

## Study and Analyzing the Effect of Induced Overvoltage Resulting from Direct Lightning Strike on Wind Turbine with Non-Homogenous Two-Layer Soil and Electrodes with Square Arrangement

Hossein Malekpoor<sup>1</sup>, Assistant Professor

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

### Abstract:

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 ground system of wind turbine is very important for the safety of personnel and protection of electrical equipment. In this study, the effect of direct lightning strike on wind turbine components with the ground system of a different two-layer soil with square electrodes has been simulated and analyzed. Simple soil has a relative electrical permittivity coefficient of 10 and a conductivity coefficient of 0.1. In two-layer soil, the soil of the first layer has a relative electrical permittivity coefficient of 10 and a conductivity of 0.1. The soil of the second layer has a relative electrical permittivity coefficient of 4 and a conductivity of 0.001. The overall dimensions of the wind turbine include the length of the blades 24 meters, nacelle length 6 meters, its width and height 6 meters, and the wind turbine tower is made of a steel cone with a height of 44 meters. The simulation results in the full wave HFSS software have been analyzed based on the distribution of the fields created on the wind turbine components resulting from the direct impact of lightning and the effect of overvoltage created at different frequencies. Also, the results obtained with a wind turbine including a simple ground system without electrodes have been compared. Based on this, it can be concluded that the arrangement of the electrodes and the ground resistance plays a very important role for the design of the wind turbine farm and its protection.

**Keywords:** Wind turbine, Lightning current, Ground system, Two-layer soil with electrode, Induced overvoltage

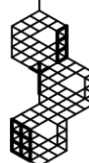
**Received:** 16 March 2024

**Revised:** 02 April 2024

**Accepted:** 01 May 2024

**Corresponding Author:** Dr. Hossein Malekpoor, h-malekpoor@araku.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.1105416



## مطالعه و تحلیل اثر اضافه ولتاژ القایی حاصل از برخورد مستقیم صاعقه بر روی توربین بادی با خاک دو لایه ناهمگن و الکترودهایی با چیدمان مربعی

حسین ملک‌پور<sup>۱</sup>، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

**چکیده:** با توجه به موقعیت قرارگیری توربین‌های بادی و شکل و ساختار آن‌ها، برخورد رعد و برق به توربین‌های بادی باعث خسارات اقتصادی جدی و خطرات امنیتی می‌شود. طراحی سیستم زمین توربین‌های بادی برای ایمنی پرسنل و حفاظت از تجهیزات الکتریکی بسیار مهم است. در این مطالعه، اثر برخورد مستقیم صاعقه بر روی اجزای توربین بادی با سیستم زمین خاک دو لایه متفاوت با الکترودهایی بصورت مربعی شبیه سازی و تحلیل شده است. خاک ساده شامل ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نسبی ۱۰ و ضریب رسانایی ۰/۱ می‌باشد. در خاک دو لایه، خاک لایه اول دارای ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نسبی ۱۰ و رسانایی ۰/۱ می‌باشد. خاک لایه دوم دارای ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نسبی ۴ و رسانایی ۰/۰۰۱ است. ابعاد کلی توربین بادی شامل طول پره‌ها ۲۴ متر، طول ناسل ۶ متر، عرض و ارتفاع آن ۶ متر، و برج توربین بادی از یک مخروط فولادی به ارتفاع ۴۴ متر می‌باشد. نتایج شبیه سازی در نرم افزار تمام موج HFSS 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 شده است. همچنین، نتایج بدست آمده با توربین بادی شامل سیستم زمین ساده بدون الکترودها 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.

**واژه‌های کلیدی:** توربین بادی، جریان صاعقه، سیستم زمین، خاک دو لایه با الکترودها، اضافه ولتاژ القایی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲

نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین ملک‌پور، h-malekpoor@araku.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.1105416





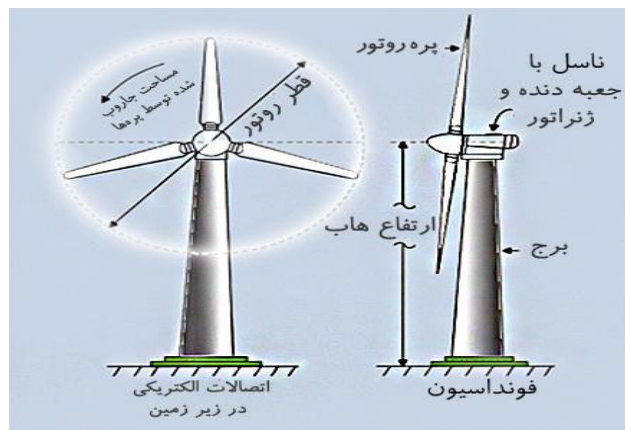
## ۱- مقدمه

نیروگاه‌های بادی یکی از گسترده‌ترین منابع انرژی الکتریکی طی چند دهه اخیر است. امروزه به دلیل لزوم نیاز به کنترل تغییرات آب و هوایی و افزایش هزینه‌های سوخت فسیلی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در سراسر جهان رشد فزاینده‌ای یافته است [۱]. همچنین، به دلیل کاهش تدریجی سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی 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 محیط زیست و انتشار گاز کربن دی اکسید کمک می‌کند [۱،۲]. یکی از عواملی که سبب نگرانی سرمایه‌گذاران در این بخش شده است مسئله برخورد صاعقه بر توربین بادی<sup>۱</sup> 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.

برخورد صاعقه<sup>۲</sup> موجب سوختگی قطعات و از کار افتادن بخشی از تجهیزات توربین یا تمام تجهیز می‌شود که این عامل باعث کاهش نرخ سودمندی و افزایش قیمت برق تولیدی از توربین بادی می‌باشد [۳]. با توجه به اینکه توربین‌های بادی برای تولید برق نیاز به باد دارند به طور طبیعی در مناطقی که مزارع توربین بادی وجود دارد اغلب مناطقی با جو پر خطر همچون صاعقه‌های شدید هستند. اضافه ولتاژی<sup>۳</sup> که بر اثر برخورد صاعقه بر توربین بادی وارد می‌شود موضوعی مهم در بحث حفاظت توربین‌های بادی می‌باشد. به طور کلی، سیستم محافظت صاعقه از سه بخش عمده شامل گیرنده صاعقه، هدایت کننده رو به پایین صاعقه و المان زمین می‌باشد. این المان‌ها باید به خوبی رسانای الکتریکی<sup>۴</sup> باشند تا بتوانند به طور ایمن صاعقه را به زمین انتقال دهند که این موضوع مربوط به سیستم‌های زمین توربین بادی می‌باشد [۴-۶]. سیستم زمین<sup>۵</sup> توربین بادی باید طوری طراحی شود تا علاوه بر دستیابی به مشخصات امیدانسی با مقادیر حالت ماندگار استاندارد، جریان صاعقه را به طور موثر به درون زمین تخلیه کند [۵].

