

# مدل سازی گذرای سیستم فوتوولتائیک (PV) به منظور بررسی پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در اثر برخورد مستقیم و غیرمستقیم صاعقه به قاب

حنانه ابوالقاسم پور<sup>۱</sup> علی اصغر رضی کاظمی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

[Hannaneh.abp@email.kntu.ac.ir](mailto:Hannaneh.abp@email.kntu.ac.ir)

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

[Razi.Kazemi@kntu.ac.ir](mailto:Razi.Kazemi@kntu.ac.ir)

چکیده: امروزه برای حفاظت بیشتر از محیط زیست و با توجه به آلودگی‌های حاصل از سوزاندن سوخت‌های فسیلی و همچنین به دلیل محدودیت این منابع، جهت گیری جهانی به سمت تولید انرژی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. از آن میان، استفاده از انرژی خورشیدی به دلیل پایداری نسبی، قیمت مناسب در مناطق با پتانسیل زیاد تابش روز به روز در دنیا رو به گسترش است. از طرفی، با توجه به نصب تجهیزات نیروگاه‌ای فتوولتائیک در فضای باز و پشت بام‌ها، احتمال برخورد مستقیم و یا غیرمستقیم صاعقه به این تجهیزات وجود دارد. در این مقاله، با مدل سازی دقیق قاب مبتنی بر خطوط انتقال و در نظر گرفتن عناصر پارازیتی متفاوت، اجزای متفاوت سیستم فتوولتائیک در محیط نرم افزار MAXWELL و EMTP-RV، اضافه ولتاژ گذرای ایجاد شده در اثر برخورد مستقیم و غیر مستقیم صاعقه به قاب، در نقاط مختلف سیستم فتوولتائیک بررسی می‌شود. همچنین، رفتار فرکانس بالای غیرخطی زمین در این مطالعات به منظور افزایش دقت مطالعات نیز لحاظ شده است. نتایج شبیه سازی یک سازه واقعی از سیستم فتوولتائیک نشان می‌دهد که با توجه به توزیع اضافه ولتاژها در سیستم های فتوولتائیک (PV)، نقطه میانی بهترین نقطه برای نصب سیستم حفاظتی یا زمین کردن می باشد. همچنین، میله حفاظتی در فاصله مناسب و با زمینی مستقل قرار گیرد، کارایی بهتری را نسبت به میله حفاظتی متصل به سیستم نشان خواهد داد. از طرفی مدلسازی های دقیق بدنه و زمین می تواند منجر به بهبود حدوداً ۴۰٪ نتایج گردد.

واژه‌های کلیدی: صاعقه، فتوولتائیک، اضافه ولتاژ گذرا، EMTP, Lightning, Transient Voltage

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.159

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

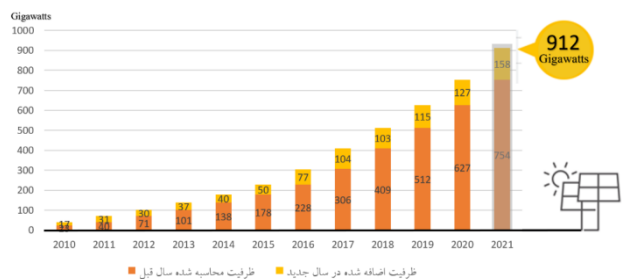
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول: علی اصغر رضی کاظمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - سیدخندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

با توجه به آمارها، افزایش ظرفیت تولید برق نیروگاه‌های فوتوولتائیک نصب شده در سراسر جهان در سال ۲۰۲۰ به ۱۲۷ گیگاوات رسیده است. اساس آخرین تجزیه و تحلیل "EnergyTrend" بخش جدید تحقیقات انرژی "TrendForce"، افزایش ظرفیت همگی تاسیسات فوتوولتائیک (PV) در سراسر جهان به حداقل ۱۵۸ گیگاوات در سال ۲۰۲۱ خواهد رسید. که افزایش ۲۵ درصدی ظرفیت تولید را نسبت به سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد [۱]. شکل ۱ ظرفیت جهانی تولید انرژی به روش فوتوولتائیک و افزایش سالیانه آن را از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد [۱].



شکل (۱): ظرفیت جهانی تولید انرژی به روش فوتوولتائیک و افزایش سالیانه آن (۲۰۲۱-۲۰۱۰) [۱]

در حال حاضر با توجه به رشد روز افزون مصرف و جایگاه انرژی‌های نو در این میان، توسعه سیستم‌های فوتوولتائیک به دلیل مزایای زیاد آن، به تدریج در حال افزایش یافته است. به دلیل آنکه این سیستم‌ها در پشت‌بام‌ها یا فضاهای آزاد غیرمسقف نصب می‌شوند، احتمال برخورد مستقیم یا غیرمستقیم صاعقه به سازه سیستم فوتوولتائیک به ویژه در مناطق مستعد رعد و برق، زیاد است [۲].

بر اساس داده‌های آماری به‌دست آمده در جنوب آفریقا، حدود ۳۱٫۲٪ آسیب‌های متداول وارد شده بر سازه سیستم خورشیدی ناشی از برخورد صاعقه است [۳]. همچنین به علت نزدیک بودن موقعیت جغرافیایی مالزی به خط استوا، انتظار می‌رود مسائل مشابهی در مالزی رخ دهد. همانطور که در [۴، ۵، ۶، ۷] گزارش شده است، هر دو نوع مستقیم و غیرمستقیم صاعقه می‌توانند سیستم‌های خورشیدی که ذخیره انرژی باتری‌ها را در خود جای داده است، به شدت تحت تأثیر قرار دهد. هنوز حفاظت مناسبی برای این سیستم‌ها در برابر صاعقه وجود ندارد [۷]–[۸]. برخوردهای مستقیم و غیر مستقیم صاعقه می‌تواند منجر به صدمه سیستم فوتوولتائیک، اینترترهای متصل شده و تجهیزات جانبی داشته باشد [۹]–[۱۰]. در این راستا، تحقیقات متعددی به منظور درک بیشتر این رخ داد از منظرهای گوناگون انجام شده است. میدان مغناطیسی ایجاد شده در اثر برخورد غیر مستقیم صاعقه می‌تواند باعث شکست سلول‌های سیلیکونی در سازه سیستم فوتوولتائیک شود [۱۱]. معمولاً صاعقه به وسیله ایجاد میدان الکترومغناطیسی و یا برخورد مستقیم به سلول‌های فوتوولتائیک آسیب

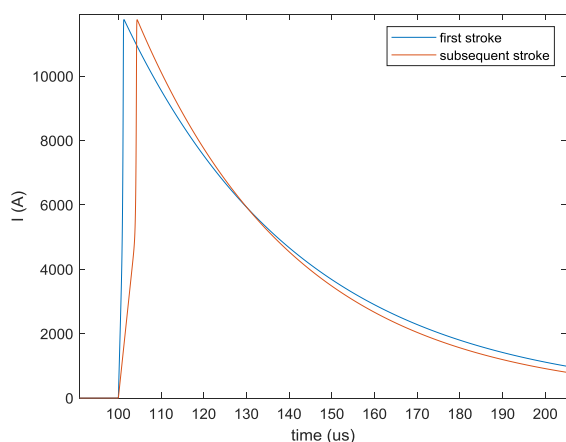
می‌رساند [۱۲]–[۱۳]. مکان مورد اصابت صاعقه نیز بر میانگین پیک ولتاژ القایی ایجاد شده در سازه سیستم فوتوولتائیک و میزان خسارت وارد بر سیستم نقش مهمی دارد [۱۴]–[۱۵]. اگر میزان موج ضربه صاعقه برخوردی به ماژول فوتوولتائیک تیزتر باشد، میانگین پیک ولتاژ القایی ایجاد شده در سازه سیستم فوتوولتائیک افزایش یافته و در نتیجه خسارت‌های مالی جدی به قاب، سلول‌های سیلیکونی و سایر اجزا سیستم با توجه به نقطه اصابت صاعقه، به سازه سیستم فوتوولتائیک وارد می‌کند [۱۶]. بالا بودن پیک جریان صاعقه، مشخصه جریان-ولتاژ سلول خورشیدی را تغییر می‌دهد [۱۷]. مراجع [۱۸] و [۱۹]، با شبیه سازی برخورد مستقیم صاعقه به صفحات PV با اعمال جریان صاعقه به صفحات PV، نشان داد که ولتاژ و جریان صاعقه، می‌تواند موجب کاهش کارایی سیستم PV و آسیب و زوال فیزیکی اجزا مختلف آن گردد.

