طراحی حفاظت نیروگاههای خورشیدی در مقابل ضربات صاعقه با استفاده از میلههای صاعقه گیر

رضا شریعتینسب'، دانشیار، بهزاد کرمانی'، دانشجوی کارشناسی ارشد، حمیدرضا نجفی"، دانشیار

۱ - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران – Shariatinasab@birjand.ac.ir ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - Kermani@birjand.ac.ir ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - h.r.najafi@birjand.ac.ir

چکیده: با توجه به نصب سیستمهای فتوولتائیک در محیطهای باز، یکی از عوامل مهم که میتواند منجر به خرابی سیستمهای فتوولتائیک و تجهیزات آنها شود، اضافهولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه است؛ لذا نبود یک سیستم حفاظتی مناسب میتواند باعث خسارت و خرابی بخشه ای مختلف سیستم فتوولتائیک گردد. این مقاله به طراحی یک سیستم حفاظتی برای نیروگاههای خورشیدی در مقابل ضربات صاعقه با استفاده از میلههای صاعقه گیر میپردازد. در روش پیشنهادی اضافهولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه است؛ لذا نبود یک سیستم حفاظتی مناسب میتواند باعث خسارت و خرابی بخشه ای مختلف سیستم فتوولتائیک گردد. این مقاله به طراحی یک سیستم حفاظتی برای نیروگاههای خورشیدی در مقابل ضربات صاعقه با استفاده از میلههای صاعقه گیر میپردازد. در روش پیشنهادی اضافهولتاژهای القایی ناشی از برخورد صاعقه نیز در نظر گرفته میشود. برای پیادهسازی روش معرفی شده، نیروگاه خورشیدی دانشگاه بیرجند با در نظر گرفتن فواصل دقیق بین پنلها و سازه محیطی کل نیروگاه در BATLAB شبیهسازی معرفی سیست طراحی و جایابی میله صاعقه گیر با استفاده از مدل الکتروهندسی و تئوری گوی غلتان انجام گرفته است. با توجه به تصادفی بودن معرفی شده، نیروگاه خورشیدی دانشگاه بیرجند با در نظر گرفتن فواصل دقیق بین پنلها و سازه محیطی کل نیروگاه در BATLAB شبیه و سپس طراحی و جایابی میله صاعقه گیر با استفاده از مدل الکتروهندسی و تئوری گوی غلتان انجام گرفته است. با توجه به تصادفی بودن محل وقوع صاعقه در سطح زمین در محوطه نیروگاه، برای طراحی و جایابی میلههای صاعقه گیر از روش مونت کارلو استفاده شده است. مقایسه هزینه پیادهسازی طرح پیشنهادی مقاله با هزینه پیادهسازی حفاظت بهدستآمده از روشهای قبلی، مزیت اقتصادی روش مقاله را نشان میدهد.

واژدهای کلیدی: سیستمهای فتوولتائیک، حفاظت صاعقه، مدل الکتروهندسی، تئوری گوی غلتان، مونتکارلو.

Design of Lightning Protection of Photovoltaic Systems by means of Surge Rods

R. Shariatinasab, Associate Professor¹, B. Kermani, M.Sc. Student², H.R. Najafi³, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: Shariatinasab@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: Kermani@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: h.r.najafi@birjand.ac.ir

Abstract: Owing to the installation of photovoltaic systems in outdoor, transient overvoltages caused by lightning surges is one of the important factors that could lead to disruption in performance or failure of photovoltaic systems and equipment. So, lack of the proper protection system can cause failure and damage to various parts of the photovoltaic system. This paper presents the design of a protection system for photovoltaic systems against lightning surges by means of surge lightning rods. The proposed method considers the induced overvoltages caused by lightning surges. In order to perform the presented method, the solar power plant of Birjand university, taking into account the accurate distance between PV modules and surrounding structure of power plant, has been simulated in MATLAB environment. Thereafter, design and placement of lightning occurrence on the area of the power plant, the design and placement of lightning rods is based on the Monte Carlo method. By comparison the cost of the proposed protection scheme to the previous methods, the more economical of the proposed protection scheme is confirmed.

Keywords: Photovoltaic systems, lightning protection, electro-geometric model, rolling sphere theory, Monte Carlo.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۳ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۹/۸ و ۱۳۹۵/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۶ نام نویسنده مسئول: رضا شریعتینسب نشانی نویسنده مسئول: ایران- بیرجند - بلوار شهید آوینی - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱– مقدمه

افزایش هزینه سوختهای فسیلی، آلودگی زیستمحیطی نیروگاههای حرارتی و کاهش هزینههای منابع انرژی تجدیدپذیر منجر به گسترش منابع تجدیدپذیر در تأمین توان شبکههای قدرت شده است. ازاینرو استفاده از انرژیهای نو مانند باد، خورشید و غیره موردتوجه قرارگرفته است [۱].

سیستمهای فتوولتائیک از رایجترین منابع انرژی در ریزشبکهها میباشند. سیستمهای فتوولتائیک که به دو صورت متصل یا جدا از شبکه قابل بهرهبرداریاند، نقش عمدهای در فنآوریهای مرتبط با انرژیهای تجدیدپذیر دارند؛ چراکه سازگار با محیطزیست بوده و منابعی با قابلیت اطمینان بالا به شمار میآیند [۲ و ۳]. با توجه به نصب سیستمهای فتوولتائیک در محیطهای باز، یکی از عوامل مهمی که میتواند منجر به اخلال در عملکرد یا خرابی آنها شود، اضافهولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه است [۴].

نبود سیستم حفاظت مناسب در برابر ضربات صاعقه میتواند منجر به خسارتهایی در نیروگاه شود. این خسارات به گونه ای است که در بعضی موارد هزینههایی ناشی از اصابت صاعقه به نیروگاه خورشیدی با هزینه نصب و راهاندازی خود نیروگاه برابری می کند. علاوهبراین، عدم حفاظت کافی در مقابل صاعقه، زمان بازگشت سرمایه گذاری اولیه برای احداث نیروگاه را افزایش می دهد. لذا طراحی و ایجاد یک سیستم حفاظتی مناسب به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان و انتقال انرژی باکیفیت برای نیروگاههای خورشیدی ضروری به نظر می رسد.

در [۵] مروری بر مقالاتی در زمینه حفاظت سیستمهای فتوولتائیک انجام شده است که در بیشتر این مقالات تمرکز بر روی حفاظت داخلی سیستمهای فتوولتائیک شامل نصب صحیح SPDها و سیستم زمین میباشد؛ بااین حال مطالعهای در خصوص حفاظت خارجی و طراحی و جایابی میلههای صاعقه گیر برای جلوگیری از برخورد مستقیم موردتوجه نبوده است.

پژوهشهایی در رابطه با تخریب ماژولهای فتوولتائیک ناشی از اشعه ماورا بنفش، رطوبت، تغییرات دما، نمک، گردوغبار و شرایط آب و هوایی مانند باد، برف و غیره نیز در [۶–۸] انجام گرفته است.