موضوع 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 بسیار مهم است. طراحی ایمن و مقرون به صرفه 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 [۷-۲۰]. سیستم زمین یک جزء مهم برای حفظ یکپارچگی فیزیکی سازه و حفاظت از ایمنی انسان است.

سیستم زمین مجموعه‌ای از اتصالات بهم پیوسته از هادی‌ها می‌باشد که در زمین و زیر سازه قرار دارد. تعدادی الکتروده<sup>۶</sup> در زمین با توجه به مقاومت زمین در چند متری زمین دفن می‌شود که این هادی‌ها به بدنه ی تجهیزات متصل است. اگر بدنه تجهیز برق‌دار شود، جریان ناشی از آن وارد زمین شده و بدین صورت مانع برق گرفتگی می‌شود [۷]. به طور کل سیستم زمین برای کاهش مقاومت طراحی می‌شود تا بدین صورت اضافه ولتاژها و جریان‌های بزرگ با فرکانس‌های بالا را از افراد و تجهیزات دور کند.



شکل (۱): اجزای توربین بادی [۱]



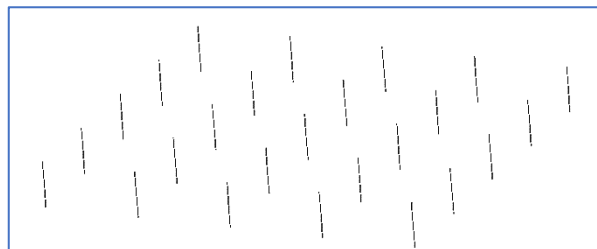


در تحقیق قبلی شبیه سازی توربین بادی در نرم افزار کامسل<sup>۲</sup> انجام داده است و از جریان ۱۰۰ کیلو آمپر برای مدل سازی صاعقه استفاده کرده است [۸]. برای طراحی تیغه‌ها به طول ۲۴ متر با رسانایی  $0.04 \text{ s/m}$  در نظر گرفته شده است. ناسل این توربین بادی با توجه به نسلی به طول ۶، عرض ۶ و ارتفاع ۶ متر ساخته شده است، لایه خارجی ناسل از پلاستیک تقویت شده با ضخامت ۱۲ سانتی متر ساخته شده است. از نتایج شبیه سازی 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 قابل اعتماد برای یک توربین بادی ارائه می‌کند. برای ارزیابی طراحی سیستم زمین از برنامه کامسل استفاده می‌شود. ارزیابی طراحی سیستم زمین با جریان ۱۰۰ آمپر به عنوان جریان مستقیم تزریقی انجام می‌شود که در آن ولتاژ در نقطه تزریق پس از اجرای شبیه سازی اندازه‌گیری شده و سپس مقاومت زمین محاسبه می‌شود. ابعاد شبکه زمین از  $20 \times 20$  متر مربع تا  $60 \times 60$  متر مربع افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در آن افزایش اندازه شبکه منجر به کاهش مقاومت زمین می‌شود. مقاومت اتصال به زمین توربین بادی باید تا حد امکان کوچک باشد تا جریان صاعقه به طور ایمن در زمین پخش شود. در این طرح، مقاومت زمین را در برابر طول الکترودهای عمودی برای طرح‌های شبکه‌های مختلف، چهار الکتروده، پنج الکتروده و سیستم‌های اتصال زمین هشت الکتروده در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که همه سیستم‌های زمین تقریباً یک الگو دارند. با این حال سیستم هشت الکترودهی کاهش بیشتری از مقاومت زمین را نسبت به سایر چیدمان‌ها دارد.

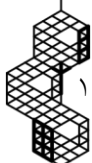
در این مقاله اثر برخورد مستقیم<sup>۳</sup> صاعقه بر روی اجزای توربین بادی با سیستم زمین خاک دو لایه<sup>۴</sup> متفاوت با الکترودهایی بصورت مربعی شبیه سازی و تحلیل شده است. خاک ساده شامل ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نسبی ۱۰ و ضریب رسانایی  $0.1$  می‌باشد. خاک لایه اول دارای ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نسبی ۱۰ و رسانایی  $0.1$  است. خاک لایه دوم دارای ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نسبی ۴ و رسانایی  $0.01$  می‌باشد. نتایج شبیه سازی در نرم افزار تمام موج فرکانس بالا<sup>۱</sup> 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 بدست آمده با توربین بادی شامل سیستم زمین ساده بدون الکتروده مقایسه شده است.

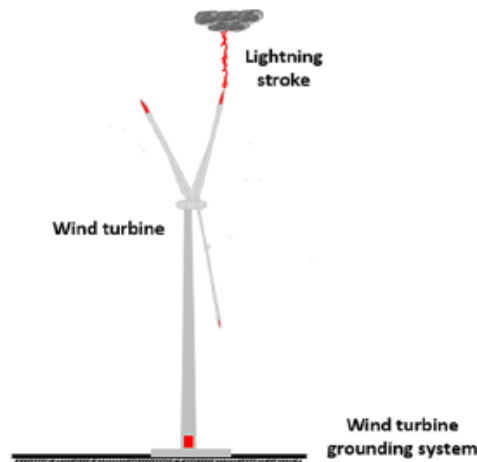
## ۲- ساختار توربین پیشنهادی، شبیه سازی برخورد صاعقه و زمین دو لایه با الکتروده

در این بخش به بررسی ساختار توربین بادی و نحوه شبیه سازی برخورد صاعقه پرداخته می‌شود. شبیه سازی‌های انجام شده برای خاک ساده و دولایه با چیدمان الکترودهای مربعی شکل انجام شده است. تحلیل‌ها بر اساس نرم افزار تمام موج فرکانس بالا برای شبیه سازی توربین بادی به همراه سیستم زمین صورت گرفته است. ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نسبی خاک ساده ۱۰ و رسانایی آن  $0.1$  می‌باشد. همچنین، ابعاد لایه خاک  $20 \times 20$  متر مربع و ارتفاع آن  $2/5$  متر می‌باشد. نحوه چیدمان الکترودها در لایه خاک بصورت مربعی در شکل (۲) نشان داده شده است. جنس این الکترودها در نرم افزار تمام موج فرکانس بالا، 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. تعداد این الکترودها با چیدمانی به شکل مربع برابر با ۲۰ می‌باشد.