حفاظت سلول‌های خورشیدی با استفاده از میله‌های صاعقه‌گیر و یا سیم‌های زمین با کابل کشی هوایی در گذشته متمرکز بود [۱۹]–[۲۰]. بر این اساس، در [۲۰] سطح قابلیت اطمینان سلول‌های خورشیدی زمین شده و زمین نشده باهم مقایسه شدند. مرجع [۲۱] به بررسی تأثیر شکل سازه، شکل موج صاعقه و نقطه برخورد آن بر اضافه ولتاژهای القایی تولید شده پرداخته است. هرچه فاصله سیستم حفاظت خارجی تا آرایه فوتوولتائیک بیشتر شود، مقدار اضافه ولتاژ القایی ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه هم کمتر خواهد شد [۲۲]. مقایسه بین طراحی سیستم‌های حفاظتی خارجی (صاعقه‌گیر) متصل به آرایه فوتوولتائیک و به صورت جدا از آن در [۱۲] بررسی شده است. نحوه زمین کردن سیستم فوتوولتائیک و شکل الکترودهای زمین در کاهش اثر صاعقه در [۸]–[۱۲] بررسی شده است. مرجع [۱۳] به بررسی کلی خسارات و تأثیر موج ضربه صاعقه بر روی نیروگاه خورشیدی می‌پردازد. خسارات و آسیب‌های ناشی از برخورد صاعقه به پنل، به طور کامل در [۱۴] بررسی شده است. در [۱۵] با استفاده از یک ژنراتور ضربه، جریان صاعقه تولید و به سیستم حفاظت اضافه ولتاژ DC یک نیروگاه خورشیدی اعمال شده و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است.

از چالش‌های اساسی در مدلسازی رفتار گذرای سیستم‌های فوتوولتائیک، مدلسازی دقیق پارامترهای قاب و همچنین اندرکنش رفتار فرکانس بالای زمین و پارامترهای اندازه گیری شده است. با توجه به اینکه زمین در امواج با محتوای فرکانس بالا رفتار امپدانسی دارد و افزایش پتانسیل زمین می‌تواند بر دقت ارزیابی‌ها اثرگذار باشد، بررسی این بخش از جایگاه ویژه ای برخوردار است. در این راستا، در این مقاله بخش‌های متفاوت یک سیستم فوتوولتائیک مبتنی بر مفهوم مدل خط انتقال به دقت مدلسازی می‌شود. در ادامه، با در نظر گرفتن جریان صاعقه با مدل CIGRE و وارد کردن آن به شبکه فوتوولتائیک با در نظر گرفتن اثر مقاومتی، سلفی و خازنی بخش‌های متفاوت و تزویج مابین، پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در اثر برخورد مستقیم و

زمان پیشانی (تیز بودن) ضربه نخست و بازگشتی صاعقه در شکل ۲ نشان داده شده است.

شبیه سازی جریان صاعقه به کمک ICigre در نرم افزار EMTP انجام شده است.



شکل (۲): شبیه سازی و مقایسه ضربه نخست و بازگشتی صاعقه با مدل سازی ICigre در EMTP

### ۳- مدل سازی سازه سیستم فوتوولتائیک

سازه سیستم فتوولتائیک مورد بررسی براساس یک مدل واقعی و تمام آلومینیومی مطابق شکل ۳ براساس مراجع [۲۴]-[۲۵] در نظر گرفته می شود. زاویه قاب نسبت به زمین ۱۵ درجه می باشد.

### ۳-۱- مدل سازی قاب و پایه های سازه سیستم فوتوولتائیک

قاب و پایه های سیستم مورد نظر در شکل ۳ را با در نظر گرفتن مقاومت و اندوکتانس و اثر خازنی شاخه ها نسبت به هم و نسبت به زمین، مطابق شکل ۴ با استفاده از (۲) تا (۴) مدل سازی می شود [۲۶]-[۲۷].

$$R = \frac{\rho_{AL} \times L}{A} \quad (2)$$

در این معادله،  $\rho_{AL}$  مقاومت ویژه آلومینیوم،  $L$  طول میله و  $A$  سطح مقطع میله می باشد.

$$L = 2l \left[ 2.303 \log \left( \frac{4l}{d} \right) - 1 + \frac{\mu_{AL}}{4} + \left( \frac{d}{2l} \right) \right] \quad (3)$$

در (۳)،  $\mu_{AL}$  ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی آلومینیوم،  $l$  طول میله و  $d$  قطر میله است.

$$C = \frac{12.031}{\log_{10} \left( \frac{w}{r \sqrt{1 + \left( \frac{w}{2h} \right)^2}} \right)} pF / m \quad (4)$$

در این معادله،  $w$  فاصله بین دو میله،  $r$  شعاع میله ها و  $h$  فاصله میله ها از زمین است.

غیرمستقیم صاعقه به قاب، در نقاط مختلف بررسی شده است. با شبیه سازی اثر برخورد مستقیم و غیر مستقیم صاعقه، پیک ولتاژ القایی ایجاد شده در ۱۰ نقطه مختلف سازه سیستم فوتوولتائیک بررسی شده و میزان پیک ولتاژ ایجاد شده در این ۱۰ نقطه با هم مقایسه شده است. به منظور محاسبه اثرات خازنی و اندوکتانسی بین میله حفاظتی مستقل و پایه مجاور آن در سیستم فوتوولتائیک از نرم افزار ماکسول (MAXWELL) استفاده شده است. بررسی اثر غیر مستقیم صاعقه در دو حالت حضور میله حفاظتی متصل به قاب و با فاصله از قاب انجام شده است. همچنین، رفتار فرکانس بالای زمین پایه ها به کمک روابط Rudenberg در محیط نرم افزار EMTP-RV لحاظ شده است و باعث افزایش حدوداً ۴۰ درصدی دقت مطالعات نسبت به مدل سازی ساده مقاومتی زمین شده است. نتایج نشان می دهد که با در نظر گرفتن اثر خازنی، پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در نواحی مرکزی قاب نسبت به گوشه ها بیشتر است. یعنی؛ نواحی مرکزی سازه سیستم فوتوولتائیک نسبت به کناره ها و قاب آن در معرض خطر اضافه ولتاژ بیشتری در هنگام وقوع صاعقه قرار داشته و با برخورد مستقیم صاعقه به نقاط مختلف سازه و یا اثر میدان مغناطیسی ناشی از برخورد غیرمستقیم صاعقه به سازه سیستم فوتوولتائیک، قسمت های میانی نسبت به گوشه ها آسیب بیشتری خواهند دید و وصل کردن نقطه مرکزی سیستم به زمین و یا قرار دادن میله حفاظتی در این نقطه، راه مناسبی برای کاهش خسارت های وارد به سیستم است.

### ۲- مدل سازی جریان صاعقه

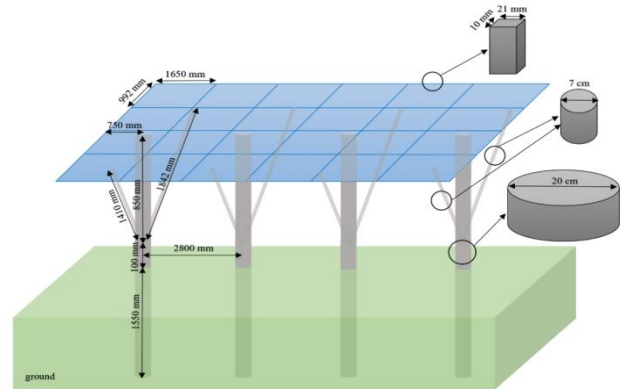
صاعقه به عنوان یک پدیده طبیعی، تخلیه بارهای الکتریکی میان ابر و زمین یا میان دو ابر است. ماهیت و شدت صاعقه به میزان و نوع بار الکتریکی (مثبت یا منفی) بستگی دارد. تغییر توزیع بارهای الکتریکی در ابر بواسطه جابجایی توده های هوای گرم و مرطوب در درون ابر رخ می دهد. در اثر تجمع بارهای الکتریکی میزان اختلاف پتانسیل به حدی میرسد که می تواند بر مقاومت عایقی هوا غلبه کند. مثلاً چنانچه بخش پایینی ابر دارای بار منفی باشد و به زمین نزدیک باشد، صاعقه میان ابر و زمین رخ خواهد داد؛ به این نوع صاعقه منفی ابر به زمین گویند که بیشتر صاعقه های ابر به زمین از این نوع هستند. ایجاد دیگر انواع صاعقه نیز همین مکانیزم را دارد ولی ممکن است نوع بار یا جهت رخداد متفاوت باشد [۱]. رابطه توصیف کننده موج صاعقه به صورت زیر است:

$$i(t) = I_p (e^{-\sigma_1 t} - e^{-\sigma_2 t}) \quad (1)$$

$\sigma_1$  و  $\sigma_2$  به ترتیب ثوابت مدل کننده زمان پیشانی و پشت موج هستند که برای ضربه نخست صاعقه<sup>۱</sup>، به ترتیب دارای مقادیر ۰/۷۵ [23] و ۳۰/۲ میکروثانیه و برای ضربه بازگشتی<sup>۲</sup> [۲۳]، به ترتیب ۲/۴ و ۳۰/۲ میکروثانیه در نظر گرفته شده اند.  $I_p$  نیز جریان ماکزیمم صاعقه است که ۱۱/۸ کیلوآمپر در نظر گرفته شده است [۲۳]. تفاوت

