

# مقایسه بین الکتروود زمین صفحه و الکتروود زمین مشبک

## به عنوان پایانه زمین

فرزین خالقی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> مدیر مهندسی و عضو هیات مدیره، شرکت مهندسی مشاور بهبود صنعت نیرو، تهران،

khaleghi@bsnco.co

### چکیده

در این مقاله مقایسه‌ای از لحاظ فنی و اقتصادی بین الکتروود زمین صفحه‌ای و الکتروود زمین مشبک صورت می‌پذیرد. مقایسه فنی شامل بررسی مقاومت هر یک از این نوع الکتروودها و نحوه توزیع پتانسیل بر روی سطح زمین بوده و در انجام شبیه‌سازی عمق دفن هر این دو نوع الکتروود و با ابعاد آنها یکسان در نظر گرفته می‌شود. همچنین به منظور بررسی دقیقتر موضوع، این امر در هر دو حالت نصب الکتروود به صورت افقی و عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور انجام شبیه‌سازی از ماژول MALT از پکیج نرم-افزاری CDEGS استفاده گردیده است. همچنین تاثیر استفاده از مواد کاهنده در خاک با مقاومت‌های ویژه متفاوت مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### کلمات کلیدی

#### ۱- مقدمه

بدون شک سیستم زمین یکی از اصلی‌ترین و اساسی‌ترین بخش تاسیسات الکتریکی هر ساختمان، نیروگاه و ... می‌باشد. فارغ از مبحث نوع الکتروود زمین، الکتروود زمین به منظور حفظ ایمنی پرسنل و تخلیه جریان خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای ایجاد سیستم زمین در کشور معمولاً از صفحه مسی به عنوان الکتروود زمین استفاده می‌گردد. بنابراین ضرورت مشخص نمودن پارامترهای الکتریکی این نوع الکتروود و یافتن جایگزین مناسب برای این نوع الکتروود با توجه به هزینه بالای آن نسبت به سایر الکتروودهای مشابه ضروری به نظر می‌رسد.

در بازار ایران الکتروود زمین مشبک دارای اختلاف قیمت بسیار بالایی نسبت به الکتروود زمین صفحه‌ای می‌باشد. از سوی دیگر، الکتروود زمین صفحه‌ای دارای مزایایی همچون مقاومت کمتر و یا توزیع پتانسیل یکنواخت‌تر نسبت به الکتروود زمین مشبک می‌باشد.

در مرجع [۲] از روش‌های FEM (Finite Element Method)، EFM (Method of Moments) و یا Equivalent Electrodes Method (به منظور بررسی میزان مقاومت

الکتروود زمین و یا توزیع پتانسیل هر یک از انواع الکتروود استفاده شده است. همچنین از روش FEM، با استفاده از نرم‌افزار COMSOL [۳] به منظور بررسی دقیقتر این موضوع استفاده شده است.

در مقالات معتبر دیگری [۵، ۶] عملکرد الکتروودهای زمین مشبک و صفحه در خاک چند لایه و خاک با مقاومت ویژه متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه با استفاده از ماژول MALT از پکیج نرم‌افزاری CDEGS [۴] مقاومت زمین الکتروودهای زمین مشبک و صفحه مورد بررسی و محاسبه قرار می‌گیرد.

#### ۲- انجام شبیه‌سازی

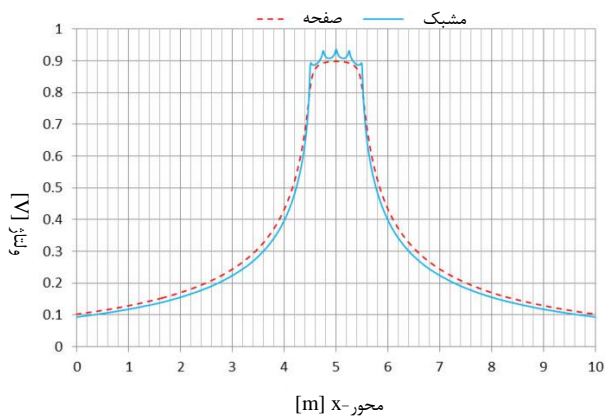
برای انجام شبیه‌سازی از الکتروود مشبک (شکل ۲) ساخته شده از هادی مقنولی مسی به قطر ۳/۵ mm و همچنین از صفحه مسی به ضخامت ۳/۵ mm (شکل ۱) و با ابعاد جدول ۱ استفاده می‌شود.