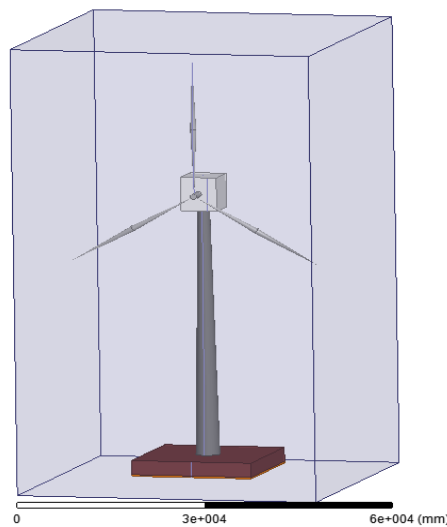


شکل (۲): الکترودهایی با چیدمان مربعی در سیستم زمین





(الف)



(ب)

شکل (۳): ساختار توربین بادی شبیه سازی شده (الف) برخورد صاعقه (ب) در نرم افزار تمام موج

ابعاد کلی توربین بادی شامل طول تیغه ها ۲۴ متر، ناسلی به طول ۶ متر، عرض ۶ متر و ارتفاع ۶ متر می باشد. 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 می باشد. مطابق شکل (۳)، جریان صاعقه در نرم افزار تمام موج فرکانس بالا بر اساس معادله ۱ مدل شده است. به همین منظور، موج تابشی به ساختار سه بعدی توربین بادی بعنوان صاعقه از طریق وجه بالایی یک جعبه مکعبی که توربین را احاطه کرده است تابیده می شود.

(۱)

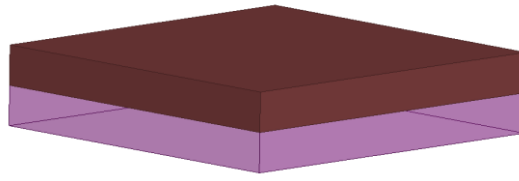
$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

که در آن  $I_0=32594.63 \text{ A}$ ،  $\alpha=25738.46 \text{ S}^{-1}$  و  $\beta=1618545 \text{ S}^{-1}$  می باشد.

آقای گرشو ابتدا مطالعه ای بر روی سیستم های زمین از نوع میله ای با وجود خاک معمولی انجام داده اند و پس از تطابق منحنی های به دست آورده و بررسی نتایج شبیه سازی شده رابطه ی 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 موثر هنگامی به دست می آید که ضریب ضربه برابر با یک باشد رابطه محاسبه طول موثر به صورت زیر می شود:



شکل (۴): طراحی ساختار خاک دو لایه متفاوت در نرم افزار

$$L_{eff} = \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (۳)$$

(۴)

$$\alpha = 0.025 + e^{-0.82 * (\rho * T)^{0.257}} \quad (۵)$$

(۵)

$$\beta = 0.17 + e^{-0.22 * (\rho * T)^{0.555}} \quad (۶)$$

(۶)

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

$$L_{eff} = 1.4 \sqrt{\rho T} \quad (۷)$$

(۷)

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

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

(۸)

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

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

(۹)

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

بنابراین طول موثر به دست می‌آید:

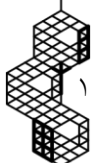
(۱۰)

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

$$B = b\sqrt{\frac{2a}{\mu}} \quad (۱۱)$$

منظور از خاک چند لایه این است که خاک اطراف الکتروود زمین دارای لایه‌های مختلفی (چه به صورت افقی و چه عمودی) است که هر لایه یک لایه الکترومغناطیسی متفاوت دارد. از آنجا که در خاک‌های چند لایه هر لایه از خاک یک مقاومت ویژه و ضریب دی الکتریک متفاوت دارد، در نتیجه بر روی عملکرد سیستم زمین کننده اثر می‌گذارد و برای بهبود محاسبات و تحلیل باید این خاصیت در نظر گرفته شود.

در اینجا می‌توان یک خاک دو لایه را به یک خاک تک لایه با یک مقاومت ویژه معادل تقریب زد. رابطه‌ی زیر نحوه‌ی محاسبه مقاومت ویژه معادل را نشان می‌دهد [۱۵]:





(۱۲)

$$\rho_{eq} = \frac{1}{\sigma_1} \left[ \frac{(\sqrt{\sigma_1 + \sigma_2}) + (\sqrt{\sigma_1 - \sigma_2}) e^{-\frac{2h_1}{\delta}}}{(\sqrt{\sigma_1 + \sigma_2}) - (\sqrt{\sigma_1 - \sigma_2}) e^{-\frac{2h_1}{\delta}}} \right]^2$$

(۱۳)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma_1}}$$

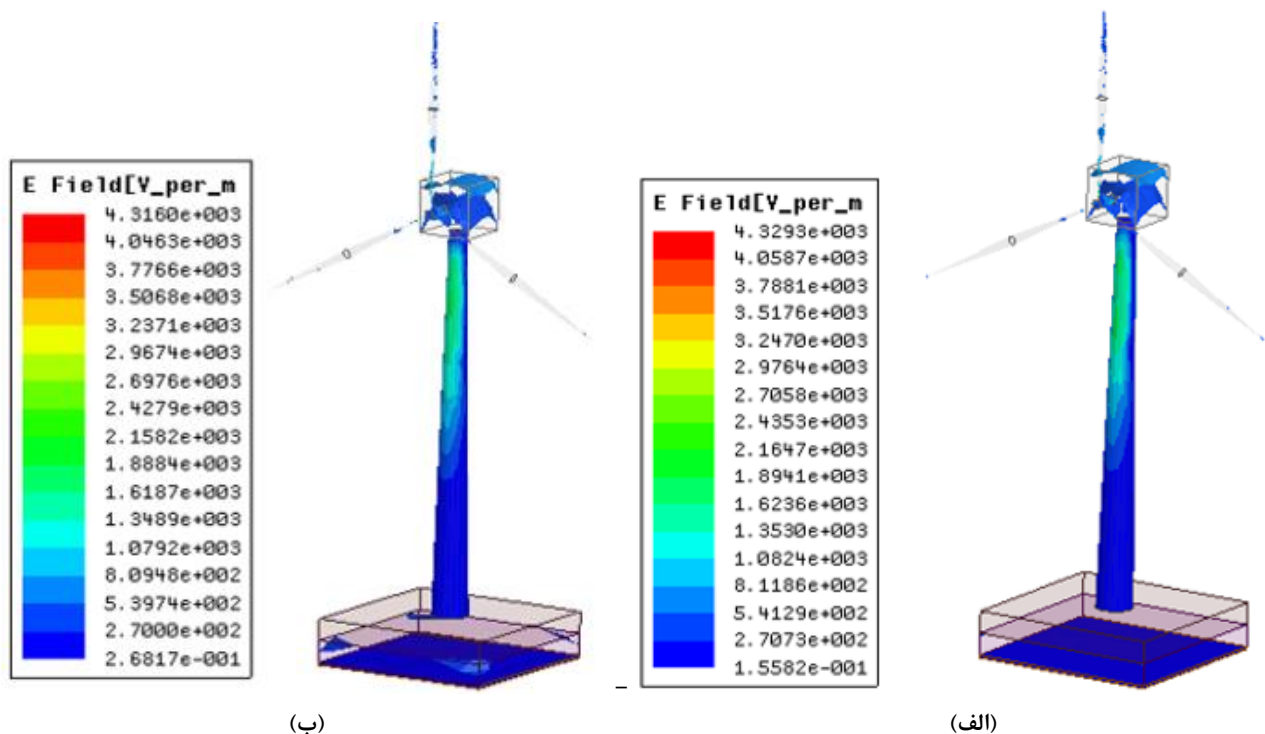
که ضخامت لایه به لایه  $h_1$ ، رسانایی لایه پایین  $\sigma_2$ ، رسانایی لایه بالا  $\sigma_1$ ، فرکانس  $f$ ، رسانایی معادل  $\delta_{Eq}$  و ضریب نفوذپذیری خلاء  $\mu_0$  است.