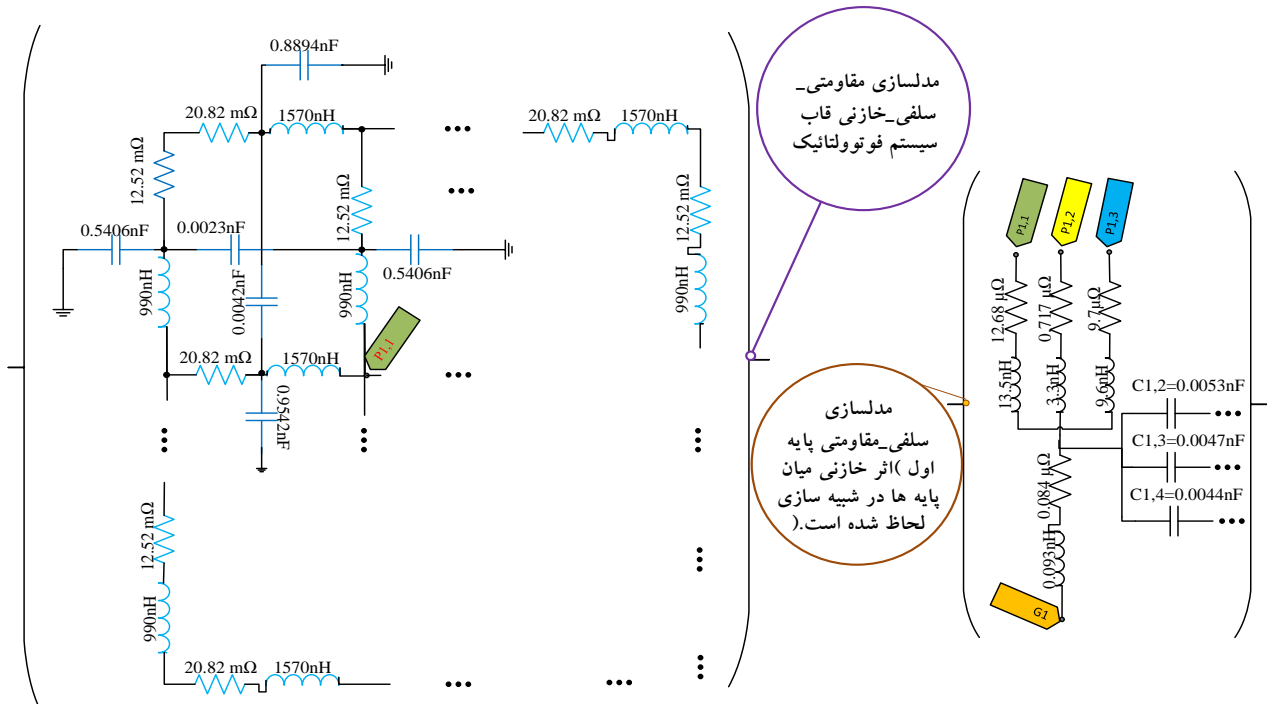
قسمت مشخص شده در شکل ۳	المان مشخص شده در شکل ۴
اثر مقاومتی میله‌های عمودی	$R=20/82 \Omega m$
اثر مقاومتی میله‌های افقی	$R=12/52 \Omega m$
اثر مقاومتی میله ۱۸۴۲ میلی متری	$R=12/68 \Omega \mu$
اثر مقاومتی میله ۱۴۱۰ میلی متری اتصال دهنده پایه به سازه	$R=9/7 \Omega \mu$
اثر مقاومتی میله ۸۵۰ میلی متری با قطر ۲۰ سانتی متر (قسمت بالای پایه)	$R=0/117 \Omega \mu$
اثر مقاومتی قسمت ۱۰۰ متری پایه با قطر ۲۰ سانتی متری (قسمت میانی پایه بعد از اتصال میله‌های ۱۴۰۰ میلی متری و ۱۸۴۲ میلی متری تا زمین)	$R=0/84 \Omega \mu$
اثر اندوکتانسی میان میله‌های عمودی	$L=1570 nH$
اثر اندوکتانسی بین میله‌های افقی	$L=990 nH$
اثر اندوکتانسی میله ۱۸۴۲ میلی متری	$L=12/5 \Omega nH$
اثر اندوکتانسی میله ۱۴۱۰ میلی متری اتصال دهنده پایه به سازه	$L=9/6 nH$
اثر اندوکتانسی میله ۸۵۰ میلی متری با قطر ۲۰ سانتی متر (قسمت بالای پایه)	$L=3/3 nH$
اثر اندوکتانسی قسمت ۱۰۰ متری پایه با قطر ۲۰ سانتی متری (قسمت میانی پایه بعد از اتصال میله‌های ۱۴۰۰ میلی متری و ۱۸۴۲ میلی متری تا زمین)	$L=0/93 nH$
اثر خازنی بین پایه اول و پایه دوم	$C=0/0053 nH$
اثر خازنی بین پایه اول و پایه سوم	$C=0/0047 nH$
اثر خازنی بین پایه‌های اول و چهارم	$C=0/0044 nH$

با توجه به ابعاد ارائه شده در شکل ۳، پارامترهای محاسبه شده در شکل ۴ نشان داده شده است. جدول ۱ جزئیات المان‌های مشخص شده در شکل ۴ را بر اساس اندازه‌های داده شده در شکل ۳ نشان می‌دهد. خازن‌های بین هر دو میله و هر میله با زمین نیز بر اساس رابطه (۴) محاسبه شده‌اند. قسمت‌های نقطه‌چین، ادامه شکل با محاسبه مشابه المان‌های توضیح داده شده می‌باشد.



شکل (۳): مدل و ابعاد سازه سیستم واقعی در نظر گرفته شده برای شبیه سازی

جدول (۱): جزئیات داده‌ها



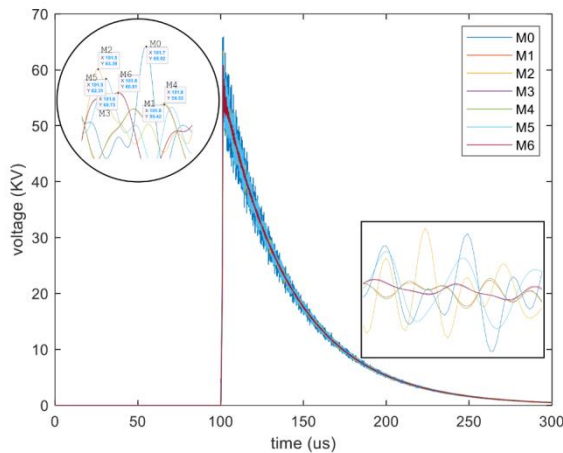
شکل (۴): مدل سازی قاب و پایه‌های سازه سیستم فوتوولتائیک در EMTP

عنوان زمین این پست در نظر گرفته است. رفتار فرکانس بالای این زمین با در نظر گرفتن مقاومت و اندوکتانس و اثر خازنی، مطابق شکل ۵ با استفاده از روابط Rudenberg مدل سازی می‌شود [۲۶]:

$$R = \frac{\rho_{soil}}{2\pi l} \left( \ln \frac{4 \times l}{A} - 1 \right) \quad (5)$$