در [۹–۱۲] نیز مدلسازی سیستمهای خورشیدی برای مطالعه تنشهای صاعقه معرفیشده، اما روش کنترل این اضافهولتاژها یا طراحی سیستم حفاظتی مدنظر نبوده است. در [۱۳] ضرورت نصب میله صاعقه گیر در یک نیروگاه خورشیدی با استفاده از تئوری زاویه ارائه شده است. استفاده از میله صاعقه گیر، کابل کشی پنلهای خورشیدی و توپولوژی مختلف نیروگاه خورشیدی بهمنظور کاهش صدمات صاعقه نیز در [۱۴] بررسی شده است. در این مرجع تمرکز بر روی سایهاندازی و کابل کشی بوده و روشی برای طراحی حفاظت ارائه نشده است. در [۵۵] طراحی حفاظت خارجی در برابر برخورد غیرمستقیم صاعقه بهمنظور کاهش اثرات ناشی از اضافهولتاژهای القایی با استفاده از تئوری قفس فارادی (تئوری مش) انجام شده است.

هرچند تاکنون عملکرد سیستمهای فتوولتائیک در برابر صاعقه در مقالات مختلفی بررسی شده است، بااین حال یا صرفاً مدل سازی نیروگاه خورشیدی و اجزای آن برای مطالعه حالت گذرا موردنظر بوده است؛ و یا در صورت استفاده از صاعقه گیر برای حفاظت، هیچ گاه تعداد میله موردنیاز و محل و ارتفاع مناسب آن از نظر فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار نگرفته است؛ به عبارت دیگر تمامی بررسی ها تنها از نظر فنی و برای یک صاعقه گیر ثابت انجام شده است. ضمن اینک ه تنها ضربات مستقیم صاعقه مورد نظر بوده و اضافه ولتازهای القایی به صورت همزمان در بررسی ها در نظر گرفته نشده اند.

این مقاله ابتدا ضرورتسنجی نصب میله صاعقهگیر با توجه به استانداردهای لازم را معرفی میکند. سپس با استفاده از تئوری گوی غلتان، طراحی سیستم حفاظتی نیروگاه خورشیدی در مقابل ضربات صاعقه با استفاده از جایابی مجموعهای از میلههای صاعقهگیر را انجام میدهد. در روش پیشنهادی، بهمنظور افزایش کارایی و دقت، تنش ناشی از اضافهولتاژهای القایی بروی پنلهای خورشیدی نیز در جایابی محل نصب میلههای صاعقهگیر در نظر گرفته میشود.

۲- ضرورتسنجی نصب میله صاعقهگیر

اولین قدم در موضوع حفاظت در مقابل برخورد مستقیم صاعقه ضرورتسنجی نیاز به نصب صاعقه گیر میباشد. دیاگرام کلی برای نحوه بررسی این ضرورتسنجی، بر اساس استاندارد NFC 17-102 [۱۶]، در شکل ۱ نشان داده شده است. در روش پیشنهادی این مقاله، کلاس حفاظت بر اساس روش گوی غلتان محاسبه می شود که در بخش های بعد توضیح داده می شود.



در دیاگرام شکل Nd ،۱ و Nc و (۱) و (۲) محاسبه می شوند.

جدول ۶: تعیین کلاس حفاظت میله صاعقه گیر [۱۸]

كلاس حفاظت	شعاع کرہ غلتانm) (m)	محدوده E
Ι	۲.	$\mathrm{E}> \cdot/4$ y
П	٣٠	${\boldsymbol{\cdot}}/{\rm PD} < E \leq {\boldsymbol{\cdot}}/{\rm PD}$
III	۴۵	${\boldsymbol{\cdot}}/{\boldsymbol{\lambda}}{\boldsymbol{\cdot}}< E{\leq}{\boldsymbol{\cdot}}/{\boldsymbol{I}}{\boldsymbol{D}}$
IV	۶.	$\boldsymbol{\cdot}/\boldsymbol{\cdot} < E \leq \boldsymbol{\cdot}/\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\cdot}$

۳- تئوری حفاظت به روش الکتروهندسی و گوی غلتان

نیروگاههای خورشیدی توسط میلههای فلزی که به میلههای صاعقه گیر معروفاند در برابر ضربات صاعقه حفاظت میشوند. سه روشِ زوایای ثابت [۱۹]، منحنیهای تجربی [۲۰] و مدل الکتروهندسی [۲۱] برای طراحی حفاظت نیروگاههای خورشیدی در برابر ضربات مستقیم صاعقه مورد استفاده قرار میگیرند.

در روش پیشنهادی این مقاله، مبنای طراحی مدل الکتروهندسی است که در آن محدوده حفاظت و همچنین کلاس حفاظت بر اساس . تئوری گوی غلتان تعیین میشود.

در مدل الکتروهندسی، فاصله برخورد یک ضربه صاعقه (r_s) که بر مدل الکتروهندسی، فاصله برخورد یک ضربه صاعقه (r_s) که به آن برابر فاصله کشیدهشده از یک لیدر پلهای تا شیءای است که به آن برخورد می کند، متناسب با جریان ضربه برگشتی، I است [T7]. (۶) $r_s = 10 \times I^{0.65}$

طبق معادله فوق فاصله برخورد پنل خورشیدی یا زمین بهصورت یک دایره با شعاع rs در نظر گرفته میشود که با جریان صاعقه رابطه مستقیمی دارد.

برای محاسبه فاصله برخورد ضربه صاعقه، می توان روش گوی غلتان [۲۳] که برای طراحی حفاظت پست در برابر صاعقه استفاده می شود را تعمیم داد. در این روش، یک کره روی محدوده نیروگاه خورشیدی غلتانده می شود که شعاع آن برابر فاصله برخورد متناسب با جریان بحرانی ضربه برگشتی است. قسمتهای برقداری که با سطح کره تماس پیدا کنند در معرض برخورد ضربات صاعقه قرار دارند. اگر سطح کره غلتان تنها سازههای حفاظتی و میلههای فلزی را لمس کند؛ نیروگاه خورشیدی به صورت کامل حفاظت شده است.

با استفاده از تئوری گوی غلتان، محدوده (پهنای) حفاظت یک میله ساده با توجه به شکل ۲ محاسبه می گردد.

$$L_p = \sqrt{h_m \ 2 \times r_s - h_m} \tag{Y}$$

که در آن hm ارتفاع میله صاعقه گیر و Lp پهنای حفاظت شده توسط میله است.

$$N_d = N_g \times A_e \times C_1 \times 10^{-6} \tag{1}$$

$$N_c = \frac{55}{C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5} \tag{(Y)}$$

که در آن ۵_۰ مساحت معادل محدوده تحت حفاظت میباشد که از (۳) محاسبه می شود.

$$A_{e} = L_{s} \times W_{s} + 6.h_{b}(L_{s} + W_{s}) + 9\pi h_{b}^{2}$$
(°)

که در آن L_s و W_s بهترتیب طول و عرض نیروگاه خورشیدی و h_b ارتفاع پنل است. N_g چگالی صاعقه در سطح زمین است که با استفاده از منحنی ایزوکرونیک طبق (۴) محاسبه می گردد [18].

$$N_g = 0.04T_d^{1.25}$$
 (f)

که در آن T_d تعداد روزهای طوفانی در سال میباشد.