فرکانس به جریان صاعقه بستگی دارد که برای جریان اولین ضربه صاعقه این مقدار ۱۲۴ کیلوهرتز و برای جریان ضربه بعدی صاعقه برابر ۵۱۶ کیلوهرتز است. شکل (۴) ساختار یک خاک دو لایه متفاوت را در نرم افزار نشان می‌دهد. خاک لایه اول دارای ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی ۱۰ و رسانایی ۰/۱ می‌باشد. خاک لایه دوم دارای ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی ۴ و رسانایی ۰/۰۰۱ است. لازم به ذکر است که ابعاد هر لایه خاک ۲۰×۲۰ متر مربع و ارتفاع آن ۲/۵ متر می‌باشد.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها

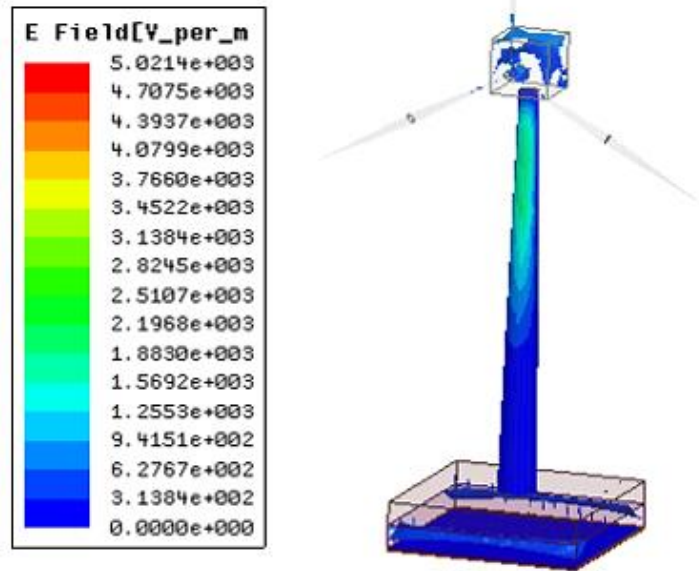
در این بخش به بررسی و تحلیل توزیع میدان بر روی قسمت‌های مختلف توربین، نمودار میدان الکتریکی روی اجزای مختلف توربین و نمودار ولتاژ بر حسب فرکانس توربین پرداخته می‌شود.

شکل (۵) نحوه توزیع میدان الکتریکی روی اجزای توربین بادی در خاک‌های دو لایه ساده و دو لایه بدون الکتروود را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توزیع میدان در این حالت بر روی پره‌ها تضعیف‌تر شده است. همانطور که از روی نمودارهای میدان قابل مشاهده است، می‌توان نتیجه گرفت زمانی که در سیستم زمین از الکتروود استفاده نشده است، میدان در قسمت‌های مختلف توربین قوی‌تر است و این میدان باعث آسیب رساندن به تجهیزات توربین بادی می‌شود. شکل (۵-الف) نحوه توزیع میدان در خاک ساده دو لایه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توزیع میدان با افزایش لایه خاک قوی‌تر می‌شود. شکل (۵-ب) نحوه توزیع میدان در خاک دو لایه متفاوت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توزیع میدان زمانی که لایه خاک بیشتر می‌شود افزایش می‌یابد.



شکل (۵): نحوه توزیع میدان الکتریکی روی توربین و زمین در (الف) دو لایه ساده (ب) خاک دو لایه متفاوت





شکل (۶): نحوه توزیع میدان الکتریکی در خاک دو لایه متفاوت با الکترودهای به شکل مربع

شکل (۶) نحوه توزیع میدان در خاک دو لایه متفاوت با الکترودهای به شکل مربع 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 ۶ قابل مشاهده است، می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

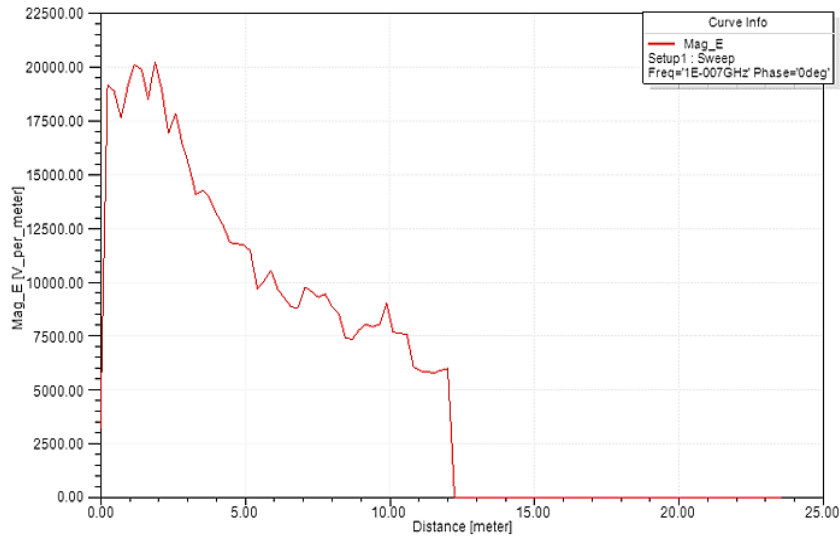
۱- زمانی که در سیستم زمین از الکترودها استفاده نشده است میدان در قسمت‌های مختلف توربین قوی‌تر است و این میدان باعث آسیب رساندن به تجهیزات توربین بادی می‌شود.