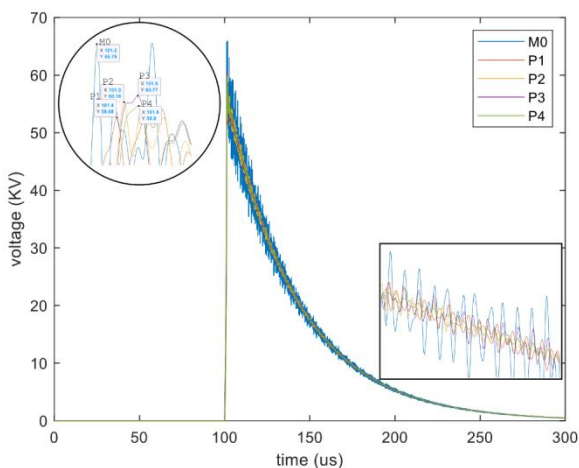
## ۲-۲- مدل سازی امپدانسی زمین

همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، میله عمودی با طول مشخص که در خاک با مقاومت ویژه مشخصی قرار گرفته است به



شکل (۸): مقایسه ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد مستقیم صاعقه در نقاط مختلف سازه سیستم فوتوولتائیک

همانطور که از نتایج حاصل از شکل ۸ مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن اثر سلفی و خازنی شاخه‌ها، نمایش تغییرات دقیق بوده و اعوجاج ایجاد شده در نقاط مختلف از لحظه برخورد صاعقه تا رفع آن، به دقت در نمودار نمایش داده شده است. از نتایج حاصل از نمودار، مشاهده می‌کنیم که ولتاژ حالت گذرای ایجاد شده در اثر برخورد مستقیم صاعقه به نقاط مختلف قاب، به صورت یکنواخت تغییر نمی‌یابد و دچار اعوجاج می‌شود. که دامنه تغییرات ولتاژ (فاصله قله تا دره) و مقدار پیک در نقطه M0 (محل برخورد صاعقه) از سایر نقاط بیشتر است.



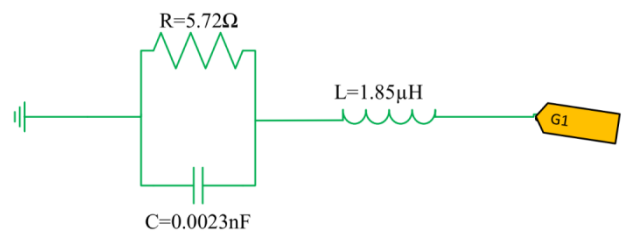
شکل (۹): مقایسه ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد مستقیم صاعقه در هر پایه

همانند نتایج شکل ۸، از نتایج حاصل از شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن اثر خازنی پایه‌ها، نمایش تغییرات دقیق‌تر شده و اعوجاج ایجاد شده در هر پایه از لحظه برخورد صاعقه تا رفع آن، با دقت بیشتری در نمودار نمایش داده شده است. پس با در نظر گرفتن اثر خازنی میان خود میله‌ها و میان میله‌ها و زمین، مشاهده می‌کنیم که ولتاژ حالت گذرای ایجاد شده در اثر برخورد مستقیم

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left(\frac{2l}{A}\right)} \quad (۶)$$

$$L = \frac{\mu_{AL} l}{2\pi} \ln\left(\frac{2l}{A}\right) \quad (۷)$$

در این روابط  $\rho_{soil}$  مقاومت ویژه خاک،  $l$  طول میله،  $A$  سطح مقطع میله،  $\epsilon_0$  برابر با  $8.854 \times 10^{-12}$  فیکو و  $\epsilon_r$  ثابت دی الکتریک بین دو میله و  $\mu_{AL}$  ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی آلومینیوم است.

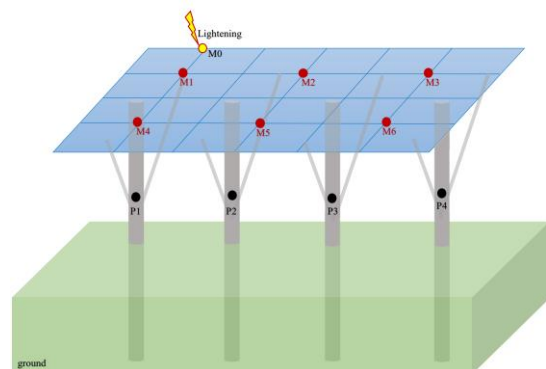


شکل (۵): مدل سازی زمین سیستم فوتوولتائیک در EMTP

با توجه به ابعاد ارائه شده در شکل ۳، پارامترهای محاسبه شده زمین پست فوتوولتائیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

#### ۴- سناریو شبیه سازی: برخورد مستقیم صاعقه به سازه سیستم فوتوولتائیک

فرض شده است که صاعقه به صورت مستقیم به قاب در نقطه مشخص شده در شکل ۷ برخورد می‌کند ( $M_0$ ) و تاثیر آن روی سایر نقاط مشخص شده در این شکل، در شکل ۸ و شکل ۹ بررسی می‌شود.



شکل (۷): نقاط مورد بررسی در برخورد مستقیم صاعقه به سازه سیستم فوتوولتائیک



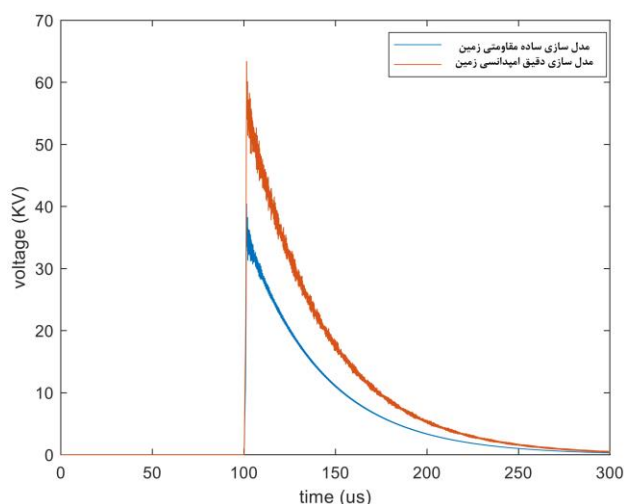
مناسب دیگری برای کاهش پیک ولتاژ ایجاد شده در اثر برخورد مستقیم و یا غیرمستقیم صاعقه است.

به منظور ارزیابی اثر رفتار زمین بر خروجی‌ها، نتایج برای مدل‌سازی ساده مقاومتی زمین تنها با مقاومت ۵/۷۲ اهم و بدون در نظر گرفتن اثر سلفی و خازنی نیز بررسی شده است. جدول ۳ مقادیر پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در اثر برخورد مستقیم صاعقه به نقطه M0 در همه نقاط مشخص شده در شکل ۷ را در مدل‌سازی دقیق امپدانس زمین با مدل‌سازی ساده مقاومتی زمین مقایسه می‌کند.

جدول (۳): مقایسه پیک ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد مستقیم صاعقه در نقاط مختلف شبکه در مدل‌سازی دقیق امپدانس

زمین با مدل‌سازی ساده مقاومتی زمین				
M3	M2	M1	M0	kV
60.73	63.39	59.42	65.92	مدل‌سازی دقیق امپدانس زمین
37.66	40.33	39.71	52.58	مدل‌سازی مقاومتی زمین
M6	M5	M4	kV	
60.81	62.31	59.53	مدل‌سازی دقیق امپدانس زمین	
37.75	37.86	39.78	مدل‌سازی مقاومتی زمین	
P4	P3	P2	P1	kV
59.08	60.77	60.16	58.68	مدل‌سازی دقیق امپدانس زمین
37.08	37.69	38.61	39.63	مدل‌سازی مقاومتی زمین

شکل ۱۱ و شکل ۱۲، برای نمونه، ولتاژ گذرای ایجاد شده در نقاط M2 و P1 را در مدل‌سازی دقیق امپدانس زمین، با مدل‌سازی ساده مقاومتی زمین مقایسه می‌کند.



