



# Comparative Study and Investigation of Homogeneous Soil with Connected Circular and Cylindrical Electrodes Based on Fields Distribution of Direct Lightning Strike on Wind Turbine

Hossein Malekpoor <sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-8-8349, Iran.

## Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Malekpoor H, Comparative Study and Investigation of Homogeneous Soil with Connected Circular and Cylindrical Electrodes Based on Fields Distribution of Direct Lightning Strike on Wind Turbine. *Industrial Innovations*. 2024; 2(1):22-37.



<https://doi.org/10.61186/jii.2.1.22>

## KEYWORDS

Wind turbine;  
Lightning current;  
Induced overvoltage.

## ABSTRACT

In this paper, the effect of direct lightning strikes on the wind turbine is studied for the earth system with homogeneous soil and circular and cylindrical electrodes connected and without them. The location of wind turbines and the structure of their bodies have caused serious economic losses when lightning strikes the turbines. The design of wind turbine grounding system is very important for the safety of personnel and protection of electrical equipment. Simple soil has a relative electrical permeability coefficient of 10 and a conductivity coefficient of 0.1. The wind turbine ground system is considered with homogeneous soil and with 9 vertical electrodes and 5 horizontal electrodes connected in the form of circle and cylinder. The overall dimensions of the wind turbine include the blade length of 24 meters, nacelle length of 6 meters, width of 6 meters and height of 6 meters, and the tower of the wind turbine is made of a steel cone with a height of 44 meters. The simulation results in the full wave HFSS software for two cases with and without the electrode based on the distribution of the fields created on the components of the wind turbine resulting from the direct impact of lightning and the effect of overvoltage created at different frequencies were investigated and compared. Is. Based on this, it can be concluded that the arrangement of electrodes and ground resistance plays a very important role for the design of the wind turbine farm and its protection.

## Extended Abstract

### 1. Introduction

With the development of the electricity industry produced from wind turbines, the capacity and height of wind turbines are increasing. For optimal use of wind energy, wind turbines are usually installed in open areas or in high altitude areas and other places. Due to the location of wind turbines and their shape and structure, lightning strike to wind turbines causes serious economic losses and security risks. The design of the connection system of wind turbines is very important for the safety of personnel and the protection of electrical equipment. This thesis consists of two parts, in the first part, all the simulation steps are explained, and then by comparing the results of the simulation with the results of the studied articles, it can be seen that they are in good agreement with the results of the simulation in HFSS software. In the second part, the distribution of the fields created on the wind turbine resulting from lightning strikes and the effect of over voltages created at different frequencies on all components of the wind turbine in different states of the earth system is discussed. In this paper, in order to show the effects caused by lightning and the importance of protecting wind turbines against lightning, all simulations have been done without considering the arrester. In this thesis, it can be concluded

\* Corresponding author,

E-mail address: [h-malekpoor@araku.ac.ir](mailto:h-malekpoor@araku.ac.ir)

DOI: <https://doi.org/10.61186/jii.2.1.22>

Received: March 28, 2024; Received in revised form: April 15, 2024; Accepted: May 05, 2024.

Article type: Research Paper

©Author



that the earth system is effective on the way of field distribution on wind turbine components. Also, the arrangement of electrodes and ground resistance plays a very important role for the design of the wind turbine farm and its protection.

## 2. Approach

The proposed method based on simulations was done for simple single-layer soil with the arrangement of connected circular and cylindrical electrodes. The analyses are based on the full-wave HFSS software to simulate the wind turbine along with the ground system. The relative electric permeability coefficient of simple soil is 10 and its conductivity is 0.1. Also, the dimensions of the soil layer are 20×20 square meters and its height is 2.5 meters. The arrangement of electrodes in the soil layer is shown in figure 2 as a circle and connected cylinder. The material of these electrodes is considered copper in the HFSS software. The height of these electrodes is equal to the height of the soil, i.e. 2.5 meters, and the radius of these electrodes is 1.25 cm. In the case of connected circle and cylinder, two electrode rings with radii of 1.7 meters and 3.9 meters, 9 vertical electrodes and 5 horizontal electrodes have been used.

## 3. Findings

In this paper, the effect of direct lightning strikes on the wind turbine is studied for the earth system with homogeneous soil and circular and cylindrical electrodes connected and without them. The location of wind turbines and the structure of their bodies have caused serious economic losses when lightning strikes the turbines. The design of wind turbine grounding system is very important for the safety of personnel and protection of electrical equipment. Simple soil has a relative electrical permeability coefficient of 10 and a conductivity coefficient of 0.1. The wind turbine ground system is considered with homogeneous soil and with 9 vertical electrodes and 5 horizontal electrodes connected in the form of circle and cylinder. The overall dimensions of the wind turbine include the blade length of 24 meters, nacelle length of 6 meters, width of 6 meters and height of 6 meters, and the tower of the wind turbine is made of a steel cone with a height of 44 meters. The simulation results in the full wave HFSS software for two cases with and without the electrode based on the distribution of the fields created on the components of the wind turbine resulting from the direct impact of lightning and the effect of overvoltage created at different frequencies were investigated and compared. Based on this, it can be concluded that the arrangement of electrodes and ground resistance plays a very important role for the design of the wind turbine farm and its protection.

## 4. Conclusion

In this study, the effect of direct lightning strikes on wind turbine components with a simple soil earth system with connected circular and cylindrical electrodes was simulated and analyzed. The electric field distribution on the wind turbine components was investigated in simple soil without electrodes and with connected circular and cylindrical electrodes. Based on the results of the simulation, it was observed that the field distribution in the case where the electrode is used in the earth system is weaker in different parts of the turbine, and as a result, this field reduces the damage to the wind turbine equipment. In the earth system with a single-layer soil with an electrode, the amplitude of the electric field has reached about 500 V/m.



## مطالعه و بررسی مقایسه‌ای خاک همگن با الکترودهایی به شکل دایره و استوانه متصل بر اساس توزیع میدان‌های برخورد مستقیم صاعقه بر روی توربین بادی

حسین ملک‌پور<sup>الف\*</sup>

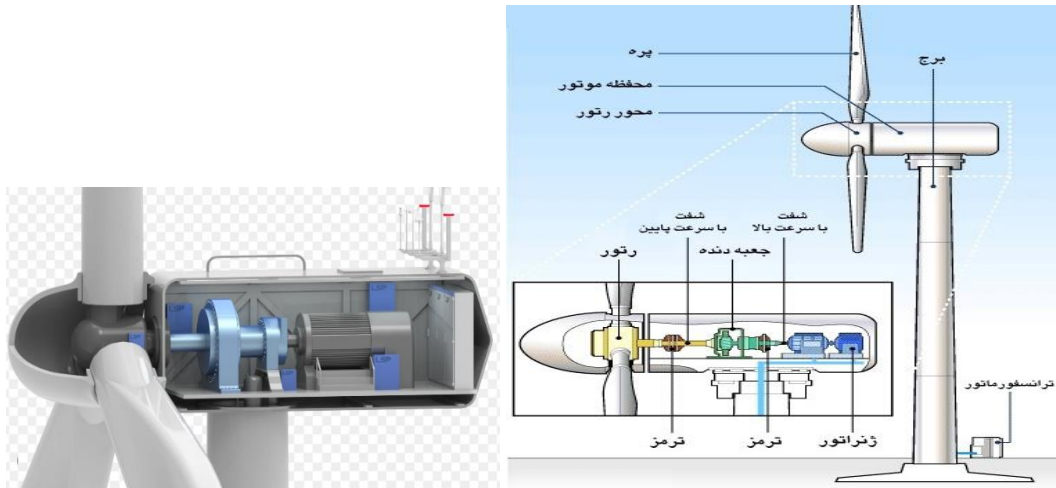
<sup>الف</sup> گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. [h-malekpoor@araku.ac.ir](mailto:h-malekpoor@araku.ac.ir)