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

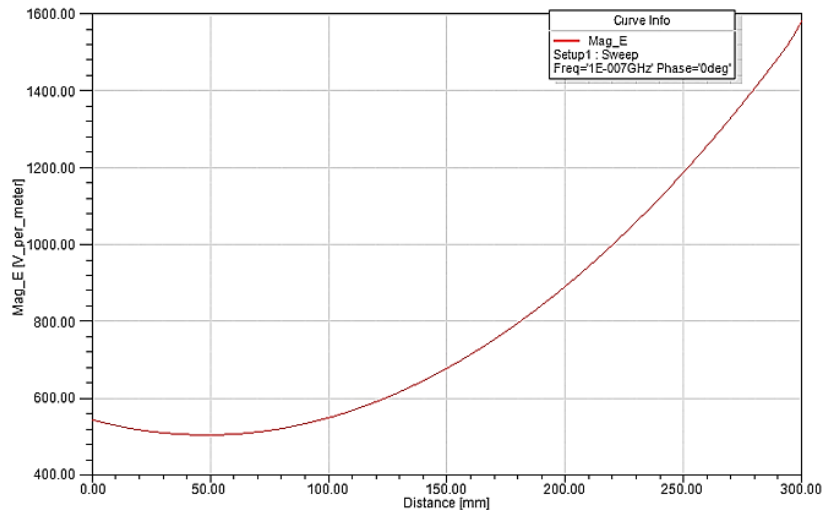
۳- هنگامی که نحوه‌ی چیدمان الکترودها به شکل مربع است با توجه به اینکه الکترودها مرکزی که در قسمت پایین برج وجود دارد سبب تقویت میدان شده و در نتیجه بهتر است در طراحی این مدل سیستم زمین و نحوه‌ی چیدمان الکترودها از الکترودها مرکزی استفاده نشود.

نمودار شکل (۷) میدان الکتریکی بر حسب فاصله  $E(v-m)$  را برای پره‌ها 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 پره‌ها از اجزای مهم توربین بادی می‌باشند که بیشتر از سایر تجهیزات توربین در معرض خطر و آسیب دیدگی صاعقه است و با برخورد مستقیم صاعقه به نوک توربین مقدار  $E(v-m)$  از بالای پره‌های توربین به پایین پره‌ها این مقدار کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. مشاهده می‌شود مقدار ماکزیمم  $E(v-m)$  بر روی پره در فاصله اولیه پره یعنی نوک پره تقریباً برابر با  $20000(v-m)$  می‌باشد. همچنین، شکل (۸) نمودار میدان الکتریکی بر حسب فاصله  $E(v-m)$  سیستم زمین را برای خاک ساده با الکترودهای دایره‌ای نشان می‌دهد. با بررسی نمودار شکل‌های (۷-ب) و (۸) می‌توان نتیجه گرفت که وجود الکترودها در سیستم زمین باعث تخلیه میدان حاصل از صاعقه در زمین می‌شود.



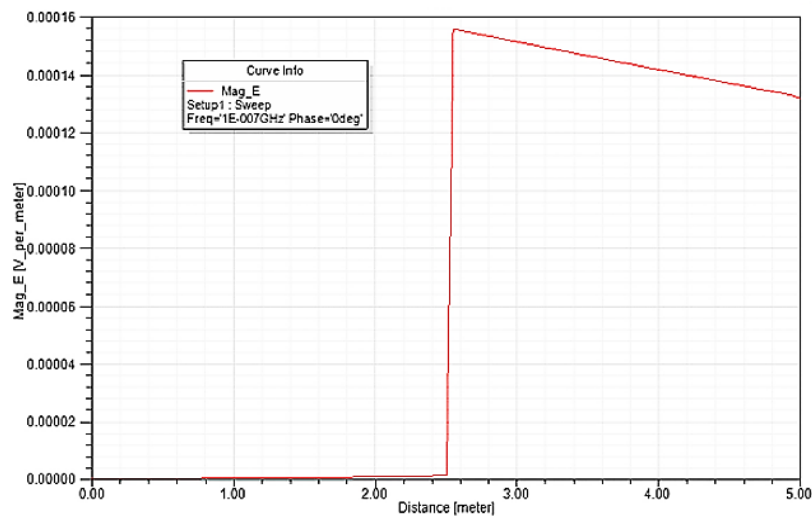


(الف)



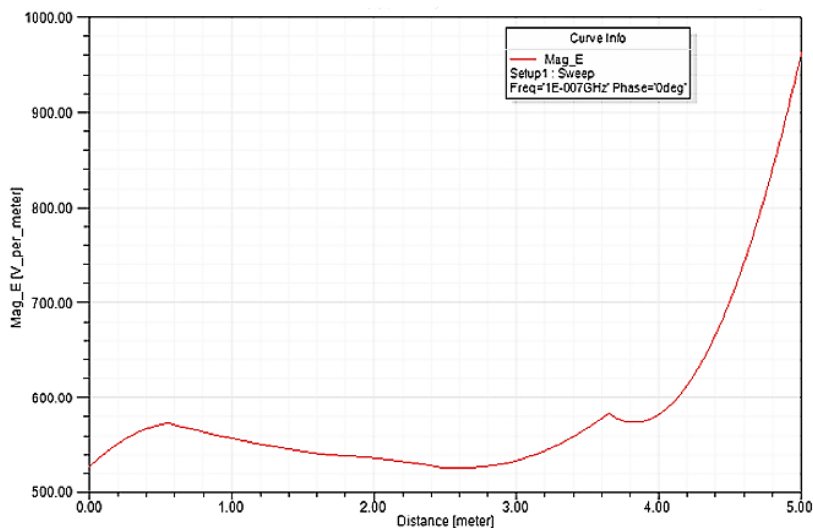
(ب)

شکل (۷): نمودار میدان الکتریکی بر حسب فاصله  $E(v-m)$  برای توربین بادی با خاک ساده بر روی (الف) پره‌های توربین (ب) زمین



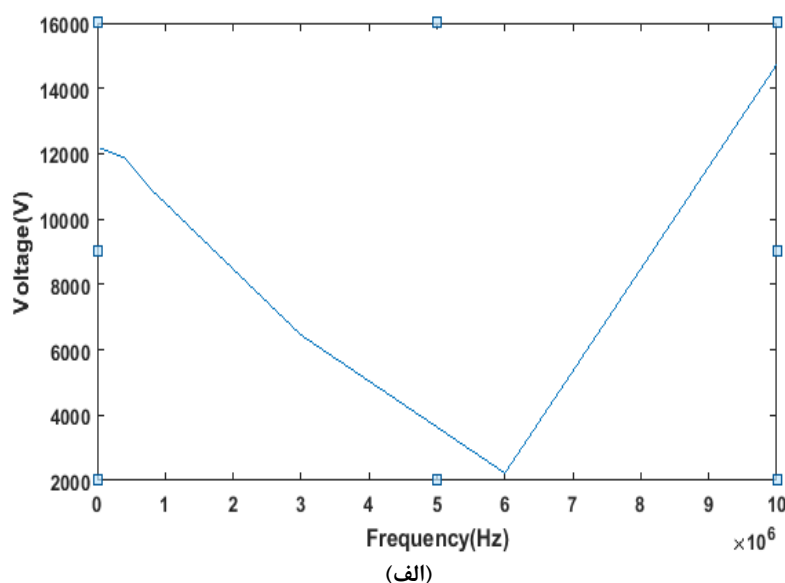
شکل (۸): نمودار میدان الکتریکی بر حسب فاصله روی سیستم زمین  $E(v-m)$  برای خاک دو لایه متفاوت