مقادیر پارامترهای C1، C3، C3، C4 و C5 در رابطه (۲) نیـز طبـق جدولهای ۱ تا ۵ قابل تعیین است.

جدول ۱: مقادیر عددی پارامتر C₁ [۱۷]

محل قرارگیری سیستم فتوولتائیک	C_1
سیستم فتوولتائیک در مجاورت با درختان و ساختمانهای همارتفاع	٠/٢۵
ساختار كلى سيستم فتوولتائيك از همسايگان خود بلندتر است.	• /۵
سیستم فتوولتائیک بهتنهایی در یک منطقه نصب شده است.	١
نصب سیستم فتوولتائیک تکوتنها بر روی بلندی یک تپه و یا ارتفاعات	۲

جدول ۲: مقادیر عددی پارامتر C₂ [۱۷]

ضرايب المانهاى سيستم فتوولتائيك	C ₂
ساختار كلى سيستم فتوولتائيك فلزى است	۰/۵
ساختار كلى سيستم فتوولتائيك أتش گير است	٣
ساختار كلى سيستم فتوولتائيك تركيبي است	١

جدول ۳: مقادیر عددی پارامتر C₃ [۱۷]

تجهیزات موجود در نیروگاه خورشیدی	C ₃
بدون ارزش/ غير آتش گير	۰/۵
با ارزش استاندارد / میزان آتش گیری عادی	١
با ارزش بالا / بسیار مستعد آتش گرفتن	٢
ارزش استثنایی و غیر قابل جبران / بسیار آتش گیر (مواد منفجره)	٣

جدول ۴: مقادیر عددی پارامتر C4 [۱۷]

درصد جمعیت مشغول به کار در نیروگاه خورشیدی	C4
تقریباً خالی از جمعیت	۰/۵
با مقدار جمعیت نرمال	١
تخلیه بسیار سخت / خطر وحشتزدگی	٣

جدول ۵: مقادیر عددی پارامتر ₅Σ [۱۷]

وقوع برخورد صاعقه	C5
خدماترسانی بیوقفه نیاز نبوده و عواقبی برای نیروگاه خورشیدی ندارد.	١
خدماترسانی مداوم نیاز است ولی خطری برای نیروگاه ندارد.	۵
علاوه بر نیاز به خدماترسانی بیوقفه برای نیروگاه عواقب هم دارد.	۱٠



شکل ۲: محاسبه پهنای حفاظتی میله صاعقهگیر بهروش گوی غلتان

۴- تحلیل حفاظت نیروگاه خورشیدی

شکل ۳ چیدمان پنلها در نیروگاه خورشیدی ۲۳ MW دانشگاه بیرجند را نشان می دهد که طرح حفاظتی این مقاله برای آن پیشنهاد شده است. پنلها روی یک محدوده مستطیل شکل نصب شده و لذا سطح برخورد صاعقه مانند شکل ۳ مستطیل شکل خواهد بود. فرض می شود فاصله ای که ضربه صاعقه در امتداد آن به یک شئ اصابت می کند (فاصله برخورد) مستقل از شکل و ارتفاع شئ مورد اصابت است. به عبارت دیگر، فاصله برخورد برای سطح زمین و یا یک میله برابر بوده و طبق رابطه (۶) تنها تابعی از پیک جریان ضربه است.





۵- طراحی حفاظت صاعقه با استفاده از میله صاعقه گیر

۵-۱- حفاظت بهوسیله یک میله صاعقه گیر

اصول حفاظت یک پنل خورشیدی بهوسیله یک میله صاعقهگیر در شکل ۴ نشان داده شده است. خط 'GG سطح زمین، M نوک میله صاعقهگیر و B نقطه انتهایی پنل خورشیدی است که در ارتفاع *hb* قرار گرفته است. خط 'HH در ارتفاع *rs* از سطح زمین قرار گرفته است که فاصله برخورد متناظر با جریان حفاظت *Is* است. کمان کشیده به مرکز M و شعاع *rs* خط 'HH را در نقطه A قطع میکند. یک کمان، MDF، به مرکز A و شعاع *rs* کشیده می شود. اشیای قرار گرفته در داخل به مرکز A و شعاع *rs* کشیده می می می در اخان گرفته بعان MDF در برابر ضربات مستقیم صاعقه با دامنه بزرگتر مساوی *Is* حفاظت خواهند شد. بااین حال، این شئ باید در داخل مخروطی که از تغییر شکل کمان MDF به وجود می آید قرار گیرد.

برای پنل خورشیدی که به فاصله عرضی *xb* از میله قرار گرفته، پهنای حفاظتشده پنل (*L*p) در نمای شکل ۵ نشان داده شده است. با مشخص بودن ارتفاع میله صاعقه *گیر (hm*)، فاصله عرضی خارجی *تر*ین قسمت پنل از میله (*xb*) و ارتفاع پنل خورشیدی (*hb*) می *ت*وان پهنای حفاظتشده پنل را از نمای شکل ۵ به دست آورد.

$$L_p = 2\sqrt{r_p^2 - x_b^2} \tag{A}$$

که r_p فاصله جانبی نقطه D از میله (فاصله CD) است.



شکل ۵: نمای پلان برای محاسبه پهنای حفاظت صاعقه گیر



شکل ۴: حفاظت پنل خورشیدی توسط میله صاعقه گیر

$$\dot{L}_p = 2\sqrt{r_p^2 - x_b^2} \tag{14}$$

که $x_b = 0.5W_s$ است. با فرض اولیه $r_s = h_m = r_s$ و بنابراین $x_b' = 0.5W_s$ مقدار اولیه x_b' از (۱۵) و تعداد میلههای صاعقه گیر از (۱۶) به دست میآید.

$$\dot{r_p} = x_c - \sqrt{r_s^2 - r_s - h_b^2}$$
 (1Δ)

$$n_{mr} = 1 + \text{int} eger\left(\frac{L_s - L_p}{L_p}\right)$$
(19)

گام۲: ارتفاع میله، *hm* را به دست آورید. بعد از محاسبه *nmr،* مقدار واقعی پهنای حفاظت، *Lp*، محاسبه میشود.

$$L_p = \frac{L_s}{n_{mr} + 1} \tag{1V}$$

سپس مقدار واقعی rp با بازنویسی دوبـاره معادلـه (۱۴) و جـایگـزین کردن مقدار واقعی Lp بهجای مقدار اولیه آن (L'p) به دست میآید.

$$r_p = \sqrt{x_b'^2 + \frac{L_p^2}{4}} \tag{1A}$$

با بازنویسی معادله فوق داریم:

$$x_c = r_p + \sqrt{h_b \ 2r_s - h_b} \tag{19}$$

پس از محاسبه xc ارتفاع موردنیاز میله برابر خواهد بود با:

$$h_m = r_s - \sqrt{r_s^2 - x_c^2} \tag{(\Upsilon \cdot)}$$

گام ۳: برای حفاظت نیروگاه خورشیدی با استفاده از یک ردیف از میلههای فلزی، سه شرط زیر باید برقرار باشند:

۲- اگر $x_b = 2r_s - x_b$ در آن صورت ارتفاع پنل خورشیدی، $h_b \sim r_s - \sqrt{x_b - 2r_s - x_b}$ در آن صورت ارتفاع پنل ردیف از میلهها در وسط نیروگاه حفاظت شود.