چکیده	واژگان کلیدی
در این مقاله، اثر برخورد مستقیم صاعقه روی توربین بادی برای سیستم زمین با خاک همگن و الکترودهایی به شکل دایره و استوانه متصل و بدون آنها مطالعه شده است. مکان توربین‌های بادی و ساختار بدنه آنها موجب شده است که برخورد رعد و برق به توربین‌ها، خسارات اقتصادی جدی به بار آورد. طراحی سیستم اتصال زمین توربین‌های بادی برای ایمنی پرسنل و حفاظت از تجهیزات الکتریکی بسیار مهم است. خاک ساده شامل ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی ۱۰ و ضریب رسانایی ۰/۱ می‌باشد. سیستم زمین توربین بادی با خاک همگن و با ۹ الکتروده قائم و ۵ الکتروده افقی به شکل دایره و استوانه متصل در نظر گرفته شده است. ابعاد کلی توربین بادی شامل طول پرها ۲۴ متر، ناسل به طول ۶ متر، عرض ۶ متر و ارتفاع ۶ متر، و برج توربین بادی از یک مخروط فولادی به ارتفاع ۴۴ متر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار تمام موج HFSS برای دو حالت با الکتروده و بدون آن بر اساس توزیع میدان‌های ایجاد شده بر روی اجزای توربین بادی حاصل از برخورد مستقیم صاعقه و اثر اضافه ولتاژهای ایجاد شده در فرکانس‌های مختلف بررسی و مقایسه شده است. بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت که آرایش چیدمان الکترودها و مقاومت زمین نقش بسیار مهمی برای طراحی مزرعه توربین بادی و حفاظت آن بر عهده دارد.	توربین بادی؛ جریان صاعقه؛ اضافه ولتاژ القایی.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۹
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

### ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر با توجه تغییرات آب و هوایی و افزایش هزینه‌های سوخت فسیلی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است [۱]. همچنین به دلیل کاهش تدریجی سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی آن، شبکه‌های قدرت دچار مشکل شده‌اند. برنامه‌ریزی‌های اخیر جهان مبنی بر استفاده از انرژی‌های نو و تجدید پذیر به خصوص انرژی باد شده است. انرژی باد نوعی انرژی تجدید پذیر و خالص است که بر کاهش آلودگی محیط‌زیست و انتشار گاز کربن دی‌اکسید کمک می‌کند [۱، ۲]. یکی از عواملی که سبب نگرانی سرمایه‌گذاران در این بخش شده است مسئله برخورد صاعقه بر توربین بادی می‌باشد. توربین‌های بادی به دلیل ارتفاع بلند و تیغه‌های بلند، اغلب در معرض برخورد صاعقه قرار می‌گیرند که می‌توانند مشکلات عملیاتی در یک نیروگاه ایجاد کنند [۲]. شکل ۱ ساختار یک توربین بادی را نمایش می‌دهد.

\* نویسنده مسئول؛



شکل ۱ اجزای اصلی توربین بادی [۲]

برخورد صاعقه موجب سوختگی قطعات و تخریب بخشی از تجهیزات توربین یا تمام تجهیز شده که این عامل باعث کاهش نرخ سودمندی و افزایش قیمت برق تولیدی از توربین بادی می‌شود [۳]. با توجه به اینکه توربین‌های بادی برای تولید برق نیاز به باد دارند به‌طور طبیعی در مناطقی که مزارع توربین بادی وجود دارد اغلب مناطقی با جو پرخطر همچون صاعقه‌های شدید هستند. اضافه ولتاژی که بر اثر برخورد صاعقه بر توربین بادی وارد می‌شود موضوعی مهم در بحث حفاظت توربین‌های بادی می‌باشد. به‌طور کلی، سیستم محافظت صاعقه از سه بخش عمده شامل گیرنده صاعقه، هدایت‌کننده رو به پایین صاعقه و امان زمین می‌باشد. این المان‌ها باید به‌خوبی رسانای الکتریکی<sup>۱</sup> باشند تا بتوانند به‌طور ایمن صاعقه را به زمین انتقال دهند که این موضوع مربوط به سیستم‌های زمین توربین بادی می‌باشد [۴-۶]. 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 [۵].

آسیب‌های ناشی از صاعقه در توربین‌های بادی می‌تواند مستقیم و یا غیرمستقیم باشد [۷]. آسیب‌های مستقیم در قطعاتی از توربین بادی رخ می‌دهد که جریان الکتریکی صاعقه را به زمین منتقل می‌کنند. همچنین ارتباط متقابل اجزای الکتریکی و میدان‌های شدید مغناطیسی در توربین موجب می‌شود که به‌نوعی آسیب‌دیدگی مستقیم منجر شود. آسیب‌دیدگی غیرمستقیم ناشی از برخورد صاعقه با اشیاء یا زمین‌های مجاور توربین‌های بادی می‌باشد. در این حالت آسیب‌دیدگی ناشی از ارتباط القایی کابل‌ها و یا اجزایی است که دارای میدان‌های مغناطیسی<sup>۲</sup> بوده و یا به‌صورت یک هادی، برای عبور ولتاژ موقت (ناشی از صاعقه) تا رسیدن به یک هادی متصل به توربین، عمل می‌نمایند. صاعقه دارای فرکانس بسیار بالا است در نتیجه اضافه ولتاژهایی با فرکانس و دامنه بالا ایجاد می‌کند [۴]. حفاظت در برابر صاعقه توربین‌های بادی تا حد زیادی بر روی طراحی پره‌های توربین بادی متمرکز شده است. با این حال، یک سیستم زمین مناسب در سیستم حفاظت از صاعقه حائز اهمیت است. طراحی ایمن و مقرون‌به‌صرفه یک سیستم زمین توربین بادی مستلزم مدل‌سازی دقیق مقاومت محلی خاک است، تا از عملکرد ایمن و قابل اطمینان آن‌ها در کل طول عمر آن‌ها اطمینان حاصل شود، به‌ویژه زمانی که توربین‌های بادی در یک منطقه وسیع با انواع و ویژگی‌های مختلف خاک توزیع شده‌اند [۸-۲۰]. سیستم زمین یک جزء مهم برای حفظ یکپارچگی فیزیکی سازه و حفاظت از ایمنی انسان است.

سیستم زمین مجموعه‌ای از اتصالات به‌هم‌پیوسته از هادی‌ها می‌باشد که در زمین و زیر سازه قرار دارد. تعدادی الکتروود در زمین با توجه به مقاومت زمین در چند متری زمین دفن می‌شود که این هادی‌ها به بدنه تجهیزات متصل است. اگر بدنه تجهیز

<sup>۱</sup> Electrical conductivity

<sup>۲</sup> Magnetic field

برق‌دار شود، جریان ناشی از آن وارد زمین شده و بدین‌صورت مانع برق‌گرفتگی می‌شود [۷]. به‌طور کل سیستم زمین برای کاهش مقاومت طراحی می‌شود تا بدین‌صورت اضافه ولتاژها و جریان‌های بزرگ با فرکانس‌های بالا را از افراد و تجهیزات دور کنند.