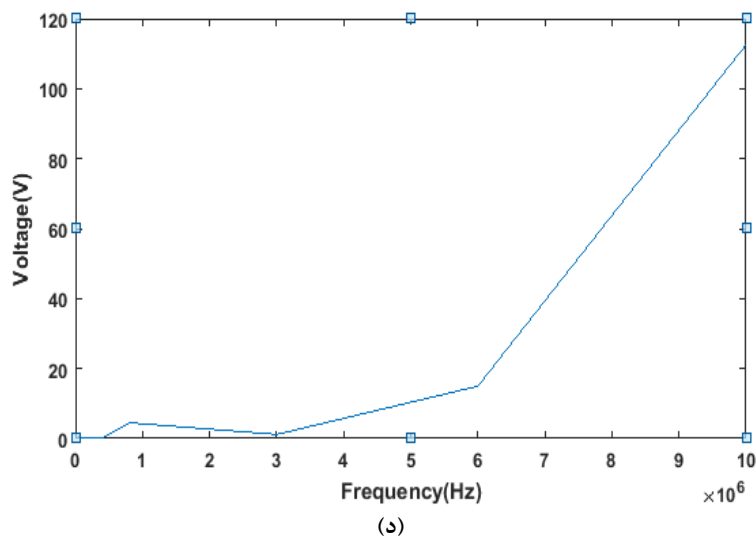
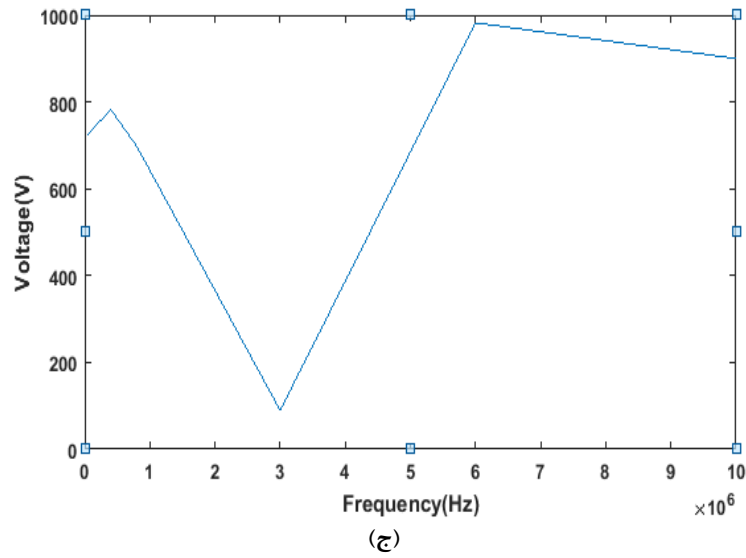
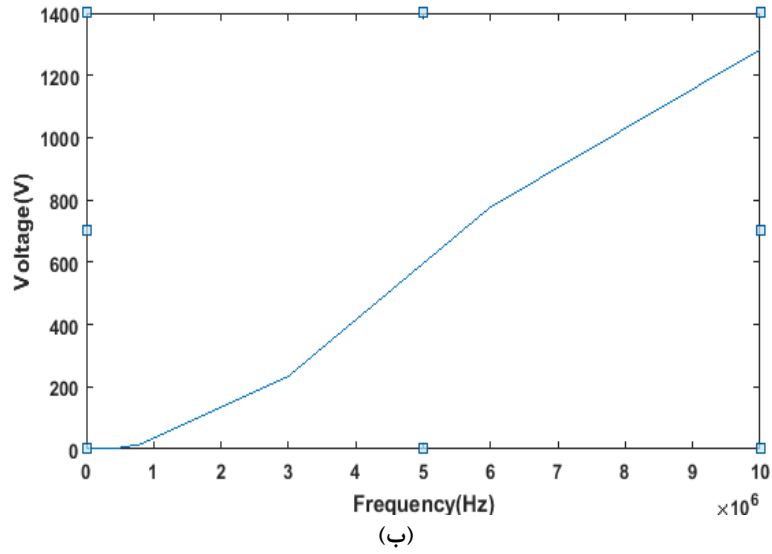




شکل (۹): نمودار میدان الکتریکی بر حسب فاصله  $E(v-m)$  برای خاک دو لایه متفاوت با الکترودهای به شکل مربع

با بررسی نمودارهای شکل (۹) می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌های دو لایه به دلیل اینکه ضریب نفوذ پذیری دو گونه خاک با هم متفاوت هستند، نمودار  $E(v-m)$  ها نیز متفاوت می‌باشد. که دلیل آن این است که چون ضریب گذردهی با میدان رابطه عکس دارد و با توجه به اینکه مقدار ضریب گذردهی در لایه ی دوم نسبت به لایه اول کمتر است، نمودار  $E(v-m)$  در لایه دوم صعودی می‌باشد. شکل (۱۰) بررسی مقدار ولتاژ در فرکانس‌های مختلف بر اجزای توربین بادی را 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 می‌گردد. 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.