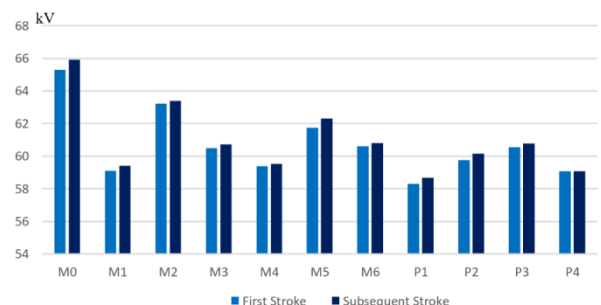
شکل (۱۱): مقایسه پیک ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد مستقیم صاعقه در نقطه M2 در مدل‌سازی دقیق امپدانس زمین با مدل‌سازی ساده مقاومتی زمین

صاعقه به هر پایه، به صورت یکنواخت تغییر نمی‌یابد و دچار اعوجاج می‌شود. که دامنه تغییرات ولتاژ (فاصله قله تا دره) و مقدار پیک در نقطه M0 (محل برخورد صاعقه) از سایر نقاط از جمله پایه‌ها بیشتر است.

مقادیر پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در اثر ضربه مستقیم صاعقه به قاب سیستم فوتوولتائیک در اثر ضربه بازگشتی صاعقه نیز بدست آورده و مقادیر را در جدول ۲ ارائه شده است.

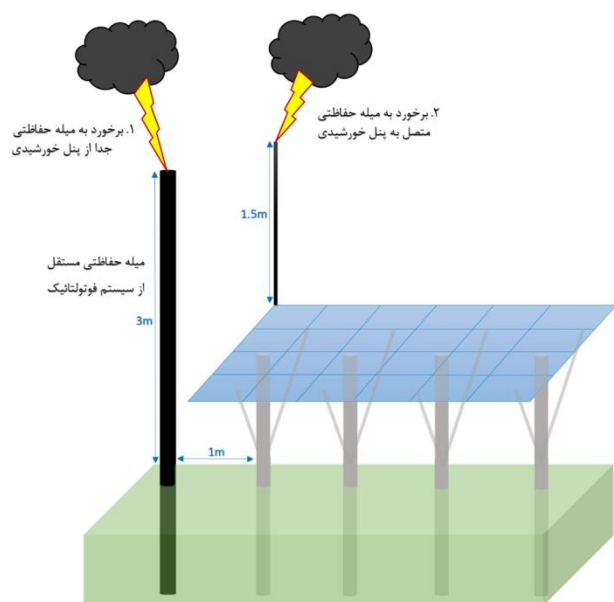
مستقیم صاعقه در نقاط مختلف شبکه				
M3	M2	M1	M0	kV
60.50	63.23	59.10	65.30	ضربه نخست صاعقه
60.73	63.39	59.42	65.92	ضربه بازگشتی صاعقه
M6	M5	M4	kV	
60.59	61.75	59.38	ضربه نخست صاعقه	
60.81	62.31	59.53	ضربه بازگشتی صاعقه	
P4	P3	P2	P1	kV
59.06	60.54	59.76	58.29	ضربه نخست صاعقه
59.08	60.77	60.16	58.68	ضربه بازگشتی صاعقه

شکل ۱۰ نمودار ستونی نتایج حاصل از جدول ۲ را نمایش می‌دهد. با مقایسه پیک ولتاژ ایجاد شده در هر نقطه در اثر ضربه نخست و ضربه بازگشتی صاعقه، در می‌یابیم که ولتاژ گذرای ایجاد شده در اثر ضربه بازگشتی صاعقه به دلیل دارا بودن زمان پیشانی بیشتر، پیک کمتری نسبت به پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در اثر ضربه نخست صاعقه به نقاط مختلف سازه سیستم فوتوولتائیک وارد می‌سازد.

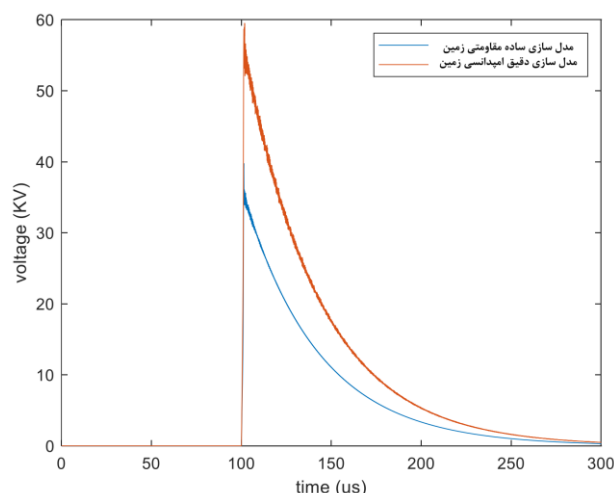


شکل (۱۰): مقایسه پیک ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد مستقیم صاعقه در نقاط مختلف شبکه

همانطور که از نتایج حاصل از جدول ۲ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، نقطه M1 با وجود نزدیک‌تر بودن به محل برخورد صاعقه (M0)، دارای پیک ولتاژ گذرای کمتری نسبت به نقطه M2 می‌باشد. در واقع اثر خازنی میله‌ها موجب می‌شود که پیک ولتاژ ایجاد شده در نواحی مرکزی قاب نسبت به گوشه‌ها بیشتر باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، پیک ولتاژ ایجاد شده در نقاط M5، M2، P2 و P3، نسبت به سایر نقاط بیشتر است. یعنی، با برخورد مستقیم صاعقه به قاب، قسمت‌های میانی نسبت به گوشه‌ها آسیب بیشتری خواهند دید. در نتیجه، در صورت بهره‌گیری از میله حفاظتی متصل به سازه به منظور کاهش پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در نقاط، بهترین نقطه برای نصب میله حفاظتی نقطه میانی می‌باشد. زمین کردن نقطه میانی نیز، روش



شکل (۱۳): حالت‌های مختلف برخورد غیر مستقیم صاعقه به سازه سیستم فوتوولتائیک



شکل (۱۲): مقایسه پیک ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد مستقیم صاعقه در نقطه P1 در مدل‌سازی دقیق امپدانس زمین با مدل‌سازی ساده مقاومتی زمین

با مقایسه مدل اهمی و امپدانس زمین نشان داده شده، نتیجه می‌شود که مدلسازی دقیق زمین منجر به دقت حدود ۳۸/۶۳ درصدی در نتایج خواهد شد.

## ۵- سناریو شبیه‌سازی: برخورد غیرمستقیم صاعقه به قاب

در این قسمت تاثیر برخورد غیرمستقیم صاعقه به سازه سیستم‌های فتوولتائیک در دو حالت مختلف بررسی می‌شوند. حالت اول برخورد صاعقه به میله حفاظتی که جدا از آرایه فتوولتائیک است و حالت دوم متصل به آن می‌باشد. به طور کلی ولتاژ القایی به وجود آمده در این حالت،  $U_{IP}$ ، از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۹]\_ [۳۰]:

$$U_{IP} = K_C \times L_M \times \frac{di}{dt} \quad (۸)$$

که در آن  $K_C$  ضریب توزیع جریان صاعقه بین سیستم حفاظت خارجی (میله حفاظتی) و هادی پایینی (پایه بدنه PV) پنل خورشیدی است. اگر تعداد هادی‌های پایینی یکی باشد،  $K_C = 1$ ، اگر دو عدد باشد،  $K_C = 0.5$  و اگر سه عدد یا بیشتر باشد،  $K_C = 0.44$  است [۳۰].  $di/dt$  نرخ افزایش جریان صاعقه برحسب کیلوآمپر بر میکروثانیه است که در بدترین شرایط ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ کیلوآمپر بر میکروثانیه در نظر گرفته می‌شود.  $L_M$  بر حسب میکرو هانری نیز اندوکتانس القایی بین جریان صاعقه جاری شده در هادی زیرین و حلقه القا شده می‌باشد [۳۰]\_ [۳۱]. همچنین اثر سلفی و خازنی میان میله حفاظتی مستقل و پایه مجاور سیستم فوتوولتائیک به میله حفاظتی، توسط نرم افزار ماکسول محاسبه شده است.

شکل ۱۳، حالت‌های مختلف برخورد غیرمستقیم صاعقه به سازه سیستم فوتوولتائیک را نشان می‌دهد.