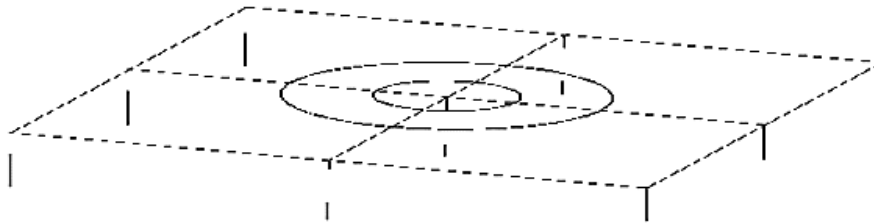
در تحقیق قبلی شبیه‌سازی توربین بادی در نرم‌افزار COMSOL انجام داده است و از جریان ۱۰۰ کیلو آمپر برای مدل‌سازی صاعقه استفاده کرده است [۸]. برای طراحی تیغه‌ها به طول ۲۴ متر با رسانایی  $0.004 \text{ s/m}$  در نظر گرفته شده است. ناسل این توربین بادی با توجه به نسلی به طول ۶، عرض ۶ و ارتفاع ۶ متر ساخته شده است، لایه خارجی ناسل از پلاستیک تقویت شده با ضخامت ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. از نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که در پایه برج و خاک اطراف آن یک میدان الکتریکی بزرگ وجود دارد که می‌تواند به اجزای توربین بادی و موجودات زنده آسیب برساند. بدین ترتیب طراحی و ساخت یک سیستم زمین با رعایت استانداردها بسیار مهم است. مطالعه ارائه شده در [۱۲] یک روش جامع برای طراحی یک سیستم زمینی قابل‌اعتماد برای یک توربین بادی ارائه می‌کند. برای ارزیابی طراحی سیستم زمین از برنامه COMSOL Multiphysics استفاده می‌شود. ارزیابی طراحی سیستم زمین با جریان ۱۰۰ آمپر به‌عنوان جریان مستقیم تزریقی انجام می‌شود که در آن ولتاژ در نقطه تزریق پس از اجرای شبیه‌سازی اندازه‌گیری می‌شود و سپس مقاومت زمین محاسبه می‌شود. ابعاد شبکه زمین از  $20 \times 20$  تا  $60 \times 60$  متر افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در آن افزایش اندازه شبکه منجر به کاهش مقاومت زمین می‌شود. همچنین، مقاومت اتصال به زمین توربین بادی باید تا حد امکان کوچک باشد تا جریان صاعقه به‌طور ایمن در زمین پخش شود. در این طرح، مقاومت زمین را در برابر طول الکترودهای عمودی برای طرح‌های شبکه‌های مختلف، چهار الکترودها، پنج الکترودها و سیستم‌های اتصال زمین هشت الکترودها در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که همه سیستم‌های زمین تقریباً یک الگو دارند. با این حال سیستم هشت الکترودها کاهش بیشتری از مقاومت زمین را نسبت به سایر چیدمان‌ها دارد.

در این مقاله اثر برخورد مستقیم صاعقه بر روی اجزای توربین بادی با سیستم زمین خاک تک لایه همگن با الکترودهایی دایره و استوانه متصل شبیه‌سازی و تحلیل شده است. خاک ساده شامل ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی ۱۰ و ضریب رسانایی  $0.1$  می‌باشد. در حالت دایره و استوانه متصل از دو حلقه الکترودها به شعاع‌های  $1/7$  متر و  $3/9$  متر و  $9$  الکترودها قائم و  $5$  الکترودها افقی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار تمام موج HFSS بر اساس توزیع میدان‌های ایجاد شده بر روی توربین بادی حاصل از برخورد صاعقه و اثر اضافه ولتاژهای ایجاد شده در فرکانس‌های مختلف بررسی شده است. همچنین، نتایج به دست آمده با توربین بادی شامل سیستم زمین ساده بدون الکترودها مقایسه شده است.

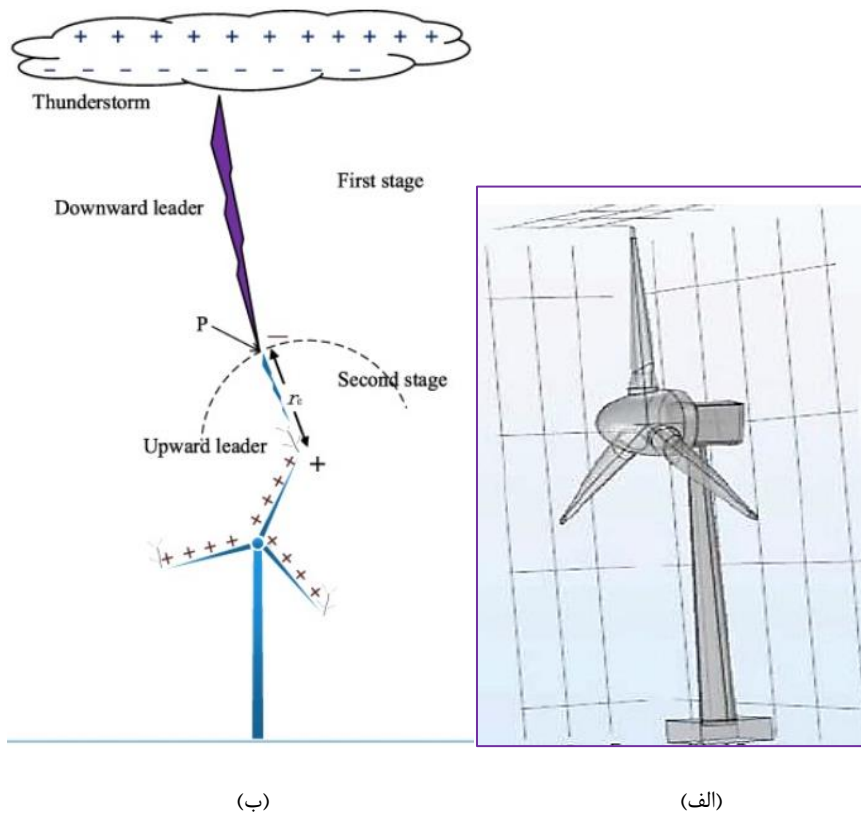
## ۲- ساختار و شبیه‌سازی برخورد صاعقه به توربین پیشنهادی و زمین با الکترودها

### ۲-۱- شبیه‌سازی صاعقه و توربین بادی در نرم‌افزار

در این بخش به بررسی ساختار توربین بادی و نحوه شبیه‌سازی برخورد صاعقه پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام شده برای خاک ساده تک لایه با چیدمان الکترودهای دایره و استوانه متصل انجام شده است. تحلیل‌ها بر اساس نرم‌افزار تمام موج HFSS برای شبیه‌سازی توربین بادی به همراه سیستم زمین صورت گرفته است. ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی خاک ساده  $10$  و رسانایی آن  $0.1$  می‌باشد. همچنین، ابعاد لایه خاک  $20 \times 20$  مترمربع و ارتفاع آن  $2/5$  متر می‌باشد. نحوه چیدمان الکترودها در لایه خاک به‌صورت دایره و استوانه متصل در شکل ۲ نشان داده شده است. جنس این الکترودها در نرم‌افزار HFSS، مس در نظر گرفته شده است. ارتفاع این الکترودها برابر با ارتفاع خاک یعنی  $2/5$  متر و همچنین شعاع این الکترودها  $1/25$  سانتی‌متر می‌باشد. در حالت دایره و استوانه متصل از دو حلقه الکترودها به شعاع‌های  $1/7$  متر و  $3/9$  متر و  $9$  الکترودها قائم و  $5$  الکترودها افقی استفاده شده است.



شکل ۲ الکترودهایی با چیدمان دایره‌ای شکل و استوانه متصل در سیستم زمین



شکل ۳ ساختار توربین بادی شبیه‌سازی شده (الف) برخورد صاعقه (ب) در نرم‌افزار تمام موج

ابعاد کلی توربین بادی شامل طول تیغه‌ها ۲۴ متر، ناسلی به طول ۶ متر، عرض ۶ متر و ارتفاع ۶ متر می‌باشد. برج توربین بادی از یک مخروط فولادی به ارتفاع ۴۴ متر و پایه برج با قطر ۴ متر تشکیل شده است. همچنین، قسمت فوقانی که بر روی آن ناسل نصب شده است به قطر ۲ متر می‌باشد. مطابق شکل ۳، جریان صاعقه در نرم‌افزار HFSS بر اساس معادله (۱) مدل شده است. به همین منظور، موج تابشی به ساختار سه‌بعدی توربین بادی به‌عنوان صاعقه از طریق وجه بالایی یک جعبه مکعبی که توربین را احاطه کرده است تابیده می‌شود.