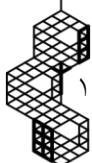
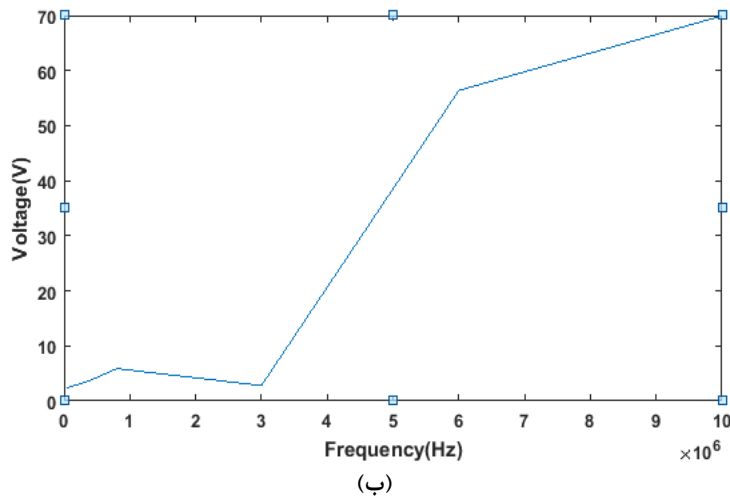
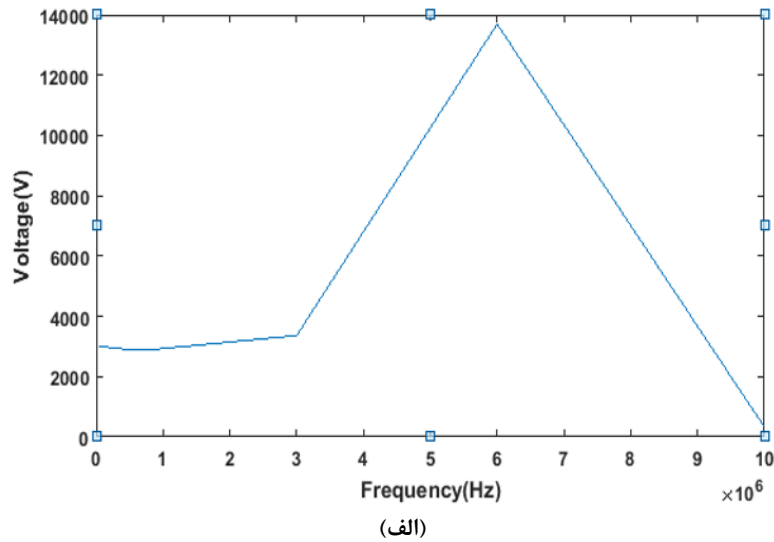


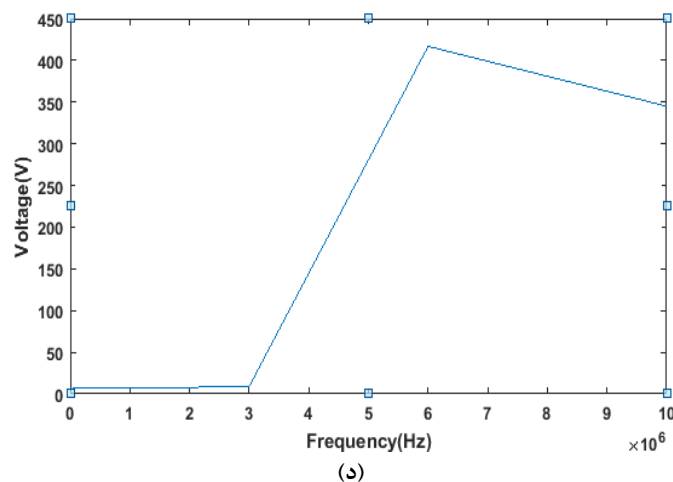
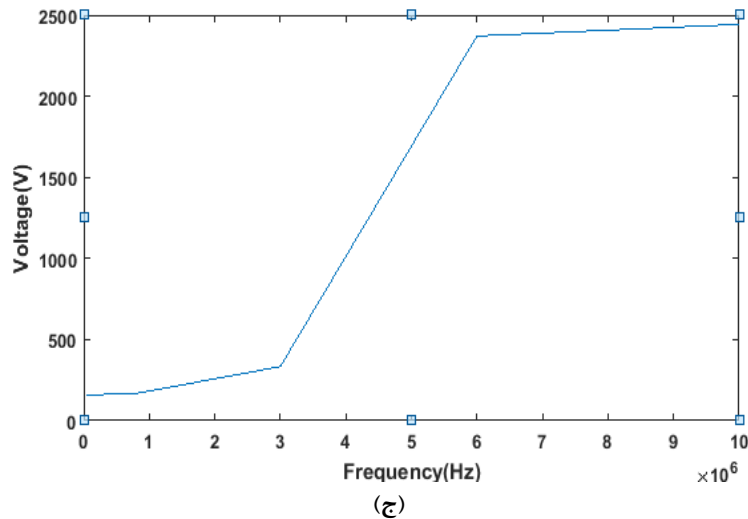
شکل (۱۰): نمودارهای ولتاژ بر حسب فرکانس ( $v-f$ ) برای خاک دو لایه متفاوت با الکترودهای به شکل مربع (الف) پرها (ب) ناسل (ج) برج (د) زمین





برای بررسی اثر تغییرات طول الکترودها روی ولتاژ القایی، نتایج شبیه سازی در شکل (۱۱) برای توربین بادی با چیدمان الکترودها به شکل مربعی را نشان داده شده است. در این حالت نتایج را زمانی که طول الکترودها از ۲/۵ متر به ۱ متر کاهش می‌یابد بررسی شده است. با مقایسه نمودارهای شکل (۸) نسبت به حالتی که چیدمان الکترودها به شکل دایره‌ای و طول آن ۲/۵ متر بود می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش طول الکترودها مقدار ولتاژ القایی افزایش می‌یابد، که این افزایش ولتاژ در همه‌ی قسمت‌های مختلف توربین به خصوص خاک مدل شده برای آن قابل مشاهده می‌باشد.





شکل (۱۱): نمودارهای ولتاژ بر حسب فرکانس  $V-f$  برای الکتروود به طول یک متر (الف) پره‌ها (ب) ناسل (ج) برج (د) زمین.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر برخورد مستقیم صاعقه بر روی اجزای توربین بادی با سیستم زمین خاک دو لایه متفاوت و با الکترودهایی بصورت مربعی شبیه‌سازی و تحلیل شد. توزیع میدان الکتریکی روی اجزای توربین بادی در خاک ساده و دو لایه با الکترودهایی به شکل مربعی و بدون آن‌ها بررسی شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مشاهده شد که توزیع میدان در حالتی که در سیستم زمین از الکتروود استفاده شده است، در قسمت‌های مختلف توربین ضعیف‌تر است و در نتیجه این میدان باعث کاهش آسیب‌رسانی به تجهیزات توربین بادی می‌شود. در سیستم زمین با خاک دو لایه مقدار دامنه میدان الکتریکی به حدود  $0.0002$  ولت بر متر رسیده است. همچنین، بر اساس توزیع میدان می‌توان نتیجه گرفت که پره‌ها از اجزای مهم توربین بادی می‌باشند که بیشتر از سایر تجهیزات توربین در معرض خطر و آسیب دیدگی صاعقه می‌باشد و با برخورد مستقیم صاعقه به نوک توربین مقدار میدان از بالای پره‌های توربین به پایین پره‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. در نهایت، به بررسی مقدار ولتاژ در فرکانس‌های مختلف بر اجزای توربین بادی پرداخته شد. در بررسی نمودار ولتاژ بر حسب فرکانس برای پره‌های توربین مشاهده شد که بیشترین ولتاژ ناشی از برخورد صاعقه بر این قسمت پره‌ها وارد می‌شود. با افزایش فرکانس مقدار ولتاژ کاهش می‌یابد، اما در فرکانس‌های نزدیک  $6 \text{ MHz}$  با افزایش فرکانس مقدار ولتاژ افزایش یافته و به بیش از  $400$  ولت می‌رسد.