۳- اگر x_c≻r_s در آن صورت تعداد میلهها n_mr باید بهاندازهای افزایش یابد تا این شرایط برطرف شود.

گام ۴: وظیفه میله صاعقه گیر این است که ضربات صاعقه را بهجای اصابت به تجهیزات موجود در نیروگاه خورشیدی به طرف خود جذب کنند. بنابراین میله های فلزی یک سایه حفاظتی روی تمام نیروگاه خورشیدی به وجود می آورند. به عبارت دیگر سایه میله ها مطابق شکل ۷ از مساحت اصلی نیروگاه خورشیدی فراتر می روند. اگر D نقطهای روی کمان MDF از دایرهای به مرکز A باشد، *r*p با توجه به نمای ارتفاع شکل ۵ برابر است با:

$$r_p = x_c - \sqrt{r_s^2 - r_s - h_b^2}$$
 (9)

که در آن:

$$x_{c} = \sqrt{r_{s}^{2} - r_{s} - h_{m}^{2}}$$
 (1.)

اگر پهنای حفاظت (L_p) مشخص باشد، در آن صورت میتوان ارتفاع موردنیاز میله برای حفاظت پنل را طبق (۱۱) به دست آورد.

$$h_m = r_s - \sqrt{r_s^2 - x_c^2} \tag{11}$$

که xc در آن برابر است با:

$$x_c = r_p + \sqrt{h_b \ 2r_s - h_b} \tag{11}$$

$$r_p = \sqrt{x_b^2 + \frac{L_p^2}{4}} \tag{117}$$

۵-۲- حفاظت بهوسیله یک ردیف از میلههای عمودی

با فرض اینکه سطح برخورد صاعقه به نیروگاه مطابق شکل ۶ مستطیلی به مساحت «Ls*Ws باشد؛ برای حفاظت پنلهای خورشیدی موجود در نیروگاه و تمامی تجهیزات باید تمام طول نیروگاه (Ls) در داخل دایرههای حفاظتی به شعاع rp قرار گیرد. همانطور که در نمای شکل ۵ نشان داده شده، دایره حفاظتی برش مقطعی از مخروط حفاظتی میله در ارتفاعی برابر با ارتفاع پنل خورشیدی است.



شکل ۶: سطح برخورد صاعقه نیروگاه خورشیدی و حفاظت آن بهوسیله یک ردیف از میلههای عمودی

با معلوم بودن تعداد قطعی مجاز (SOR)، *W_s L_s و h_b میتوان* ارتفاع موردنیاز میلههای صاعقهگیر (*h*m) و تعداد آنها در یک ردیف (*n*mr) را با استفاده از مراحل زیر تعیین کرد.

گام ۱۱ mmr با فرض اولیه hm=rs به دست میآید. با توجه به شـکل ۶، یک مقدار اولیه برای پهنای حفاظت، L'p، به دست میآید.



شکل ۷: ناحیه جذب یک ردیف از میلههای صاعقه گیر

با توجه به شکل ۷ داریم:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{0.5L_p}{x_c}\right); \quad \phi = \pi - 2\theta; \quad \psi = 2\theta \tag{(1)}$$

$$W_p = 2x_c \sin\theta = L_p \tan\theta \tag{(YY)}$$

مساحت A₁ برابر است با:

$$A_{1} = \pi x_{c}^{2} \frac{\varphi}{2\pi} - 0.25 L_{p}W_{p}$$
 (YT)

مساحت A2 برابر است با:

$$A_2 = \pi x_c^2 \frac{\psi}{2\pi} - 0.25 \ L_p W_p$$
 (YF)

مجموع مساحت جذب (محافظتشده) برابر خواهد بود با:

$$A_{ta} = 2n_{mr}A_1 + 2A_2 + L_s W_p \tag{7\Delta}$$

۶- شبیهسازی و نتایج

طراحی و جایابی میلههای صاعقهگیر در این مقاله با استفاده از مدل الکتروهندسی و استفاده از شبیهسازی مونتکارلو انجام میشود. مونتکارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونهگیری تصادفی متغیرهایی که ماهیت آماری دارند برای محاسبه نتایج استفاده میکند [۲۴]. روش مونتکارلو بهمنظور جایابی مناسب میله صاعقهگیر در نیروگاه خورشیدی شامل مراحل زیر است:

- تولید تصادفی محل وقـوع صـاعقه در سـطح زمـین (در محـدوده نیروگـاه خورشـیدی). مختصـات (x,y) محـل وقـوع صـاعقه در محدوده نیروگاه با فرض توزیع یکنواخت بـر روی سـطح برخـورد صاعقه در محدوده نیروگاه با فرض توزیع یکنواخت بـر روی سـطح برخـورد ماعقه در محدوده نیروگاه با فرض توزیع یکنواخت بـر روی سـطح برخـورد رطول نیروگاه) و مقدار x از صفر تـا *W* (عـرض نیروگـاه) بـهطور تصادفی تغییـر مـیکنـد. طـول و عـرض نیروگـاه خورشـیدی در دانشگاه بیرجند طبق شکل ۳ برابر ۳۸ و ۲۵ متر است.
- یک موقعیت اولیه برای میله صاعقه گیر در نظر گرفته می شود. پس از آن در هر بار اجرای برنامه، متناسب با محل برخورد صاعقه به زمین در آن اجرا، فواصل برخورد برای میله صاعقه گیر، سطح زمین و پنلهای خورشیدی متناظر با دامنه جریان در آن اجرا محاسبه می شود. اگر میله در آن موقعیت تمامی ضربات با دامنه

بزرگتر از جریان بحرانی را پوشش دهد محل آن مناسب بـوده و در غیر این صورت محل میله و یا تعـداد آن تغییـر کـرده و رونـد مورداشاره دوباره تکرار میشود.