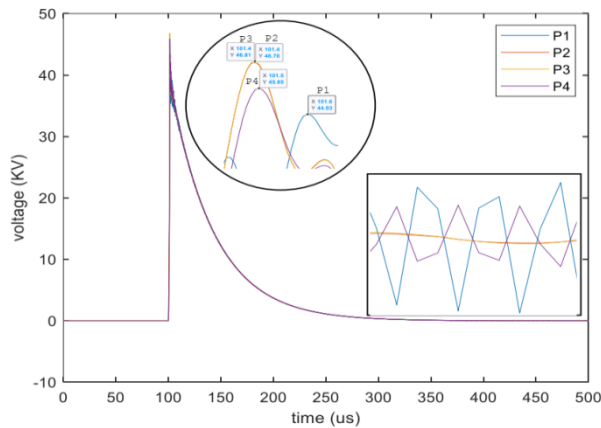
## ۵-۱- برخورد صاعقه به میله حفاظتی مستقل از سازه سیستم فوتوولتائیک

در این قسمت فرض می‌شود که میله حفاظتی به طول ۳ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر جدا از آرایه فتوولتائیک و به فاصله ۱ متر از یکی از پایه‌های آن مطابق شکل ۱۳ قرار گرفته است [۲۹]\_ [۳۱].

پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در نقاط مختلف سیستم PV را در حالتی که صاعقه به میله حفاظتی مستقل از سیستم برخورد کند، بدست آورده و با حالت قبل که جریان صاعقه به صورت مستقیم به نقطه M0 وارد می‌شد، مقایسه می‌کنیم.

شکل ۱۴، مدل‌سازی برخورد صاعقه به میله حفاظتی جدا از آرایه فتوولتائیک در EMTP را به صورت زیرسیستم‌ها نشان داده‌است. محاسبات پارامترهای مدل خط انتقال میله حفاظتی آلومینیومی طبق معادلات ۲ تا ۸ انجام و اثر سلفی و خازنی آن با نزدیک‌ترین پایه سیستم، به کمک نرم افزار ماکسول محاسبه شده است.

مدل زمین در شکل ۱۴ براساس طول و قطر میله حفاظتی مستقل از سیستم فوتوولتائیک و به کمک معادلات ۵ تا ۷ محاسبه شده است.



شکل (۱۶): مقایسه ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد

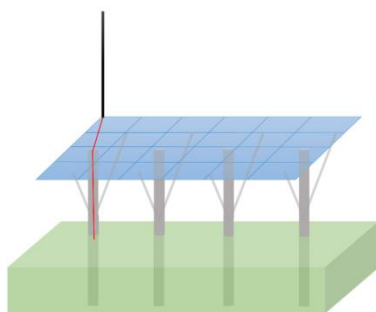
غیرمستقیم صاعقه به هر پایه - میله حفاظتی مستقل

با مقایسه شکل ۱۵ با شکل ۸ و شکل ۱۶ با شکل ۹، مشاهده می-شود که اگر جریان صاعقه به صورت غیرمستقیم به سیستم فوتوولتائیک وارد شود، پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در نقاط مختلف، نسبت به برخورد مستقیم جریان صاعقه به قاب، کمتر خواهد بود. این مقادیر برای موج صاعقه بازگشتی نیز بررسی شده و نتایج در ادامه با نتایج حاصل از برخورد صاعقه به میله حفاظتی متصل به سازه سیستم فوتوولتائیک مقایسه شده است.

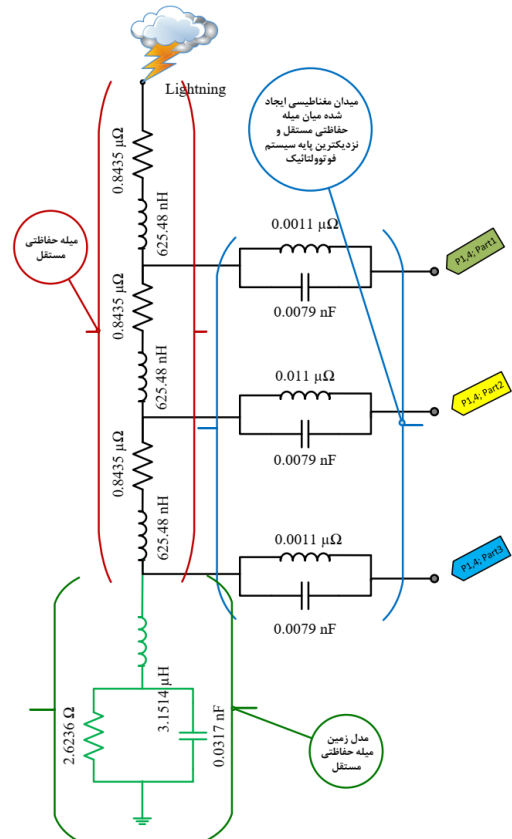
## ۵-۲- برخورد صاعقه به میله حفاظتی متصل به سازه سیستم فوتوولتائیک

یکی دیگر از ساختارهای مورد استفاده در سیستم PV اتصال میله حفاظتی مستقیم به بدنه آن است. بدین منظور، شبکه PV شبیه سازی شده در قسمت برخورد مستقیم صاعقه به قاب را مجدد در نظر می-گیریم. میله حفاظتی را به نقطه مشخص شده در شکل ۱۳ از قاب وصل می-کنیم.

در این حالت صاعقه از طریق سیم آلومینیومی با طول ۳/۱ متر و سطح مقطع ۲۵ میلیمتر مربع که در شکل ۱۷ به رنگ قرمز مشخص شده است، به زمین جاری می-شود [۲۹] - [۳۱]. در شبیه سازی این قسمت، از اثر خازنی سیم آلومینیومی متصل کننده میله حفاظتی به زمین با پایه های سازه سیستم فوتوولتائیک صرف نظر شده و به صورت سلفی-مقاومتی مدل سازی شده است.



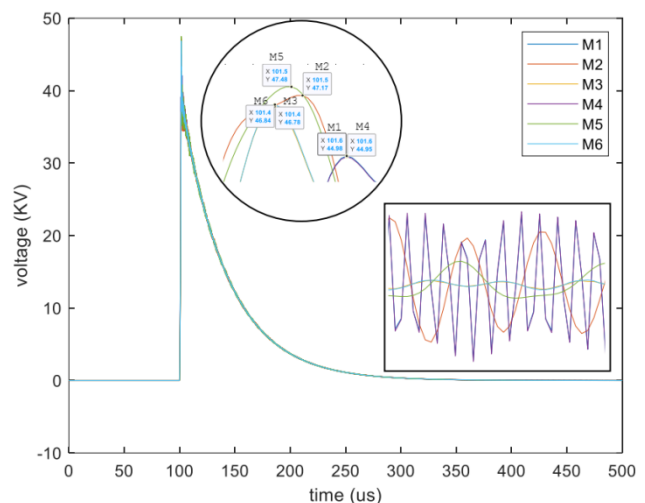
شکل (۱۷): نمایش میله صاعقه گیر متصل به سازه سیستم فوتوولتائیک و سیم آلومینیومی متصل کننده میله حفاظتی به زمین



شکل (۱۴): مدل سازی برخورد صاعقه به میله حفاظتی متصل به سازه

سیستم فوتوولتائیک در EMTP

شکل های ۱۵ و ۱۶، خروجی شبیه سازی برخورد غیرمستقیم صاعقه در نقاط مختلف قاب PV را به همراه میله حفاظتی مستقل را نشان می-دهند.

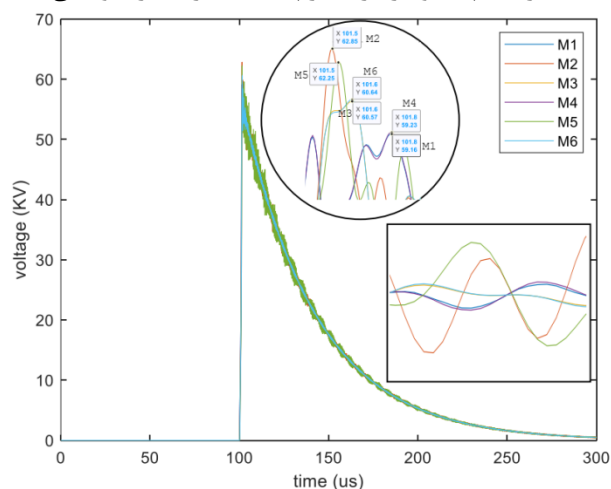


شکل (۱۵): مقایسه ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد

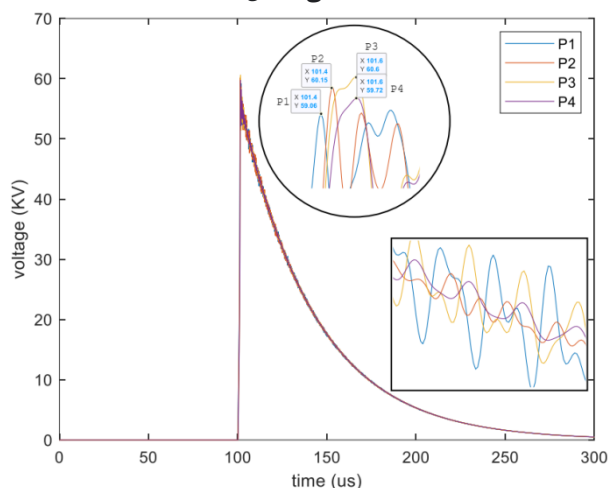
غیرمستقیم صاعقه در نقاط مختلف قاب - میله حفاظتی مستقل -