(۱)

$$i(t) = I_o (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

$$I_o = 32594.63A \quad \alpha = 25738.46S^{-1} \quad \beta = 1618545S^{-1}$$

## ۲-۲- بررسی عملکرد ساختار سیستم زمین

سیستم زمین مجموعه‌ای از اتصالات به هم پیوسته از هادی‌ها می‌باشد که در زمین و زیر سازه قرار دارد. تعدادی الکتروود در زمین با توجه به مقاومت زمین در چند متری زمین دفن می‌شود که این هادی‌ها به بدنه تجهیزات متصل است، که اگر بدنه تجهیز برق دار شود جریان ناشی از آن وارد زمین می‌شود و بدین صورت مانع برق‌گرفتگی می‌شود [۸]. در برخی شرایط آب و هوایی مانند آلودگی، باران، مه شدید و غیره، پره‌های توربین بادی مرطوب و رسانا می‌شوند. این عوامل فرآیند جذب صاعقه را به پره‌ها و سپس به سیستم زمین افزایش می‌دهند. همچنین حرکت دینامیکی تیغه توربین می‌تواند جاذبه ضربات صاعقه را به پره‌های توربین افزایش دهد. سیستم زمین وظیفه جذب انرژی خطرناک رعد و برق و محدود کردن ولتاژهای اضافی مربوط به توربین‌های بادی اصابت کرده و مجاور را بر عهده دارد [۹]. سیستم زمین توربین بادی می‌تواند به سرعت جریان صاعقه را در زمین پخش کند تا از آسیب مداوم جریان صاعقه به تجهیزات الکتریکی داخل توربین بادی جلوگیری کند. در نتیجه، طراحی عالی سیستم اتصال زمین توربین بادی برای ایمنی پرسنل و حفاظت از تجهیزات الکتریکی بسیار مهم است.

منظور از طراحی تعیین نوع ساختار و تعیین ابعاد سیستم زمین است. در اینجا هدف تعیین مقدار طول مؤثر میله ( $L_{eff}$ ) و تعیین سطح مقطع مؤثر آن ( $A_{eff}$ ) می‌باشد. آقای گرشو ابتدا مطالعه‌ای بر روی سیستم‌های زمین از نوع میله‌ای با وجود خاک معمولی انجام داده‌اند و پس از تطابق منحنی‌های به دست آورده و بررسی نتایج شبیه‌سازی شده رابطه زیر را برای ضریب ضربه به دست آورد [۱۱]:

$$A = \alpha l + \beta \quad (L_{eff} \leq l) \quad (2)$$

و از آنجا که طول مؤثر هنگامی به دست می‌آید که ضریب ضربه برابر با یک باشد رابطه محاسبه طول مؤثر به صورت زیر می‌شود:

$$L_{eff} = \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (3)$$

$$\alpha = 0.025 + e^{-0.82 * (\rho * T)^{0.257}} \quad (4)$$

$$\beta = 0.17 + e^{-0.22 * (\rho * T)^{0.555}} \quad (5)$$

این نویسندگان با مطالعه بر روی الکترودهای میله‌ای روابط طول مؤثر و ضریب ضربه را به صورت زیر به دست آوردند [۱۲]:

$$L_{eff} = 1.4 \sqrt{\rho T} \quad (6)$$

$$A = e^{0.333(l/L_{eff})^{2.3}} \quad (7)$$

برای حالت عمودی از رابطه عمق نفوذ موج جریان در خاک بهره گرفته شده، نهایتاً، رابطه‌ای برای طول مؤثر نوشته می‌شود که برابر است با:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (m) \quad (8)$$

که با توجه به  $\omega$  که در بالا آمده است رابطه به صورت زیر نوشته می‌شود:

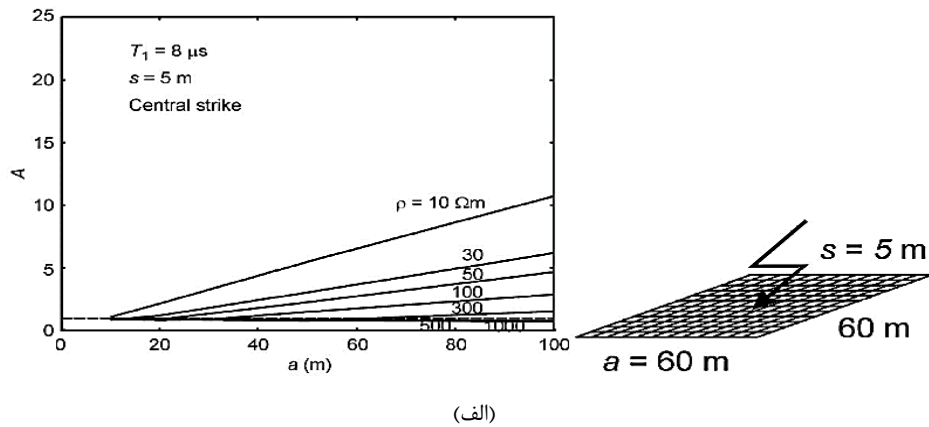
$$\delta = \sqrt{\frac{2a\rho}{\mu}} \quad (m) \quad (9)$$

بنابراین طول مؤثر به دست می‌آید:

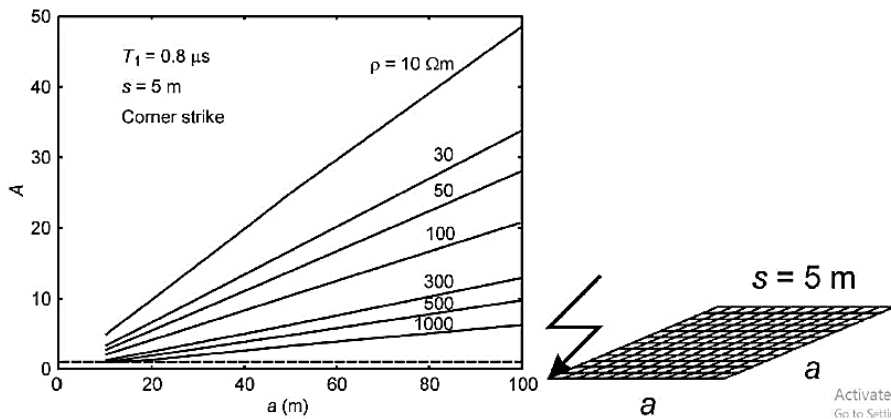
$$l_e = b\delta = b\sqrt{\frac{2a\tau\rho}{\mu}} = B\sqrt{\tau\rho} \quad (m) \quad (10)$$

$$B = b\sqrt{\frac{2a}{\mu}} \quad (11)$$

برای تعیین  $A_{eff}$  نیز از همان سه استاندارد که در بخش‌های قبل ارائه شد استفاده می‌شود و مقدار سطح مقطع مؤثر که توانایی دفع جریان صاعقه را داشته باشد را تعیین نمود. در شکل ۴ نحوه تعیین  $A_{eff}$  برای دو حالت مختلف اتصال به سیستم‌های زمین نوع شبکه آورده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است از استاندارد ضریب ضربه استفاده شده است یعنی در هر کدام از منحنی‌های مقاومت ویژه خاک هر نقطه‌ای که مقدار A برابر یک باشد مقدار سطح مقطع مؤثر تعیین می‌شود [۱۵].