طبق استاندارد 3-6230 IEC [۱۸] برای نیروگاههای خورشیدی سطح حفاظت II انتخاب میشود که شعاع گوی غلتان (۲۰) در آن مطابق جدول ۶ برابر ۳۰ ۳ است. با معلوم بودن ۲۰ جریان بحرانی متناظر آن از رابطه (۶) به دست میآید. مبنای طراحی حفاظت نیروگاه خورشیدی با استفاده از میله صاعقه گیر، جریان بحرانی و حداکثر جریان عبوری مجاز ناشی از القای ولتاژ در دیودهای بای پس پنل می باشد. به این ترتیب که تعداد میلهها باید به گونه ای انتخاب شود که با استفاده از تئوری گوی غلتان تمامی محدوده نیروگاه توسط چتر حفاظتی میله ها پوشش داده شود؛ از طرفی کم ترین فاصله میله ها از پنل ها نیز باید به گونه ای باشد که در صورت اصابت صاعقه به میله، جریان عبوری ناشی از القای ولتاژ میله از پنل در بخش ۱–۶ توضیح داده می شود.

مراحل کلی روش طراحی پیشنهادی برای حفاظت نیروگاه خورشیدی با استفاده از میله صاعقه گیر در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: فلوچارت طراحی حفاظت نیروگاه خورشیدی

شکل ۹ مدل سازی نیروگاه خورشیدی دانشگاه بیرجند که طبق شکل ۳ متشکل از ۸ پنل خورشیدی است را در مقیاس ۱/۴۰ در محیط MATLAB نشان میدهد. شکل ۱۰ نیز توزیع ضربات مستقیم صاعقه برخوردی به زمین در محدوده نیروگاه را با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو نشان میدهد. با توجه به شکل ۱۰ کاملاً مشخص است که در صورت نبود سیستم حفاظتی در مقابل ضربات مستقیم صاعقه، ضربات صاعقه که به صورت نقاط آبی رنگ نشان داده شده است به نیروگاه و تجهیزات آن برخورد کرده و درنتیجه امکان از بین رفتن تجهیزات و قطعی شبکه وجود خواهد داشت.



شکل ۹: شبیهسازی نیروگاه خورشیدی دانشگاه بیرجند در محیط MATLAB



شکل ۱۰: توزیع ضربات مستقیم صاعقه برخوردی به محدوده نیروگاه

P-I- حفاظت یک پنل خورشیدی به وسیله یک میله صاعقه گیر با فرض اینکه پهنای حفاظت (L_p) مشخص نبوده و چگالی صاعقه در سطح زمین برابر یک باشد ($I_g = N$)؛ طبق استاندارد 3-62305 IEC فاصله برخورد برابر m ۳۰ در نظر گرفته می شود که در نتیجه جریان بحرانی متناظر با آن از رابطه (۶) برابر ۸۴ kA می باشد. با توجه به فاصله برخورد به دست آمده و استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۳)، یک میله صاعقه گیر به ارتفاع m ۱۰ $m = 1 \cdot m$ دارای شعاع حفاظتی m P = 5/00 m پهنای حفاظت m I = 1/7 دواهد بود. مقادیر طراحی به دست آمده برای میله صاعقه گیر در جدول ۷ ارائه شده است. شکل ۱۱ ناحیه جذب صاعقه گیر موردنظر را به صورت دایره قرمزرنگ نشان می دهد که شعاع حفاظتی منتجه، از برخورد مستقیم صاعقه به اجسامی که در آن قرار گرفته باشند جلو گیری می کند.

جدول ۷: طراحی میله صاعقهگیر در صورت مشخص نبودن یهنای حفاظت

						-
Is	rs	Lp	rp	Xc	Xb	
(kA)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
۵/۴	٣٠	۷/۳۸	۶/۵۵	22/28	۵/۴۲	$h_m = v \cdot m$



شکل ۱۱: ناحیه جذب میله صاعقهگیر به ارتفاع ۱۰ متر اگر پهنای حفاظت (L_p) مشخص باشد، با توجه به تئوری حفاظت توضیح داده شده در بخش ۵، در آن صورت می توان ارتفاع موردنیاز میله (h_m) برای حفاظت پنل خورشیدی را به دست آورد. تا زمانی که $m = r_s$ شود، با افزایش ارتفاع میله کارائی حفاظتی آن نیز افزایش یافته و پس از آن ثابت می ماند. اگر پهنای حفاظت پنلهای خورشیدی (L_p) با عرض خود پنل برابر فرض شود که طبق شکل ۳ برابر ۴/۳۰ متر است؛ در آن صورت برای حفاظت یک پنل مجزا به یک میله صاعقهگیر نیاز خواهد بود که ارتفاع آن طبق رابطه (۱۱) بایستی برابر ۹/۰۳۳ متر باشد. شکل ۱۲ حفاظت پنل خورشیدی با استفاده از این میله را نشان می دهد. پارامترهای موردنیاز برای محاسبه ارتفاع میله نیز در جدول ۸



شکل ۱۲: حفاظت یک پنل خورشیدی با استفاده از یک میله صاعقهگیر

جدول ۸: طراحی میله صاعقهگیر برای یک پنل خورشیدی

I _s	r _s	L _p	r _p	x _c	x _b	
(kA)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
۵/۴۰	٣٠	۴/۳۰	۵/۸۳	51/40	۵/۴۲	ارتفاع میله محاسبهشده ۹/۰۳۳ متر

در صورت برخورد صاعقه به میله صاعقه گیر، به دلیل القای ولتاژ در قسمتهای مختلف پنل، احتمال آسیب دیدگی دیودهای بای پس در سلولهای خورشیدی وجود دارد. برای بررسی تأثیر ولتاژ القایی بر دیودهای بای پس از مدار معادل شکل ۱۳ استفاده می شود [۴]. در این مدار معادل فرض می شود که دیودهای بای پس و بایاس مستقیم سلول خورشیدی در جهت جریان صاعقه می باشند.



شکل ۱۳: مدل مداری برای بررسی تأثیر صاعقه روی دیودهای بای پس

جریان دیودهای بایپس از حل مدار شکل ۱۳ در حوزه لاپـلاس و تبدیل جریان از حوزه لاپلاس به زمان برابر خواهد بود با [۲۵]:

$$i_{D}(t) = \frac{L_{M} \cdot I_{P}}{L_{L}} \left[\frac{\sigma_{1} \cdot e^{-\sigma_{1}t}}{(\sigma_{1} - \sigma_{3})} + \frac{\sigma_{2} \cdot e^{-\sigma_{2}t}}{(\sigma_{3} - \sigma_{2})} + \frac{\sigma_{3} \cdot (\sigma_{1} - \sigma_{2}) \cdot e^{-\sigma_{1}t}}{(\sigma_{1} - \sigma_{3})(\sigma_{3} - \sigma_{2})} \right] - \frac{V_{int}(1 - e^{-\sigma_{1}t})}{L_{L} \cdot \sigma}$$

$$(YP)$$

که در آن:

$$\sigma_{3} = \frac{R_{tot}}{L_{L}}$$
(YY)

$$V_{tot} = n_c V_{CF} + V_{BF} \tag{(YA)}$$

در رابطه (۲۶) اندوکتانس القایی بین میله صاعقهگیر و پنل بوده [۴] و σ_2 و σ_2 ثابتهای مدلکننده زمان پیشانی و دنباله پشت موج صاعقه هستند. سایر مقادیر عددی پارامترهای مدل فوق در جدول ۹ ارائه شده است [۲۶].