- [1] X. Zhang, Y. Zhang, and X. Xiao, "An improved approach for modeling lightning transients of wind turbines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 101, pp. 429-438, 2018, doi:10.1016/j.ijepes.2018.04.006.
- [2] M. E. M. Rizk, F. Mahmood, M. Lehtonen, E. A. Badran, and M. H. Abdel-Rahman, "Induced Voltages on Overhead Line by Return Strokes to Grounded Wind Tower Considering Horizontally Stratified Ground," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 6, pp. 1728-1738, 2016, doi:10.1109/TEMC.2016.2588000.
- [3] W. Li, N. Xiang, K. Bian, S. Zhang, T. Sun, Q. Wang, L. Cheng, and D. Zhu, "Transient characteristics of wind turbine grounding system in high soil resistivity area due to lightning strike," in *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2020, pp. 1-4, doi:10.1109/ICHVE49031.2020.9279758.
- [4] R. D. Goud, T. Auditore, R. Rayudu, and C. P. Moore, "Frequency Domain Analysis of a Wind Turbine Generator Earthing System for Lightning Discharge Currents," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 60501-60512, 2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2915104.
- [5] A. S. Zalhaf, M. Abdel-Salam, D.-E. A. Mansour, M. Ahmed, and S. Ookawara, "An Experimental Study of Lightning Overvoltages on a Small-scale Wind Turbine Model," *Energy Procedia*, vol. 156, pp. 442-446, 2019, doi:10.1016/j.egypro.2018.11.089.
- [6] Y. Wang and W. Hu, "Investigation of the Effects of Receptors on the Lightning Strike Protection of Wind Turbine Blades," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 4, pp. 1180-1187, 2017, doi:10.1109/TEMC.2016.2647260.
- [7] M. Minowa, K. Ito, S. I. Sumi, and K. Horii, "A study of lightning protection for wind turbine blade by using creeping discharge characteristics," in *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2012, pp. 1-4, doi:10.1109/ICLP.2012.6344349.
- [8] S. A. Pastromas, K. Sandros, K. N. Koutras, and E. C. Pyrgioti, "Investigation of lightning strike effects on wind turbine critical components," in *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2018, pp. 1-4, doi:10.1109/ICHVE.2018.8642050.
- [9] M. Kheshti, L. Ding, W. Bao, M. Yin, Q. Wu, and V. Terzija, "Toward Intelligent Inertial Frequency Participation of Wind Farms for the Grid Frequency Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 11, pp. 6772-6786, 2020, doi:10.1109/TII.2019.2924662.
- [10] M. Nazari, R. Moini, S. Fortin, F. P. Dawalibi, and F. Rachidi, "Impact of Frequency-Dependent Soil Models on Grounding System Performance for Direct and Indirect Lightning Strikes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 1, pp. 134-144, 2021, doi:10.1109/TEMC.2020.2986646.
- [11] A. A. M. Laudani, E. C. Senis, P. L. Lewin, I. O. Golosnoy, J. Kremer, H. Klein, and O. T. Thomsen, "Estimation of Contact Resistivity in Lightning Protection Equipotential Bonding Joints of Wind Turbine Blades," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 4, pp. 1163-1178, 2021, doi:10.1109/TEMC.2021.3059365.
- [12] N. A. Sabiha, M. Alsharif, I. B. M. Taha, E. E. Elattar, M. K. Metwaly, and A. M. Abd-Elhady, "Assessment of grounding grid for enhancing wind turbine service sustainability," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 577-589, 2021, doi:10.1016/j.asej.2020.08.005.
- [13] L. Grcev, "Impulse Efficiency of Ground Electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 441-451, 2009, doi:10.1109/TPWRD.2008.923396.
- [14] K. Yamamoto, S. Sumi, S. Sekioka, and J. He, "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*, vol. 51, no. 6, pp. 4934-4942, 2015, doi:10.1109/TIA.2015.2434950.
- [15] Q. Zhang, X. Tang, J. Gao, L. Zhang, and D. Li, "The Influence of the Horizontally Stratified Conducting Ground on the Lightning-Induced Voltages," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 2, pp. 435-443, 2014, doi:10.1109/TEMC.2013.2284929.
- [16] J. Gu, T. He, W. Chen, W. Shi, S. Huang, and K. Bian, "Characteristics of Lightning Attachment Point Distributions on Wind Turbine Blades under Downward Lightning," in *2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, 2019, pp. 1-7, doi:10.1109/APL.2019.8815986.





- [17] Z. Guo, Q. Li, Y. Ma, H. Ren, Z. Fang, C. Chen, and W. H. Siew, "Experimental Study on Lightning Attachment Manner to Wind Turbine Blades With Lightning Protection System," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, no. 1, pp. 635-646, 2019, doi:10.1109/TPS.2018.2873200.
- [18] M. Zhou, J. Huang, W. Zhao, J. Chen, L. Cai, C. He, J. Wang, and J. Xue, "Experimental Evaluation of Lightning Attachment Characteristic of Two Adjacent Wind Turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, no. 2, pp. 879-887, 2023, doi:10.1109/TEC.2022.3230150.
- [19] R. G. Deshagani, T. Auditore, R. Rayudu, and C. P. Moore, "Factors Determining the Effectiveness of a Wind Turbine Generator Lightning Protection System," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 6585-6592, 2019, doi:10.1109/TIA.2019.2931866.
- [20] Y. Qin, H. Wang, Z. Deng, J. Zhang, R. Yang, and X. Cai, "Control of Inertia-Synchronization Controlled Wind Turbine Generators Under Symmetrical Grid Faults," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, no. 2, pp. 1085-1096, 2023, doi:10.1109/TEC.2022.3213874.

### زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup> Wind turbine
  - <sup>2</sup> Lightning strike
  - <sup>3</sup> Overvoltage
  - <sup>4</sup> Electrical conductivity
  - <sup>5</sup> Ground system
  - <sup>6</sup> Electrode
  - <sup>7</sup> COMSOL
  - <sup>8</sup> Direct strike
  - <sup>9</sup> Two-layer soil
  - <sup>10</sup> High-Frequency Structure Simulator (HFSS)