(الف)



(ب)

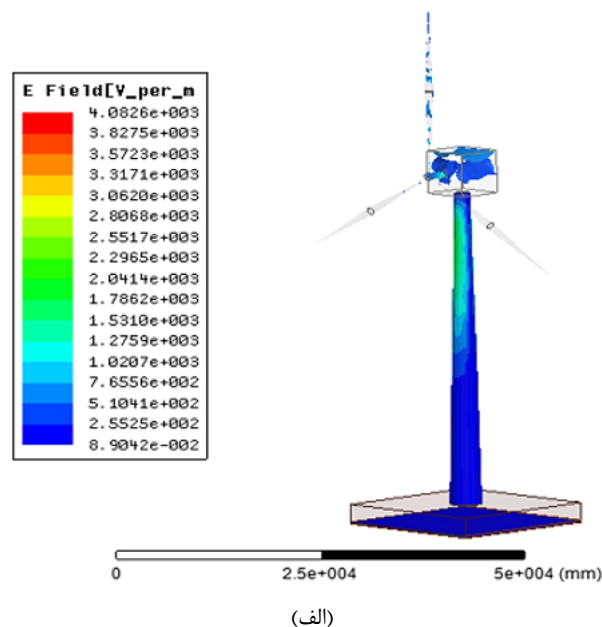
شکل ۴ نحوه منحنی A برای حالت اتصال به مرکز شبکه [۱۵]

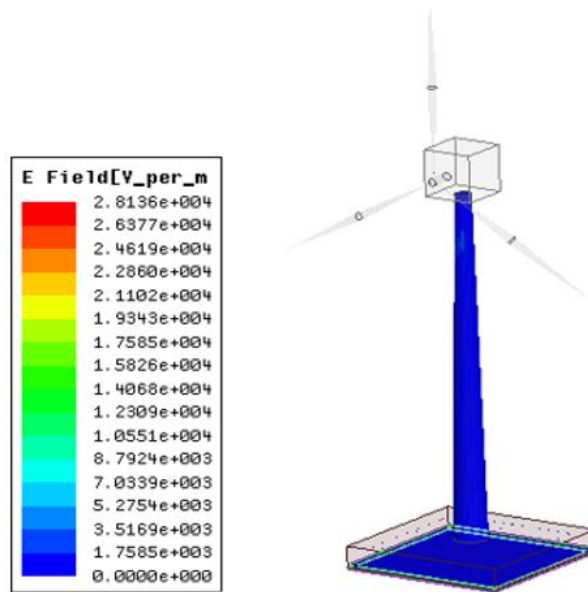
فرکانس به جریان صاعقه وابسته است و برای جریان اولین ضربه صاعقه این مقدار ۱۲۴ کیلوهرتز و جریان ضربه بعدی ۵۱۶ کیلوهرتز می‌باشد. شکل ۴ ساختار یک خاک دولایه متفاوت را در نرم‌افزار نشان می‌دهد. خاک لایه اول دارای ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی ۱۰ و رسانایی ۰/۱ می‌باشد. لازم به ذکر است که ابعاد هر لایه خاک ۲۰×۲۰ و ارتفاع آن ۲/۵ متر می‌باشد.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل پارامتری

در این بخش به بررسی و تحلیل توزیع میدان بر روی قسمت‌های مختلف توربین، نمودار میدان الکتریکی روی اجزای مختلف توربین و نمودار ولتاژ برحسب فرکانس توربین پرداخته می‌شود. شکل ۵ نحوه توزیع میدان الکتریکی روی اجزای توربین بادی در خاک‌های ساده با و بدون الکترودها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توزیع میدان در این حالت بر روی پره‌ها تضعیف‌تر شده است. شکل ۵ (الف) نحوه توزیع میدان در خاک ساده با الکترودهای به شکل دایره و استوانه متصل را نشان می‌دهد. در این حالت میدان ایجاد شده بر روی پره‌ها و توربین به شدت ضعیف شده است همچنین توزیع میدان بر روی برج هم نسبت به حالت‌های قبل ضعیف‌تر شده است.

همان‌طور که از روی نمودارهای میدان قابل مشاهده است می‌توان نتیجه گرفت زمانی که در سیستم زمین از الکترودها استفاده نشده است میدان در قسمت‌های مختلف توربین قوی‌تر است و این میدان باعث آسیب رساندن به تجهیزات توربین بادی می‌شود. شکل ۵ (ب) نحوه توزیع میدان در خاک ساده با الکترودهای به شکل دایره و استوانه متصل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع میدان در سیستم زمین با اضافه شدن الکترودها نسبت به حالت بدون الکترودها (الف) قوی‌تر می‌شود.





(ب)

شکل ۵ نحوه توزیع میدان الکتریکی روی توربین و زمین (الف) خاک ساده بدون الکتروود (ب) خاک ساده با الکترودهای به شکل دایره و استوانه متصل

شکل ۵ (ب) نحوه توزیع میدان در خاک ساده با الکترودهای به شکل دایره و استوانه متصل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که میدان درون خاک افزایش یافته و در سایر قسمت‌های توربین کاهش یافته است. همان‌طور که از روی نمودارهای میدان در شکل ۵ قابل مشاهده است، می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

- زمانی که در سیستم زمین از الکتروود استفاده نشده است میدان در قسمت‌های مختلف توربین قوی‌تر است و این میدان باعث آسیب‌رساندن به تجهیزات توربین بادی می‌شود.

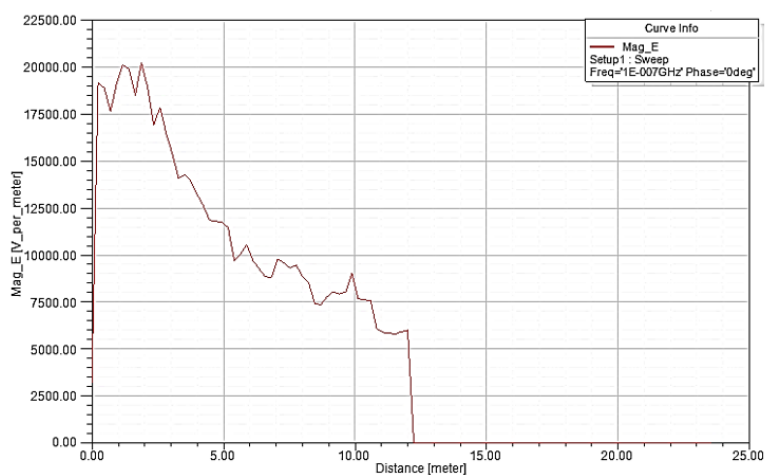
- با افزایش لایه خاک زمانی که در سیستم زمین الکتروود وجود ندارد میدان کمی قوی‌تر می‌شود و این افزایش میدان زمانی که لایه‌های خاک متفاوت می‌باشد بیشتر است.

- هنگامی که نحوه چیدمان الکتروودها به شکل دایره و استوانه متصل است میدان در تمام قسمت‌های توربین ضعیف‌تر شده است که به راحتی می‌توان مشاهده کرد که میدان روی پرها و ناسل و برج به شدت ضعیف شده است.

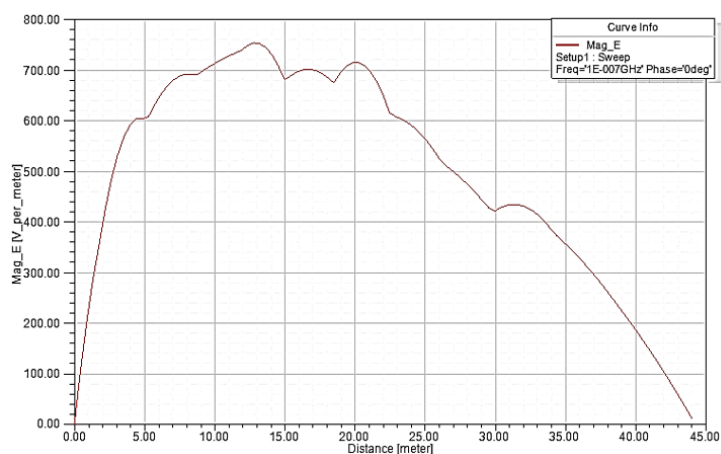
نمودار شکل ۶ میدان الکتریکی برحسب فاصله  $E(v-m)$  را برای پرها و سیستم زمین توربین بادی نشان می‌دهد. برای قسمت‌های پره و ناسل و برج و زمینی که در شبیه‌سازی جنس آن مس در نظر گرفته شده است. بر همین اساس، می‌توان نتیجه گرفت که پرها از اجزای مهم توربین بادی می‌باشند که بیشتر از سایر تجهیزات توربین در معرض خطر و آسیب‌دیدگی صاعقه می‌باشد. با برخورد مستقیم صاعقه به نوک توربین مقدار  $E(v-m)$  از بالای پره‌های توربین به پایین پرها کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. مشاهده می‌شود مقدار ماکزیمم  $E(v-m)$  بر روی پره در فاصله اولیه پره یعنی نوک پره می‌باشد که این مقدار تقریباً برابر با  $(v-m) 20000$  است.