جدول ۹: پارامترهای مدل ریاضی جریان دیودهای بایپس [۲۶]

مقدار عددی	توضيحات	نام پارامتر
11 V	ولتاژ شکست دیودهای بای پس	V _{BF}
۱۱V	ولتاژ شکست سلول خورشیدی	V _{CF}
١٠ μН	اندوکتانس حلقه ديود بایپس در ماژول	L_L
۱۰ mΩ	مقاومت داخلی هر سلول خورشیدی	R _{CF}
۱۱ mΩ	مقاومت داخلی دیودهای بای پس	R_{BF}
۱۲ mΩ	مقاومت معادل مدار معادل	R _{tot}
٧٢	تعداد سلولهاي خورشيدي	nc
۴/۹۹ A	ماكزيمم جريان	I _{max}

اندوکتانس القایی بین پنل و میله صاعقه گیر (LM) متناسب با فاصله میله از پنل تغییر میکند (به مرجع [۴] رجوع کنید). با استفاده

از (۲۶) جریان دیود بای پس متناسب با مقادیر مختلف اندو کتانس القایی *LM* و به عبارتی فاصله میله و پنل قابل محاسبه است (شکل ۱۴). شکل ۱۴ نشان می دهد که اندو کتانس القایی یا به عبارتی فاصله میله صاعقه گیر از پنل نقش زیادی در کاهش اثر مخرب صاعقه روی دیودهای بای پس دارد.



شکل ۱۴: تأثیر مقدار اندوکتانس القایی بر جریان دیودهای بای پس

طبق نتایج بهدستآمده درصورتی که اندوکتانس القایی کوچکتر از μH ۱۰ باشد، حداکثر جریان عبوری از دیود بای پس نیز از جریان نامی مجاز پنل یعنی ۴/۹۹ A کمتر خواهد بود. لذا ولتاژ القایی ناشی از اصابت صاعقه به میله منجر به سوختن پنل نخواهد شد. درنتیجه حداقل فاصله بین میله صاعقه گیر و پنل بایستی از ۳/۲۷ بیشتر باشد تا در صورت اصابت صاعقه به میله، پنل آسیب نبیند.

معمولاً برای کنترل اضافهولتاژهای القایی ناشی از اصابت صاعقه به زمین مجاور و تنشهای منتقل شده از طریق سیستم زمین به تجهیزات داخلی نیروگاه، مطابق شکل ۱۵ از برقگیر یا ⁽SPD استفاده میشود [۲۷]. در این مقاله نیز فرض میشود که برای حفاظت مبدلها و تجهیزات داخلی نیروگاه، تجهیزات SPD بهطور مناسب انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته و درخصوص این تنشها مشکلی وجود ندارد.





۶-۲- حفاظت نیروگاه خورشیدی بهوسیله یک ردیف از میلههای عمودی

با معلوم بودن فاصله برخورد (rs)، طول نیروگاه (Ls)، عرض نیروگاه (Ms) و ارتفاع پنل (hb) می توان ارتفاع موردنیاز میله صاعقه گیر hm و تعداد میله های فلزی در یک ردیف، nmr را محاسبه نمود. در ابتدا با فرض اولیه hm=rs مقدار اولیه L'p از (۱۴) محاسبه می شود. پس از محاسبه می در که یعداد

جذب (Ata	ناحيه	محاسبه	:17	جدول
----------	-------	--------	-----	------

((۲۵) استفاده از رابطه (۲۵) (۲۵) A _{ta} = ۳۵۴۹/۴۸ (m ²)						
$\theta^0 \qquad \boldsymbol{\varphi}^{rad} \qquad \boldsymbol{\psi}^{rad} \qquad \mathbf{W}_{\mathrm{p}}(\mathrm{m}) \qquad \mathbf{A}_1(\mathrm{m}^2) \qquad \mathbf{A}_2(\mathrm{m}^2)$						
<i>۲۶/۲۵</i>	•/479	۲/۶۶	۵۱/۶۵	۶/۴۹	۷۸۰/۴۱	



شکل ۱۷: روند کلی محاسبه تعداد و ارتفاع موردنیاز میلههای صاعقهگی

۶–۳- حفاظت نیروگاه خورشیدی بهوسیله ردیفهای موازی از میلههای عمودی

برای حفاظت نیروگاههای بزرگ چند ردیف از میلههای صاعقه گیر بهصورت موازی با پنلهای خورشیدی در دو طرف آنها مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل ۱۸ یک نیروگاه به ابعاد ۷۰×۲۵ نشان داده شده است که در آن *Wm* مساوی عرض نیروگاه بهعلاوه ۲ برابر کمترین فاصله عرضی خارجی ترین قسمت پنل از میله (*x*) می باشد. در حالت کلی برای حفاظت نیروگاه خورشیدی، تعداد ردیفهای موازی موردنیاز از (۲۹) و تعداد میله صاعقه گیر موردنیاز در هر ردیف از (۳۰) قابل محاسبه می باشد [۲۸].

در این بخش، طرح پیشنهادی مقاله برای یک نیروگاه بزرگ شامل ۶۶۰ پنل خورشیدی و ۱۳۲۰ عدد ماژول خورشیدی پیاده می شود. ابعاد محدوده نیروگاه ۴۰×۱۰۰ متر است. جدول ۱۳ محاسبات مربوط به تعیین تعداد ردیفهای موازی لازم و تعداد میله صاعقه گیر در هر ردیف را نشان می دهد. طبق نتایج به دست آمده، برای حفاظت این میلههای صاعقهگیر موردنیاز (*n*mr) از (۱۶) به دست میآید. جدول ۱۰ دادههای بهدستآمده برای نیروگاه مورد مطالعه را نشان میدهد. همان طور که در جدول ۱۰ مشخص است، بهمنظور حفاظت نیروگاه خورشیدی دانشگاه، به ۲ عدد میله صاعقه گیر نیاز است.

جدول ۱۰: محاسبه تعداد میله صاعقهگیر موردنیاز برای

حفاظت						
Is (kA)	$r_s = x_c = h_m$ (m)	L _p (m)	r _p (m)	x _b (m)		
۵/۴	٣٠	18/42	14/19	١٢/۵		

n_mr =۲ (تعداد میله صاعقهگیر موردنیاز برای حفاظت نیروگاه)

بعد از محاسبه *m*_m مقدار واقعی *L*_p از (۱۶) و *r*_p از (۱۸) محاسبه میشود (جدول ۱۱)؛ درنهایت نیـز ارتفـاع موردنیـاز میلـه صـاعقهگیر بهمنظور حفاظت نیروگاه از (۲۰) به دست میآید که برابر ۱۶/۲۲ متـر میباشد. شکل ۱۶ حفاظـت نیروگـاه خورشـیدی بـا اسـتفاده از میلـه صاعقهگیر محاسبهشده را نشان میدهد.

