقاومت زمین بر روی کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه است اما تاثیر آن به گونه ای نیست که بتواند

## مراجع

- [1] A. Abdelmoumene, and Hamid Bentarzi. "Failure Modes Analysis and Reliability Enhancement of Wind Turbines." *Environmental Progress & Sustainable Energy* 42, no. 3 (2023): e14046.
- [2] C.N. Alam, and V.K. Sood. "Review of Protection Strategies for Wind Turbines against Lightning." Paper Presented at the 2020 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC), 9-10 Nov. 2020.
- [3] Y. Méndez, J. Birkel, S.F. Madsen, T. Sørensen, J.A. Plumer, and J. Montanya. "The 2018 Revision of the Standard Iec 61400-24: Lightning Protection of Wind Turbines." Paper Presented at the 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2-7 Sept. 2018.
- [4] H. Parhizkar, H. Shayeghi. "Modeling of transmission lines excited by lightning strikes in the frequency domain." *Journal of Modeling in Engineering* 15, no. 50 (2017): 237-244. (in Persian)

شبکه کابلی را بدون انجام پیوند غلاف و استفاده از محدودساز ولتاژ غلاف محافظت کند. همچنین تاثیر مقاومت زمین نیز در مزارع بادی با آرایش های مختلف متفاوت است که در هنگام طراحی سیستم حفاظتی شبکه کابلی مزارع بادی بایستی مورد توجه قرار گیرد.

## تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

## تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

## مشارکت های نویسندگان

سعید شیرمحمدی: شبیه سازی نرم افزاری، تجزیه و تحلیل داده ها، نگارش پیش نویس اصلی  
رضا شریعتی نسب: بازبینی و ویرایش

## منابع مالی

در انجام این پژوهش هیچ منبع مالی خاصی استفاده نشده است.