نمودار ۶ (ب) نحوه تغییرات میدان الکتریکی ناسل توربین بادی را نشان می‌دهد، که این تجهیز بعد از پره‌های توربین بادی بیشتر در معرض صاعقه می‌باشد. با توجه به اینکه در قسمت شبیه‌سازی مسیر صاعقه از بالا به پایین در نظر گرفته شده است، نمودار  $E(v-m)$  ناسل هم همانند پرها سیر نزولی دارد تا اینکه در نزدیکی‌های قسمتی که ناسل و برج به هم وصل می‌شوند مقدار  $E(v-m)$  افزایش می‌یابد. همچنین، شکل ۷ نمودار میدان الکتریکی برحسب فاصله  $E(v-m)$  سیستم زمین را برای خاک ساده با الکترودهای به شکل دایره و استوانه متصل نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای شکل ۶ (ج) و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که

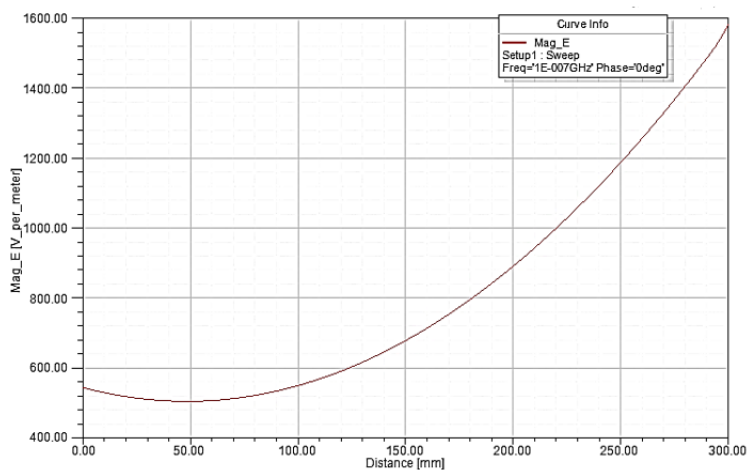
وجود الکتروود در سیستم زمین باعث تخلیه میدان حاصل از صاعقه در زمین می‌شود.



(الف)

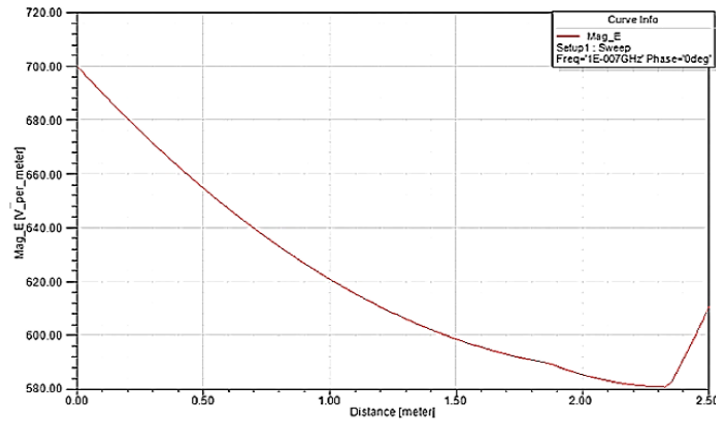


(ب)



(ج)

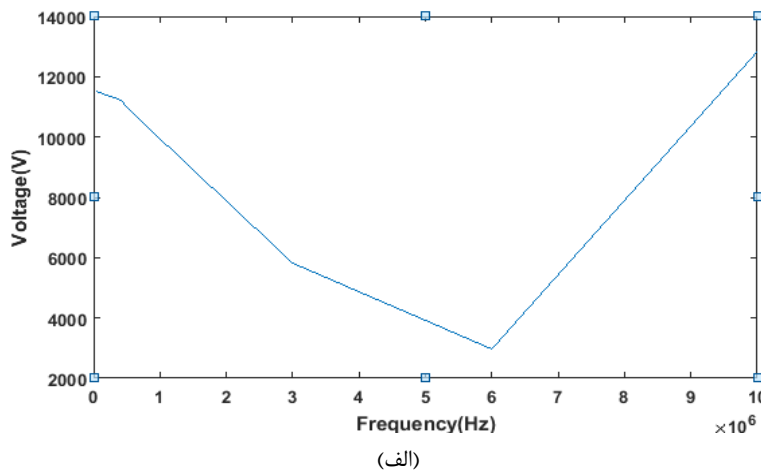
شکل ۶ نمودار میدان الکتریکی برحسب فاصله  $E(\vec{r}-m)$  برای توربین بادی با خاک ساده بر روی (الف) پره‌های توربین (ب) برج (ج) زمین

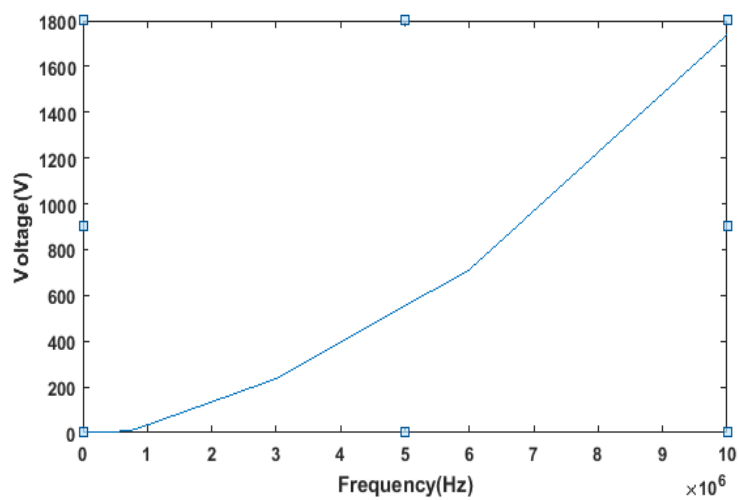


شکل ۷ نمودار میدان الکتریکی بر حسب فاصله روی سیستم زمین E(v-m) برای خاک ساده با الکترودهای به شکل دایره و استوانه متصل

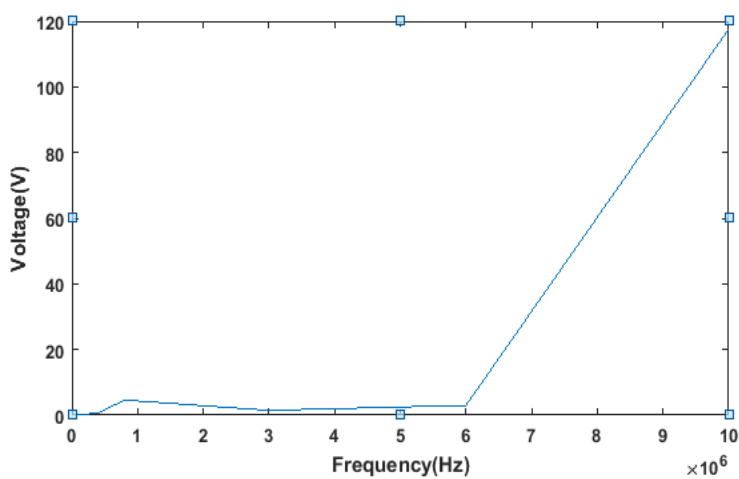
اکنون به بررسی مقدار ولتاژ در فرکانس‌های مختلف بر اجزای توربین بادی پرداخته می‌شود، برای این کار لازم است در نرم‌افزار HFSS از نوار بالا HFSS: field calculator را انتخاب کرد. سپس از قسمت Quantity، میدان E را انتخاب کرده، سپس از قسمت Scal جهت تحریک (Z) انتخاب می‌شود. و در قسمت Real، Complex، انتخاب می‌شود. سپس در قسمت Geometry، line را انتخاب کرده که در این قسمت می‌توان مقدار ولتاژ را در قسمت‌های مختلف توربین محاسبه کرد. در نهایت Run integration را انتخاب کرده و در آخر برای محاسبه ولتاژ Eval انتخاب می‌شود. به عبارتی این روش همان رابطه به دست آوردن ولتاژ از روی میدان ( $V = \int E ds$ ) است.