جدول ۱: ابعاد الکتروودهای زمین

| a [m] | b [m] | h [m] | a <sub>۱</sub> [m] | b <sub>۱</sub> [m] |
|-------|-------|-------|--------------------|--------------------|
| ۱     | ۱     | ۱     | ۰٫۲۵               | ۰٫۲۵               |

| MOM<br>&<br>EEM | ۱۰۰ | ۲۵/۲۲ | ۲۶/۱۲ | ۲۶/۴۲ | ۲۷/۲۲ |
|-----------------|-----|-------|-------|-------|-------|
|                 | ۱۰  | ۲/۵۳  | ۲/۶۱۳ | ۲/۶۴۲ | ۲/۷۲۲ |
|                 | ۱   | ۰/۲۵۳ | ۰/۲۶۱ | ۰/۲۶۴ | ۰/۲۷۲ |
| CDEGS           | ۱۰۰ | ۲۴/۷۹ | ۲۷/۳۰ | ۲۵/۹۰ | ۲۸/۳۹ |
|                 | ۱۰  | ۲/۴۷۹ | ۲/۷۳۰ | ۲/۵۹۰ | ۲/۸۳۹ |
|                 | ۱   | ۰/۲۴۷ | ۰/۲۷۳ | ۰/۲۵۹ | ۰/۲۸۳ |

همانطور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از پکیج نرم‌افزاری CDEGS با دقت قابل قبولی مشابه نتایج حاصل از مرجع [۲] می‌باشد.



شکل ۳: توزیع پتانسیل الکترودهای زمین مشبک و صفحه در

راستای محور X بر روی سطح زمین (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ ) الکترود زمین صفحه نسبت به الکترود زمین مشبک، با اختلاف ناچیزی، دارای مقاومت کمتری می‌باشد. به طور نمونه در صورتی که مقاومت ویژه خاک برابر  $100 \Omega.m$  در نظر گرفته شود؛ برای رسیدن به مقاومت پایانه زمینی برابر با الکترود زمین صفحه، می‌توان از الکترود زمین مشبک با ابعاد جدول ۳ استفاده نمود.

جدول ۳: ابعاد الکترود زمین مشبک برای رسیدن به

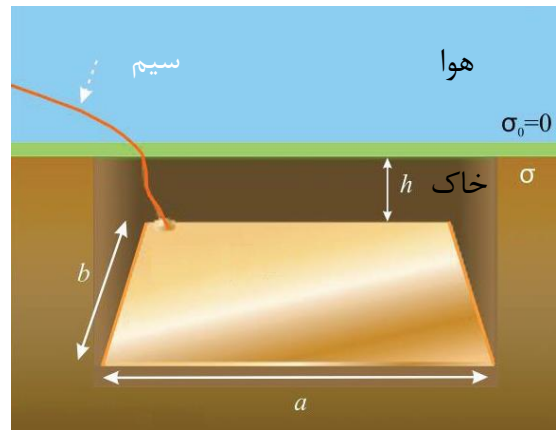
مقاومت الکترود زمین صفحه

|                   | به صورت عمودی<br>$R_g = 23,39 \Omega$                                      | به صورت افقی<br>$R_g = 24,37 \Omega$                                       |
|-------------------|--|--|
| الکترود زمین صفحه | $1 m \times 1 m$   | $1 m \times 1 m$   |
| الکترود زمین مشبک | $a \times b = 1,2 m \times 1,2 m$<br>$a_1 \times b_1 = 0,3 m \times 0,3 m$ | $a \times b = 1,2 m \times 1,2 m$<br>$a_1 \times b_1 = 0,3 m \times 0,3 m$ |

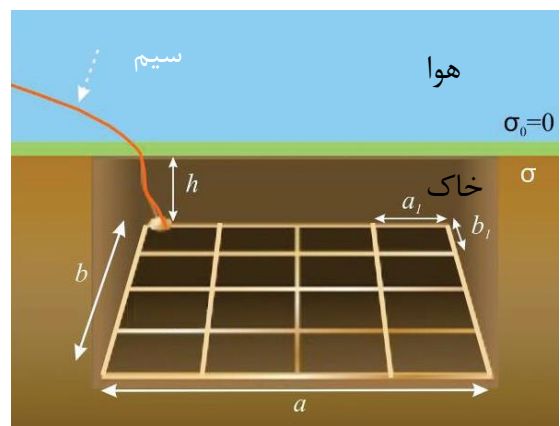
بنابراین در صورت نیاز به رسیدن به مقاومتی برابر الکترود زمین صفحه، میزان مس مصرفی مورد نیاز در حدود  $1,032$  گرم و با هزینه  $26,832$  تومان خواهد بود (در قیاس با هزینه  $811,200$  تومانی الکترود زمین صفحه‌ای).

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، توزیع پتانسیل در اطراف الکترود زمین صفحه نسبت به الکترود زمین مشبک یکنواخت‌تر می‌باشد و در نتیجه از میزان خطرات ولتاژ گام و تماس کاسته خواهد شد. اما از سوی دیگر، با توجه به هزینه انجام شده برای الکترود زمین صفحه، توزیع پتانسیل در الکترود زمین مشبک تفاوت چندانی با الکترود زمین صفحه‌ای ندارد و به همین دلیل با هزینه بسیار کمتر می‌توان از الکترود زمین مشبک به عنوان جایگزین مناسبی برای الکترود زمین صفحه‌ای استفاده نمود.