از مقایسه نتایج شکل ۹ با نتایج حاصل از شکل ۲۰ می‌توان مشاهده کرد که پیک ولتاژ هریک از پایه‌ها، تغییری نکرده و حتی به



شکل (۱۹): مقایسه ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد غیرمستقیم صاعقه در نقاط مختلف قاب (شبکه RLC و میله حفاظتی متصل)



شکل (۲۰): مقایسه ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد غیرمستقیم صاعقه به هر پایه (شبکه RLC و میله حفاظتی متصل)

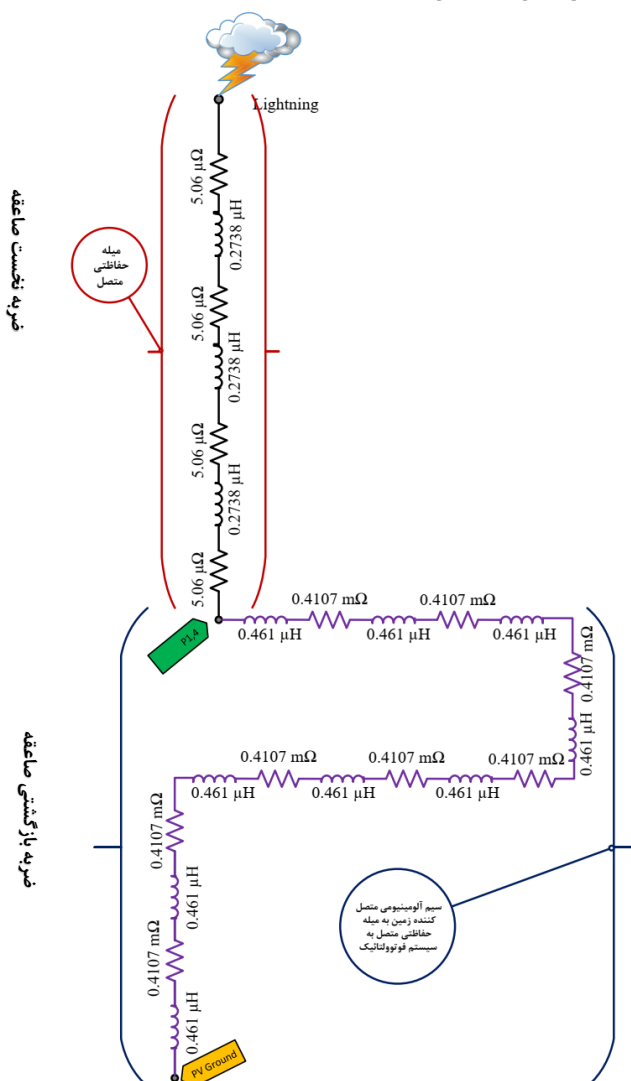
دلیل وصل شدن سیم میله حفاظتی به زمین پایه‌ها، با افزایش اندکی نیز همراه بوده است. این مقادیر برای موج صاعقه بازگشتی نیز بررسی شده و نتایج در جدول ۴ جمع‌آوری شده‌اند.

جدول (۴): مقایسه پیک ولتاژ حالت گذرا ایجاد شده بر اثر برخورد

مستقیم و غیرمستقیم صاعقه در نقاط مختلف شبکه RLC

M3	M2	M1	M0	kV
59.10	60.50	63.23	59.10	ضربه مستقیم صاعقه
44.39	46.06	46.48	44.39	ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی مستقل)
58.93	60.36	62.63	58.93	ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی متصل)
M6		M5	M4	kV
60.59		61.75	59.38	ضربه مستقیم صاعقه
46.13		46.84	44.36	ضربه غیرمستقیم صاعقه

نحوه مدل‌سازی میله حفاظتی متصل به سازه سیستم فوتوولتائیک و سیم آلومینیومی متصل کننده میله حفاظتی به زمین به کمک نرم‌افزار EMTP در شکل ۱۸ نشان داده شده‌است.



شکل (۱۸): مدل‌سازی برخورد صاعقه به میله حفاظتی متصل به سازه سیستم فوتوولتائیک در EMTP

ولتاژهای گذرای ایجاد شده در اثر برخورد صاعقه به میله حفاظتی متصل به قاب، در نقاط مختلف مشخص شده در شکل ۷ را از خروجی نرم‌افزار EMTP در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌کنیم.

از مقایسه نتایج شکل ۸ با نتایج حاصل از شکل ۱۹ می‌توان مشاهده کرد که پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در نقاط مختلف مشخص شده در شکل ۷، کاهش اندکی داشته‌است. با مقایسه شکل ۱۹ با شکل ۱۵ نیز در می‌یابیم که میله حفاظتی مستقل، نسبت به میله حفاظتی متصل به قاب، کاهش بیشتر پیک ولتاژ گذرا را به دنبال دارد. در نتیجه مشاهده می‌شود که با برخورد غیرمستقیم صاعقه به قاب، پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در تمامی نقاط کاهش یافته و به دنبال آن، خرابی و خسارت وارد به سیستم فوتوولتائیک نیز کاهش خواهد یافت. این مقادیر برای موج صاعقه بازگشتی نیز بررسی شده و نتایج در جدول ۴ جمع‌آوری شده‌اند.

زمان پیشانی ۲/۴ میکروثانیه به نقاط مختلف سیستم فوتوولتائیک وارد ساخت.

از مقایسه نتایج حاصل از ضربه مستقیم و غیر مستقیم صاعقه، مشاهده شد که استفاده از میله حفاظتی مستقل، نسبت به میله حفاظتی متصل به قاب، کاهش بیشتر پیک ولتاژ گذرا را به دنبال دارد. در نتیجه مشاهده می‌شود که با برخورد غیرمستقیم صاعقه به قاب، پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در تمامی نقاط کاهش یافته و به دنبال آن، خرابی و خسارت وارد به سیستم فوتوولتائیک نیز کاهش خواهد یافت. از آنجاکه سیستم‌های فوتوولتائیک اغلب در فضای آزاد و پشت-بام‌ها نصب شده و در معرض اصابت مستقیم صاعقه قرار دارند، بهتر است از میله‌های حفاظتی که در فاصله مناسب و مستقل از سیستم فوتوولتائیک نصب می‌شوند، استفاده شود تا سیستم فوتوولتائیک در معرض خط اصابت مستقیم صاعقه قرار نداشته و در صورت اصابت غیر مستقیم صاعقه، تا حدودی از پیک ولتاژ گذرای القا شده به نقاط مختلف سیستم کمتر شده و در شرایط سیستم فوتوولتائیک مورد بررسی، میله حفاظتی مستقل از شبکه انتخاب مناسب‌تری بوده و کاهش پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در نقاط مختلف، خرابی و خسارت کمتری را به همراه خواهد داشت. در این قسمت به منظور محاسبه اثرات خازنی و اندوکتانسی دقیق‌تر بین میله حفاظتی مستقل و پایه مجاور آن در سیستم فوتوولتائیک از نرم افزار مکسول استفاده شده است.

در نهایت، با مقایسه مدل اهمی و امیدانسی زمین نشان داده شده که مدل‌سازی دقیق زمین منجر به دقت ۳۸/۶۳ درصدی در نتایج خواهد شد. نتایج ارائه شده می‌تواند دید خوبی را در برخورد مستقیم صاعقه به قاب نیروگاه های PV جهت اجرای یک سیستم حفاظتی مناسب فراهم می‌آورد.