جدول ۱۱: محاسبه ارتفاع موردنیاز میله صاعقهگیر برای

r _s	x _c	L_p	r _p	x_b
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
٣٠	TF/FF	17/88	14/•1	۱۲/۵

h_m=19/۲۲ (ارتفاع موردنیاز میله صاعقهگیر برای حفاظت نیروگاه)



جدول ۱۲ محاسبات ناحیه جذب میله صاعقه گیر را نشان می دهد. طبق جدول ۱۲ ناحیه جذب کلی نیروگاه خورشیدی بسیار بزرگتر از مساحت واقعی آن است. درنتیجه برای حفاظت نیروگاههای خورشیدی بزرگ و یا مناطقی که نرخ وقوع صاعقه در سطح زمین بالا است می بایست از ردیفی از میلههای صاعقه گیر که به صورت موازی باهم قرار گرفته اند استفاده نمود. در هر حال، محاسبات مربوط به تعداد و ارتفاع میله های صاعقه گیر موردنیاز طبق روش پیشنهادی مقاله که در شکل ۱۷ جمع بندی شده است قابل انجام می باشد.

نیروگاه درمجموع به ۴۲ میله صاعقه گیر با ارتفاع ۶m نیاز است که بایستی در ۷ ردیف موازی نصب شوند. شبیه سازی بخشی از نیروگاه خورشیدی موردنظر به همراه نمای پلان جایابی میلههای صاعقه گیر برای این نیروگاه در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۸: تشریح حفاظت نیروگاه خورشیدی بهوسیله ردیفهایی موازی از میلههای عمودی

جدول ۱۳: محاسبه تعداد میله صاعقه گیر و تعداد ردیف های

موازی برای حفاظت کلی نیروگاه

r _s	h_m (m)	W _m	r _p	x_b
(m)		(m)	(m)	(m)
٣٠	۶	۵۰/۸۴	٨/٨۵	۲.

n_m=۶ (تعداد میلههای صاعقه گیر در هر ردیف)

n_r=۷ (تعداد ردیفهای موازی موردنیاز)



$$n_{mr} = \operatorname{int} eger\left(\frac{L_s}{\sqrt{4r_s^2 - W_m^2}}\right) + 2 \tag{(Y \cdot)}$$

برای بررسی اقتصادی بودن طرح حفاظتی به دست آمده از روش پیشنهادی مقاله، هزینه پیاده سازی طرح پیشنهادی برای نیروگاه موردنظر با هزینه موردنیاز برای حفاظت نیروگاه های دیگر که از سایر روش ها به دست آمده در جدول ۱۴ مقایسه شده است. در این مقایسه، هزینه تمام شده نصب هر میله صاعقه گیر به ارتفاع ۶ و ۲/۵ متر به ترتیب برابر ۲/۲ و ۲/۵۵ میلیون ریال فرض شده است [۲۹–۳۰]. از طرفی برای ارتفاع ۱۲ متر به بالا، استفاده از میله ساده صاعقه گیر مرسوم نبوده و به جای آن از دکل استفاده می شود که هزینه تمام شده هر متر دکل نیز ۳ میلیون ریال در نظر گرفته شده است [۲۹–۳۰].

با مقایسه نتایج مشخص می شود که روش پیشنهادی مقاله ضمن انتخاب مناسب محل نصب میله های صاعقه گیر به گونه ای که بتوانند اثرات ناشی از تمامی ضربات مستقیم و غیرمستقیم صاعقه در محدوده نیروگاه را پوشش دهند؛ با در نظر گرفتن نسبت هزینه به مساحت، از نظر اقتصادی نیز نسبت به روش های ارائه شده در مراجع دیگر مقرون به صرفه تر می باشد. این موضوع به خصوص برای نیروگاه های بزرگ مهم است؛ چراکه انتخاب تعداد و ارتفاع میله صاعقه گیر با روش های محافظه کارانه قبلی، هزینه حفاظت نیروگاه را به صورت غیر ضروری بالا می برد.



شکل ۱۹: شبیهسازی نیروگاه خورشیدی در محیط MATLAB

هزينه تمامشده نصب ميلهها	قيمت واحد هر ميله	ارتفاع هر میله صاعقهگیر	تعداد ميله صاعقه گير	مساحت نيروگاه خورشيدي	
۱۸۰ میلیون ریال	۳۶ میلیون ریال	۱۲ متر	۵ عدد	۳۶۰ مترمربع	مرجع [١٣]
۱۸۶/۵۵ میلیون ریال	۴/۵۵ میلیون ریال	۶/۵ متر	۴۱ عدد	۲۸۲۷/۴۳ مترمربع	مرجع [۱۴]
۱۷۶/۴ میلیون ریال	۴/۲ میلیون ریال	۶ متر	۴۲ عدد	۴۰۰۰ مترمربع	طرح پیشنهادی مقاله

جدول ۱۴: مقایسه بین طرح پیشنهادی مقاله با روشهای مرسوم

- [2] N. Papanikolaou, C. Christodoulou and M. Loupis, "Introducing an improved bidirectional charger concept for modern residential standalone PV systems," *Energy Syst*, vol. 6, no. 1, pp. 21–41, 2015.
- [3] H. Shareef, A. H. Mutlag and A. Mohamed, "A novel approach for fuzzy logic PV inverter controller optimization using lightning search algorithm," *Neurocomputing*, vol. 168, pp. 435– 453, 2015.

[۴] رضا شریعتینسب، بهزاد کرمانی و حمیدرضا نجفی، «مدلسازی و

تحلیل حالت گذرای ناشی از برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه در

سیستمهای فتوولتائیک،» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷،

```
شماره ۲، صفحه ۵۸۳–۵۹۴، ۱۳۹۶.
```