- [5] S. Sekioka, H. Ootoguro, and T. Funabashi. "A Study on Overvoltages in Windfarm Caused by Direct Lightning Stroke." *IEEE Transactions on Power Delivery* 34, no. 2 (2019): 671-679.
- [6] O. Asuda, and T. Funabashi. "Transient Analysis on Wind Farm Suffered from Lightning." Paper Presented at the 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004., 6-8 Sept. 2004.
- [7] B.M. Radičević, M.S. Savić, S.F. Madsen, and I. Badea. "Impact of Wind Turbine Blade Rotation on the Lightning Strike Incidence – a Theoretical and Experimental Study Using a Reduced-Size Model." *Energy* 45, no. 1 (2012): 644-654.
- [8] O. Ukar, and I. Zamora. "Wind Farm Grounding System Design for Transient Currents." *Renewable Energy* 36, no. 7 (2011): 2004-2010.
- [9] K.I. Seki, T. Tsuchida, A. Akiba, H. Tada, and S. Sekioka. "An Experimental Study on Fire Ignition in Collector Cable in Wind Power Generation System Caused by Direct Lightning Strike." *Electrical Engineering in Japan* 217, no. 1 (2024): e23462.
- [10] R. Alipio, M. Guimarães, L. Passos, D. Conceição, and M.T.C. de Barros. "Ground Potential Rise in Wind Farms Due to Direct Lightning." *Electric Power Systems Research* 194 (2021): 107-110.
- [11] M.E.M Rizk, A. Ghanem, S. Abulanwar, A. Shahin, Y. Baba, F. Mahmood, and I. Ismael. "Induced Electromagnetic Fields on Underground Cable Due to Lightning-Struck Wind Tower." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 65, no. 6 (2023): 1684-1694.
- [12] S. Sekioka. "Simulation of Lightning Overvoltages in Substation for Lightning Strike to Wind Turbine." Paper Presented at the 2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), 20-26 Sept. 2021.
- [13] H. Chen, Y. Zhang, Y. Du, and Q.S. Cheng. "Comprehensive Transient Analysis for Low-Voltage System in a Wind Turbine under Direct Lightning." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 121 (2020): 106-131.
- [14] "IEEE Approved Draft Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 Kv through 500 Kv." *IEEE P575/D13, May 2014* (2014): 1-82.
- [15] Y. Yasuda, N. Uno, H. Kobayashi, and T. Funabashi. "Surge Analysis on Wind Farm When Winter Lightning Strikes." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 23, no. 1 (2008): 257-262.
- [16] K. Yamamoto, S. Yanagawa, S. Sekioka, and S. Yokoyama. "Transient Grounding Characteristics of an Actual Wind Turbine Generator System at a Low-Resistivity Site." *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5, no. 1 (2010): 21-26.
- [17] CIGRE Working Group 02 of Study Committee 33. "Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients " CIGRE Brochure 39,1990.
- [18] H. Dei, Y. Ikeda, and N. Nagaoka. "A Circuit Model of Electrical Wiring Nearby Building Structure for Lightning Surge Analysis." *Electrical Engineering in Japan* 217, no. 1 (2024): e23456.
- [19] H. Chen, Y. Zhang, Y. Du, and Q.S. Cheng. "Lightning Propagation Analysis on Telecommunication Towers above the Perfect Ground Using Full-Wave Time Domain Peec Method." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 61, no. 3 (2019): 697-704.
- [20] A. Ametani, Y. Kasai, J. Sawada, A. Mochizuki, and T. Yamada. "Frequency-Dependent Impedance of Vertical Conductors and a Multiconductor Tower Model." *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* 141, no. 4. (1994): 339-345.
- [21] R.A. Jones, P.R. Clifton, G. Grotz, M. Lat, F. Lembo, D.J. Melvold, D. Nigol et al. "Modeling of metal-oxide surge arresters." *IEEE Transactions on Power Delivery* 7, no. 1 (1992): 302-309.
- [22] F. Safaei, N. Ramazani, M. Niazazari. " Evaluation and Prediction of Over-Voltages Effects Caused by Direct/Indirect Lightning Stroke on Complex Power Distribution Networks Using High-Frequency Modeling of the Components." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 53 (2018): 243-258. (in Persian)
- [23] T. Funabashi. "A study on modeling technique for power system transients analysis." Thesis for Doctor Degree, 1999.
- [24] T. Ueda, T. Sugimoto, T. Funabashi, N. Takeuchi, T. Sato, and K. Miyagi. "A Study on Transformer Model for Transfer Voltage Considering Frequency Characteristics." *IEEJ Transactions on Power and Energy* 117, no. 9 (1997): 1294-1300.

- [25] T. Funabashi, T. Ito, T. Sugimoto, K. Miyagi, T. Sano, T. Ueda, J. Martinez, and A. Ametani. "Generalized Generator Model for Transformer Transfer Voltage Studies." Paper Presented at the IEEE Power Engineering Society General Meeting, 6-10 June 2004.
- [26] CIGRE Working Group 01 (Lightning) of study Committee 33, " Guide to procedures for estimating the Lightning performance of transmission lines" CIGRE Brochure 63,1991.
- [27] J.G. Safar, R. Shariatinasab." Comprehensive Modeling of Transient Analysis of Grounding System under Lightning Surges." *Journal of Modeling in Engineering* 17, no. 59 (2019): 165-176. (in Persian)
- [28] D. Romero, J. Montanyá and Á. Cancela. "Behaviour of the Wind-Turbines Under Lightning Strikes Including Nonlinear Grounding System." *Renewable Energy & Power Quality Journal* 1 (2004): 439-444.
- [29] M. Li, J. Liu, T. Zhu, W. Zhou, and C. Zhou. "A Novel Traveling-Wave-Based Method Improved by Unsupervised Learning for Fault Location of Power Cables Via Sheath Current Monitoring." *Sensors* 19, no. 9. (2019): 2083-2107.