## مراجع

- [1] <https://www.pv-magazine.com/2021/02/16/global-pv-installations-to-surpass-150-gw-in-2021/>
- [2] F. Heidler, W. Zischank, Z. Flisowski, C. Bouquegneau, and C. Mazzetti, "Parameters of lightning current given in IEC 62305-Background, experience and outlook," in 29th International Conference on Lightning Protection, 2008, vol. 23, p. 26.
- [3] Lightning and Surge Protection of SSEG Installations. Available online: <https://www.ee.co.za/wp-content/uploads/2018/10/Hano-Oelofse-DEHN-africa-presentation.pdf> (accessed on 1 December 2019).
- [4] Zaini, N.; Ab-Kadir, M.; Izadi, M.; Ahmad, N.; Radzi, M.M.; Azis, N.; Wan Hasan, W.Z. On the effect of lightning on a solar photovoltaic system. In Proceedings of the International Conference on Lightning Protection (ICLP), Estoril, Portugal, 25–30 September 2016; pp. 1–4.
- [5] Bokoro, P.; Doorsamy, W. Investigation of lightning surge effects on a grid-connected PV plant. In Proceedings of the International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 10–13 September 2018; pp. 1–4.
- [6] Rodrigues, R.B.; Mendes, V.; Catalão, J.P.d.S.

(میله حفاظتی مستقل)				
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی متصل)	58.98	61.78	60.43	
kV	P1	P2	P3	P4
ضربه مستقیم صاعقه	58.29	59.76	60.54	59.06
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی مستقل)	44.32	46.03	46.07	45.16
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی متصل)	58.97	59.82	60.40	59.54
kV	M0	M1	M2	M3
ضربه مستقیم صاعقه	59.42	63.39	60.73	59.42
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی مستقل)	44.98	47.17	46.78	44.98
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی متصل)	59.16	62.85	60.57	59.16
kV	M4	M5	M6	
ضربه مستقیم صاعقه	59.53	62.31	60.81	
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی مستقل)	44.95	47.48	46.84	
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی متصل)	59.23	62.25	60.64	
kV	P1	P2	P3	P4
ضربه مستقیم صاعقه	58.68	60.16	60.77	59.08
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی مستقل)	44.93	46.78	46.81	45.85
ضربه غیرمستقیم صاعقه (میله حفاظتی متصل)	59.06	60.15	60.60	59.72

با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده در جدول ۴، در شرایط سازه سیستم فوتوولتائیک مورد بررسی، میله حفاظتی مستقل از شبکه انتخاب مناسب‌تری بوده و کاهش پیک ولتاژ گذرای ایجاد شده در نقاط مختلف، خرابی و خسارت کمتری را به همراه خواهد داشت.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سازه سیستم فوتوولتائیک با ابعاد واقعی با چهار پایه زمین شده مدل‌سازی گذرا شد. مشاهده شد که از برخورد مستقیم صاعقه به قاب سیستم فوتوولتائیک، ولتاژ زیادی در آن نقطه و همچنین سایر نقاط قاب القا می‌شود که می‌تواند موجب از بین رفتن آرایه فوتوولتائیک شده و خسارت‌های زیادی را به دنبال داشته باشد. همچنین مشاهده شد که تمرکز اضافه ولتاژ ایجاد شده، در نواحی میانی بیشتر بوده و در صورت برخورد مستقیم و یا غیرمستقیم صاعقه، نواحی میانی نسبت به گوشه‌ها، آسیب بیشتری می‌بینند. در نتیجه؛ بهترین نقطه برای نصب میله حفاظتی متصل به سیستم، نقطه وسط سیستم فوتوولتائیک است و در غیر اینصورت، بهتر است که نقطه میانی به زمین متصل گردد.

همچنین مشاهده شده که هر چه موج جریان صاعقه تیزتر باشد، پیک ولتاژ القایی بیشتر خواهد بود. موج جریان صاعقه با زمان پیشانی ۰/۷۵ میکروثانیه، پیک ولتاژ بالاتری را نسبت به موج جریان صاعقه با

- 6, pp. 1525–1532, 1982.
- [23] Chin-Leong Wooi, Zulkurnain Abdul-Malek, Behnam Salimi, Noor Azlinda Ahmad, Kamyar Mehranzamir, Saeed Vahabi-Mashak, "A Comparative Study on the Positive Lightning Return Stroke Electric Fields in Different Meteorological Conditions", *Advances in Meteorology*, vol. 2015, Article ID 307424, 12 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/307424>
- [24] <https://www.solarpartscomponents.com/>
- [25] <https://www.solarpartscomponents.com/solar-pillar-ground-mounting-system-spc-ca-4h-pcw>
- [26] <https://physics.stackexchange.com/questions/82967/resistance-of-aluminium-rectangular-wire>
- [27] F.E. Terman, *Radio Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1943.
- [28] A. Balakrishnan, "Calculation of important design parameters for grounding systems in substations." Montana State University-Bozeman, College of Engineering, 1990.
- [29] S. Sekioka, "Lightning protections of renewable energy generation systems," in *Integration of distributed energy resources in power systems*, Elsevier, 2016, pp. 193–228.
- [30] H.-J. Stern and H. C. Karner, "Lightning induced EMC phenomena in photovoltaic modules," in 1993 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1993, pp. 442–446.
- [31] C. Boonseng, R. Boonseng, and K. Kularbphetong, "Investigation and Diagnosis of Lightning Strikes Affects Solar Cell Damage in Solar Farm," in 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2020, pp. 258–261.
- Protection of wind energy systems against the indirect effects of lightning. *Renew. Energy* 2011, 36, 2888–2896. [CrossRef].
- [7] Zaini, N.H.; Ab-Kadir, M.Z.A.; Radzi, M.A.M.; Izadi, M.; Azis, N.; Ahmad, N.; Nasir, M.S.M. Lightning surge analysis on a large scale grid-connected solar photovoltaic system. *Energies* 2017, 10, 2149. [CrossRef].
- [8] N. H. Zaini et al., "On the effect of lightning on a solar photovoltaic system," in 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, pp. 1–4.
- [۱۰] پویا، and تخمین عملکرد خطوط و ریسک عایقی ناشی از ضربات مستقیم صاعقه با استفاده از روش ترکیبی جدید مبتنی بر روش مونت کارلو، "نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران"، vol. 13, no. 1, pp. 85–94, 2016.
- [10] H. Hassanpour and M. Ehsanian, "A Fast and Adaptive PLL For Single Phase Grid-Connected PV Systems," *J. Iran. Assoc. Electr. Electron. Eng.*, p. 0.
- [11] N. I. Ahmad et al., "Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 1611–1619, 2018.
- [12] T. Degner, W. Enders, and A. Schuelbe, "EMC and Safety Design for Photovoltaic Systems (ESDEPS). Paper," 2000.
- [13] H.-J. Stern and H. C. Karner, "Lightning induced EMC phenomena in photovoltaic modules," in 1993 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1993, pp. 442–446.
- [14] L. M. Moore and H. N. Post, "Five years of operating experience at a large, utility- scale photovoltaic generating plant," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 16, no. 3, pp. 249–259, 2008.
- [15] H. Haeberlin, "Damages at bypass diodes by induced voltages and currents in PV modules caused by nearby lightning currents," 2007.
- [16] H. Haeberlin, "Damages at bypass diodes by induced voltages and currents in PV modules caused by nearby lightning currents," 2007.
- [17] S. Sekioka, "An experimental study of sparkover between a rod and a photovoltaic panel," in 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2012, pp. 1–5.
- [18] C. G. Zimmermann, "Time dependent degradation of photovoltaic modules by ultraviolet light," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 24, p. 241110, 2008.
- [19] C. A. Christodoulou, K. D. Damianaki, V. T. Kontargyri, I. F. Gonos, A. C. Kyritsis, and N. P. Papanikolaou, "Protection of 100kWp photovoltaic system against atmospheric overvoltages: A case study," in 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2016, pp. 1–4.
- [20] Y. Méndez, I. Acosta, J. C. Rodriguez, J. Ramirez, J. Bermúdez, and M. Martinez, "Effects of the PV-generator's terminals connection to ground on electromagnetic transients caused by lightning in utility scale PV-plants," in 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, pp. 1–8.
- [21] T. Jiang and S. Grzybowski, "Electrical degradation of Photovoltaic modules caused by lightning induced voltage," in 2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2014, pp. 107–110.
- [22] R. L. Pease, J. R. Barnum, W. G. Vulliet, V. A. J. Van Lint, and T. F. Wrobel, "Silicon solar cell damage from electrical overstress," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 29, no.

<sup>1</sup> First stroke

<sup>2</sup> Subsequent stroke