شکل‌های ۸ و ۹ بررسی مقدار ولتاژ در فرکانس‌های مختلف بر اجزای توربین بادی را برای دو حالت خاک ساده بدون الکتروود و با الکتروود نشان داده است. در بررسی نمودار ولتاژ بر حسب فرکانس (v-f) برای پره‌های توربین مشاهده می‌شود که بیشترین ولتاژ ناشی از برخورد صاعقه بر این قسمت وارد می‌شود. با افزایش فرکانس مقدار ولتاژ کاهش می‌یابد، اما در فرکانس‌های نزدیک ۶ MHz با افزایش فرکانس مقدار ولتاژ افزایش می‌یابد. با توجه به تغییرات این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین ولتاژ ایجاد شده در پره‌های توربین بادی زمانی است که فرکانس صاعقه کم یا خیلی بزرگ باشد. با مقایسه ولتاژ القاشده روی قسمت‌های مختلف توربین، خصوصاً سیستم زمین در شکل ۸ (د) و ۹ (د) برای دو حالت خاک بدون الکتروود و با الکتروود، می‌توان دریافت که استفاده از الکتروودها در زمین منجر به افزایش قابل توجه ولتاژ القا شده روی سیستم زمین می‌شود. بر همین اساس، بهتر است در طراحی این مدل سیستم زمین و نحوه چیدمان از الکتروودها استفاده شود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مشاهده شد که توزیع میدان در حالتی که در سیستم زمین از الکتروود استفاده شده است قسمت‌های مختلف توربین ضعیف‌تر است و در نتیجه این میدان باعث کاهش آسیب‌رسانی به تجهیزات توربین بادی می‌شود.

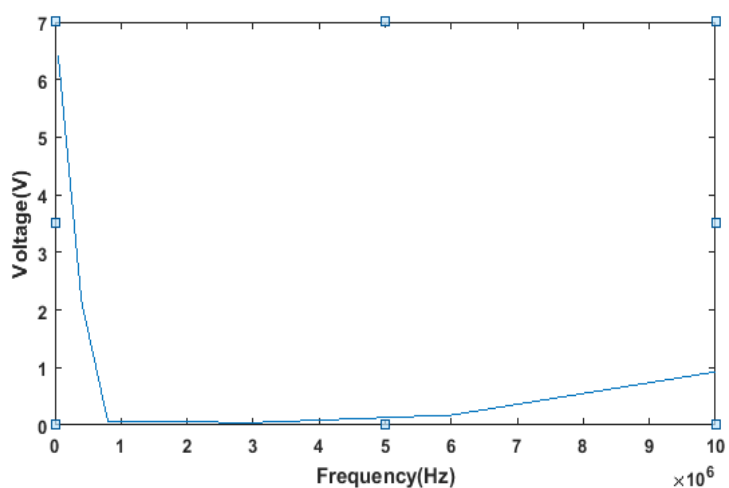




(ب)

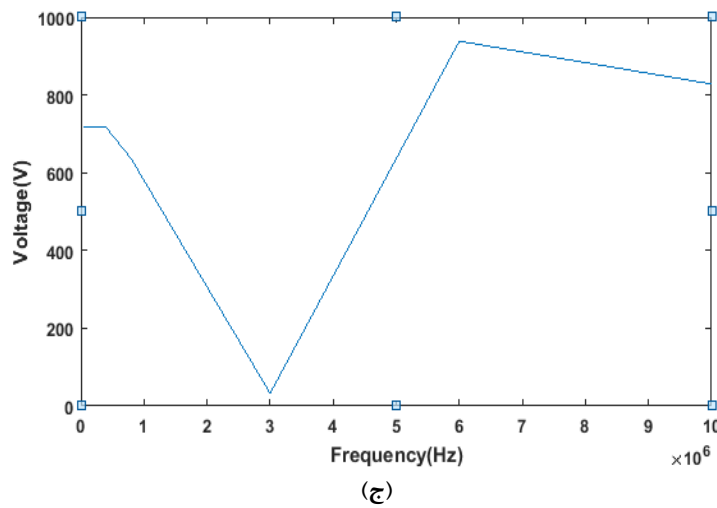
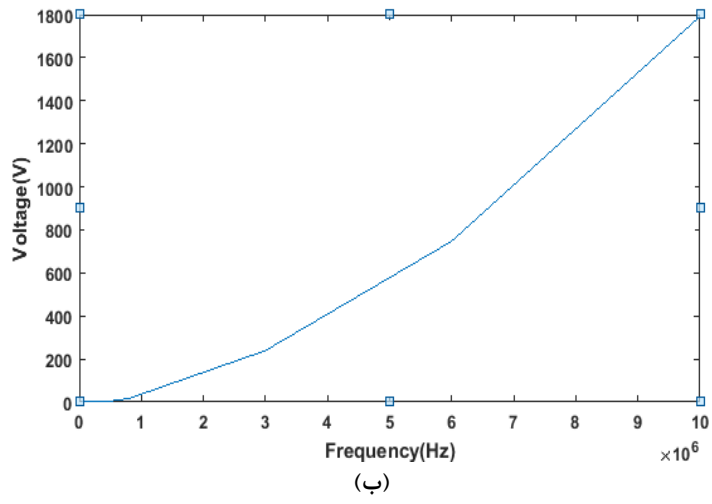
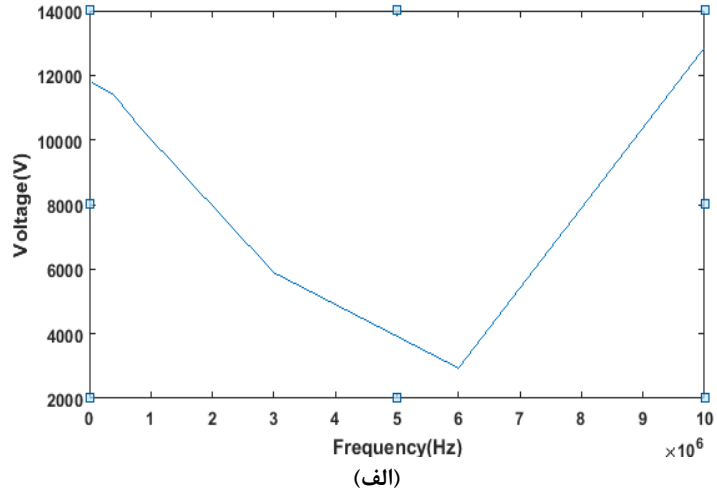