- [5] C.A. Christodoulou, L. Ekonomou, LF. Gonos and N. P. Papanikolaou, "Lightning protection of PV systems," *Energy Systems*, vol. 7, no. 3, pp.1-14, 2015.
- [6] C. Ferrara and D. Philipp, "Why do PV modules fail?" *Energy Proceedia*, vol. 15, pp. 379-387, 2012.
- [7] G. J. Jorgensen and T. J. McMahon, "Accelerated and outdoor aging effects on photovoltaic module interfacial adhesion properties," *Progress in Photovoltaics*, Research and Applications, vol. 16, no. 6, pp. 519-527, 2008.
- [8] C. G. Zimmermann, "Time dependent degradation of photovoltaic modules by ultraviolet light," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 24, pp. 110-241, 2008.
- [9] N. Fallah, C. Gomes, M. Zainal, A. Ab Kadir, G. Nourirad, M. Baojahmadi and R. Ahmed, "Lightning protection techniques for roof-top pv systems," in Proceedings of. 7th International Power Engineering and Optimization Conference, Langkawi, Malaysia, pp. 3–4, June 2013.
- [10] K. Yonezawa, S. Mochizuki, Y. Takahashi, T. Idogawa and N. Morii, "Evaluation of SPDs for a PV system using the FDTD method taking concrete foundations into consideration." in Proceedings of International Conference on Lightning Protection, Vienna, Austria, pp. 1091–1094, 2014.
- [11] M. Belik, "PV panels under lightning conditions," in Proceedings of the 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, Finland, pp. 367–370, 2014.
- [12] Y. Mendez Hernandez, D. Ioannidis, G. Ferlas, T. Tsovilis, Z. Politis and K. Samaras, "An experimental approach of the transient effects of lightning currents on the overvoltage protection system in MW- class photovoltaic plants," in Proceedings of International Conference on Lightning Protection, Vienna, Austria, pp. 1972–1977, 2014.
- [13] S. Ittarat, S. Hiranvarodom and B. Plangklang, "A computer program for evaluating the risk of lightning impact and for designing the installation of lightning rod protection for photovoltaic system," in *Proceedings of 10th Eco-energy and Materials Science and Engineering Symposium*, Muang, Ubonratchathani, Thailand, pp. 318–325, 2013.
- [14] P. H. Tan and C.K. Gan, "Methods of lightning protection for the PV power plant," in Proceedings of IEEE Student Conference on Research and Development, Malaysia, pp. 221–226, 2013.
- [15] C. Zhang, Y. Tu, J. Hu, W. Sun, H. Li and S. Wang, "Study of induced overvoltage on solar arrays," in *Proceedings of 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, Chengdu, China, pp. 852-857, 2011.

۷- نتیجهگیری

در این مقاله با استفاده از مدل الکتروهندسی و تئوری گوی غلتان الگوریتمی برای طراحی حفاظت نیروگاههای خورشیدی در برابر صاعقه به کمک میلههای صاعقه گیر معرفی گردید. روش پیشنهادی با توجه به ماهیت تصادفی نقطه برخورد صاعقه به سطح زمین در محدوده نیروگاه بر پایه روش مونتکارلو پیادهسازی گردیده است.

در روش پیشنهادی نخست متناسب با سطح حفاظت انتخاب شده برای نیروگاه توسط بهرهبردار، جریان بحرانی و فاصله حفاظت موردنیاز تعیین می گردد. پس از آن متناسب با ابعاد پنلها، فاصله آنها نسبت به یکدیگر و طول و عرض محدوده نیروگاه، تعداد و ارتفاع موردنیاز میلههای صاعقه گیر قابل تعیین است.

از آنجاکه حتی در صورت استفاده از میله صاعقه گیر، به دلیل القای ولت اژ ناشی از برخورد صاعقه به میله بر روی پنل ها، احتم ال آسیب دیدگی دیودهای بای پس پنل های خور شیدی وجود دارد و مقدار این ولتاژ القایی به فاصله بین میله و پنل وابسته است؛ در روش پیش نهادی مقاله، برای جلوگیری از آسیب دیدگی پنل ها در اثر اضافه ولتاژهای القایی، حداقل فاصله موردنیاز بین میله صاعقه گیر تا پنل خور شیدی نیز تعیین و در جایابی مناسب میله های صاعقه گیر مورد استفاده قرار می گیرد.

مقایسه هزینه پیادهسازی طرح حفاظتی به دست آمده از روش پیشنهادی این مقاله برای یک نیروگاه خورشیدی بزرگ با هزینه پیادهسازی طرح حفاظتی پیشنهادشده برای نیروگاههای کوچکتر که از روشهای قبلی به دست آمده است، مزیت اقتصادی روش پیشنهادی مقاله را تأیید میکند. این موضوع خصوصاً برای نیروگاههای بزرگ مهم است. چراکه انتخاب تعداد و ارتفاع میله صاعقهگیر با روشهای محافظه کارانه قبلی، هزینه حفاظت نیروگاه را بهصورت غیرضروری بالا میبرد.

مراجع

 حسین شکری و سجاد نجفی روادانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر،» *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۱، صفحه ۲۹–۴۲، ۱۳۹۴. ى

[25] H. Haeberlin and M. Kaempfer, "Measurement of damages at bypass diodes by induced voltages and currents in PV modules caused by nearby lightning currents with standard waveform," 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, Sept. 2008.

نیروگاه، دانشگاه بیرجند، ۱۳۹۲.

- [27] International Electrotechnical Commission 62109-2 Ed. 1.0, "Safety of power converters for use in photovoltaic power systems - Part 2: Particular requirements for inverters," Geneva, 2011.
- [۲۸] رضا شریعتینسب، بهروز وحیدی و محمدرضا بانک توکلی، «حالتهای گذرای الکترومغناطیسی در سیستمهای قدرت»، انتشارات دانشگاه

صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۲.

- ۲۹] فروش انواع میلههای صاعقه گیر، آرمان نیرو، آذر ۱۳۹۵، http://armanniro.blogfa.com/tag.
- [۳۰] فروش و اجرای انواع صاعقه گیر الکترونیکی، سازه نیرو، آذر ۱۳۹۵، http://sazehniro.blogfa.com/category/1.

- [16] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. IEEE Working Group on Lightning Performance of Distribution Lines, IEEE Standard 1410-2004.
- [17] French Standard, N. F. C. "Protection against lightning. Early streamer emission air terminals," NFC 17-102. 2011.
- [18] IEC 62305, "International Standard on Protection Against Lightning", 2006.
- [19] C.F. Wagner, G.D. McCann and G.L. MacLane, "Sheilding of transmission lines,", *AIEE Trans*, Vol. 60, no. 6, pp. 313-328, 1941.
- [20] C.F. Wagner, G.D. McCann and G.L. MacLane, "Sheilding of Substations,", AIEE Trans, Vol. 61, no. 2, pp. 96-100, 1942.
- [21] A.M. Mousa and K.D. Srivastava, "A revised electrogeomtric model for the termination of lightning stroke on ground object,", in Proceedings of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, pp. 342-352, 1988.
- [22] IEEE Std. 1243, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", 1997.
- [23] M. Nassereddine and A Hellany, "Designing a lightning protection system using the rolling sphere method," in Proceedings of 9th International Conference on In Computer and Electrical Engineering, Dubai, UAE, pp. 502-506, 2009.
- [24] A. Srivastava, and M. Mishra, "Positioning of lightning rods using Monte Carlo technique," *Journal of Electrostatics*, vol. 76, pp. 201-207, 2015.

زيرنويسها

`Surge protective device