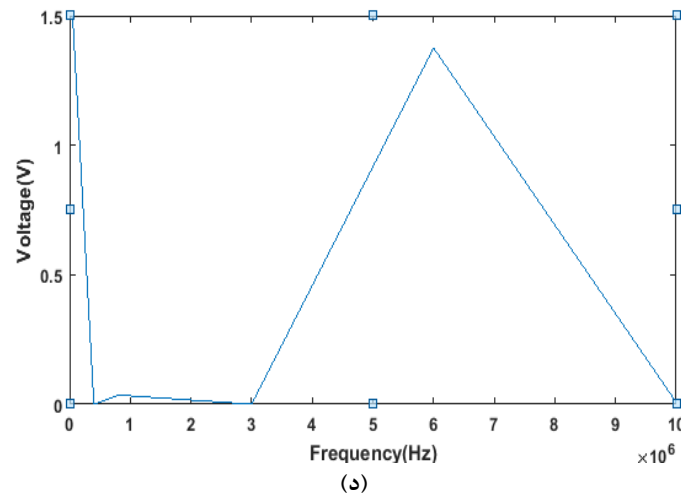
(ج)



(د)

شکل ۸ نمودارهای ولتاژ بر حسب فرکانس (v-f) برای خاک ساده بدون الکتروود (الف) پره‌ها (ب) ناسل (ج) برج (د) زمین





شکل ۹ نمودارهای ولتاژ برحسب فرکانس (v-f) برای خاک ساده با الکترودهای به شکل دایره و استوانه متصل (الف) پرها (ب) ناسل (ج) برج (د) زمین

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر برخورد مستقیم صاعقه بر روی اجزای توربین بادی با سیستم زمین خاک ساده با الکترودهای به شکل دایره و استوانه متصل شبیه‌سازی و تحلیل شد. توزیع میدان الکتریکی روی اجزای توربین بادی در خاک ساده بدون الکترودها با الکترودهایی به شکل دایره و استوانه متصل بررسی شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مشاهده شد که توزیع میدان در حالتی که در سیستم زمین از الکترودها استفاده شده است قسمت‌های مختلف توربین ضعیف‌تر است و در نتیجه این میدان باعث کاهش آسیب‌رسانی به تجهیزات توربین بادی می‌شود. در سیستم زمین با خاک تک لایه با الکترودها مقدار دامنه میدان الکتریکی به حدود ۵۰۰ ولت بر متر رسیده است. همچنین، بر اساس توزیع میدان می‌توان نتیجه گرفت که پرها از اجزای مهم توربین بادی می‌باشند که بیشتر از سایر تجهیزات توربین در معرض خطر و آسیب‌دیدگی صاعقه می‌باشد و با برخورد مستقیم صاعقه به نوک توربین مقدار میدان از بالای پرها به پایین پرها این مقدار کاهش می‌یابد. در نهایت، به بررسی مقدار ولتاژ در فرکانس‌های مختلف بر اجزای توربین بادی پرداخته شد. در بررسی نمودار ولتاژ برحسب فرکانس برای پرها توربین مشاهده شد که بیشترین ولتاژ ناشی از برخورد صاعقه بر این قسمت پرها وارد می‌شود. با افزایش فرکانس مقدار ولتاژ کاهش می‌یابد، اما در فرکانس‌های نزدیک ۶ MHz با افزایش فرکانس مقدار ولتاژ افزایش یافته و به حدود ۱/۵ ولت می‌رسد.

#### ۵- مراجع

- [1] Zhang X, Zhang Y, Xiao X. An improved approach for modeling lightning transients of wind turbines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018;101:429-38. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.04.006.
- [2] Rizk ME, Mahmood F, Lehtonen M, Badran EA, Abdel-Rahman MH. Induced voltages on overhead line by return strokes to grounded wind tower considering horizontally stratified ground. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016;58:1728-38. DOI: 10.1109/TEMPC.2016.2588000.
- [3] Li W, Xiang N, Bian K, Zhang S, Sun T, Wang Q, et al. Transient characteristics of wind turbine grounding system in high soil resistivity area due to lightning strike. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE): IEEE; 2020. p. 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279758.
- [4] Goud RD, Auditore T, Rayudu R, Moore CP. Frequency domain analysis of a wind turbine generator earthing system for lightning discharge currents. *IEEE Access*. 2019;7:60501-12. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915104.

- [5] Zalhaf A, Abdel-Salam M, Mansour D-EA, Ahmed M, Ookawara S. An Experimental Study of Lightning Overvoltages on a Small-scale Wind Turbine Model. *Energy Procedia*. 2019;156:442-6. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.089.
- [6] Wang Y, Hu W. Investigation of the effects of receptors on the lightning strike protection of wind turbine blades. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2017;59:1180-7. DOI: 10.1109/TEMC.2016.2647260.
- [7] Minowa M, Ito K, Sumi SI, Horii K. A study of lightning protection for wind turbine blade by using creeping discharge characteristics. 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP): IEEE; 2012. p. 1-4. DOI: 10.1109/ICLP.2012.6344349.
- [8] Pastromas S, Sandros K, Koutras K, Pyrgioti E. Investigation of lightning strike effects on wind turbine critical components. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE): IEEE; 2018. p. 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8642050.
- [9] Kheshti M, Ding L, Bao W, Yin M, Wu Q, Terzija V. Toward intelligent inertial frequency participation of wind farms for the grid frequency control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019;16:6772-86. DOI: 10.1109/TII.2019.2924662.
- [10] Nazari M, Moini R, Fortin S, Dawalibi FP, Rachidi F. Impact of frequency-dependent soil models on grounding system performance for direct and indirect lightning strikes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2020;63:134-44. DOI: 10.1109/TEMC.2020.2986646.
- [11] Laudani AAM, Senis EC, Lewin PL, Golosnoy IO, Kremer J, Klein H, et al. Estimation of contact resistivity in lightning protection equipotential bonding joints of wind turbine blades. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2021;63:1163-78. DOI: 10.1109/TEMC.2021.3059365.
- [12] Sabiha NA, Alsharif M, Taha IB, Elattar EE, Metwaly MK, Abd-Elhady AM. Assessment of grounding grid for enhancing wind turbine service sustainability. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021;12:577-89. DOI: 10.1016/j.asej.2020.08.005.
- [13] Grcev L. Impulse efficiency of ground electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009;24:441-51. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923396.
- [14] Yamamoto K, Sumi S, Sekioka S, He J. Derivations of effective length formula of vertical grounding rods and horizontal grounding electrodes based on physical phenomena of lightning surge propagations. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015;51:4934-42. DOI: 10.1109/TIA.2015.2434950.
- [15] Zhang Q, Tang X, Gao J, Zhang L, Li D. The influence of the horizontally stratified conducting ground on the lightning-induced voltages. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*. 2013;56:435-43. DOI: 10.1109/TEMC.2013.2284929.
- [16] Gu J, He T, Chen W, Shi W, Huang S, Bian K. Characteristics of Lightning Attachment Point Distributions on Wind Turbine Blades under Downward Lightning. 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL): IEEE; 2019. p. 1-7. DOI: 10.1109/APL.2019.8815986.
- [17] Guo Z, Li Q, Ma Y, Ren H, Fang Z, Chen C, et al. Experimental study on lightning attachment manner to wind turbine blades with lightning protection system. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2018;47:635-46. DOI: 10.1109/TPS.2018.2873200.
- [18] Zhou M, Huang J, Zhao W, Chen J, Cai L, He C, et al. Experimental evaluation of lightning attachment characteristic of two adjacent wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2022. DOI: 10.1109/TEC.2022.3230150.
- [19] Deshagani RG, Auditore T, Rayudu R, Moore CP. Factors determining the effectiveness of a wind turbine generator lightning protection system. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019;55:6585-92. DOI: 10.1109/TIA.2019.2931866.
- [20] Qin Y, Wang H, Deng Z, Zhang J, Yang R, Cai X. Control of Inertia-synchronization Controlled Wind Turbine Generators Under Symmetrical Grid Faults. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2022. DOI: 10.1109/TEC.2022.3213874.