برای ایجاد الکترود زمین مشبک و صفحه مطابق با ابعاد جدول ۱ وزن هر یک از این دو الکترود زمین به ترتیب برابر با  $860$  گرم و  $31,200$  کیلوگرم خواهد بود. بنابراین هزینه انجام شده برای الکترود زمین مشبک و صفحه به ترتیب در حدود  $22,360$  تومان و  $811,200$  تومان خواهد بود (با در نظر گرفتن قیمت هر کیلوگرم مس در حدود  $26,000$  تومان).



شکل ۱: الکترود زمین صفحه‌ای (نصب به صورت افقی)



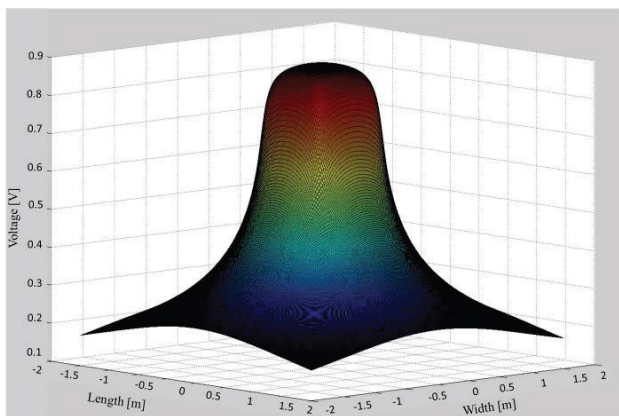
شکل ۲: الکترود زمین مشبک (نصب به صورت افقی)

کاملاً واضح است که میزان مقاومت هر یک از این الکترودهای زمین، تابع میزان مقاومت ویژه خاک می‌باشد. به همین منظور در انجام این شبیه‌سازی مقاومت ویژه خاک برابر  $100 \Omega.m$ ،  $10 \Omega.m$  و  $100 \Omega.m$  در نظر گرفته می‌شود [۲] و با استفاده از نرم‌افزار CDEGS مقاومت الکترودهای زمین مشبک و صفحه در هر دو حالت افقی و عمودی مطابق جدول ۲ محاسبه می‌گردد.

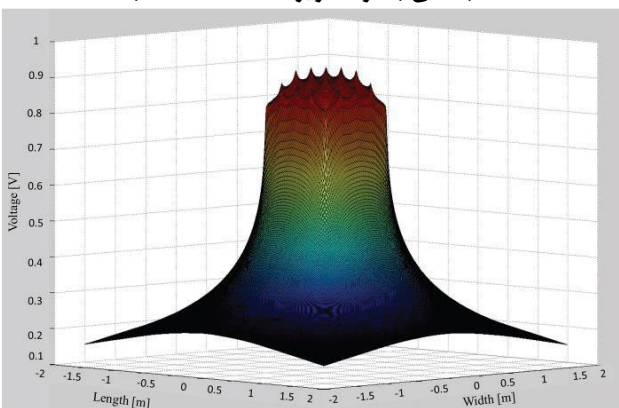
جدول ۲: مقایسه میزان مقاومت محاسبه شده با استفاده از نرم افزار

CDEGS و مرجع [۲]

|  | RHO [ $\Omega.m$ ] | به صورت عمودی       |                    | به صورت افقی        |                    |
|--|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
|  |                    | $R_{sheet}[\Omega]$ | $R_{mesh}[\Omega]$ | $R_{sheet}[\Omega]$ | $R_{mesh}[\Omega]$ |
|  |                    | COMSOL              | ۱۰۰                | ۲۳/۳۹               | ۲۴/۶۹              |
|  | ۱۰                 | ۲/۴۴                | ۲/۴۷               | ۲/۴۳۷               | ۲/۵۴۸              |
|  | ۱                  | ۰/۲۳۳               | ۰/۲۴۷              | ۰/۲۴۴               | ۰/۲۵۴              |

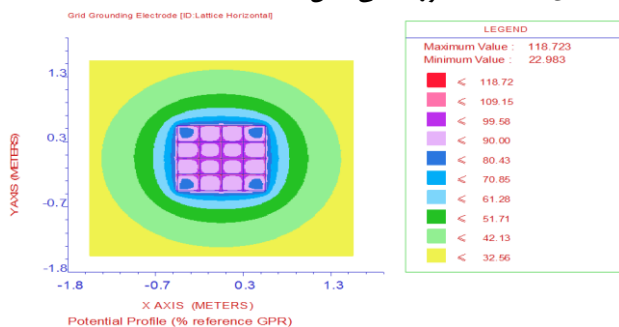


شکل ۸: پتانسیل در اطراف الکترود زمین صفحه در سطح زمین با نصب افقی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )

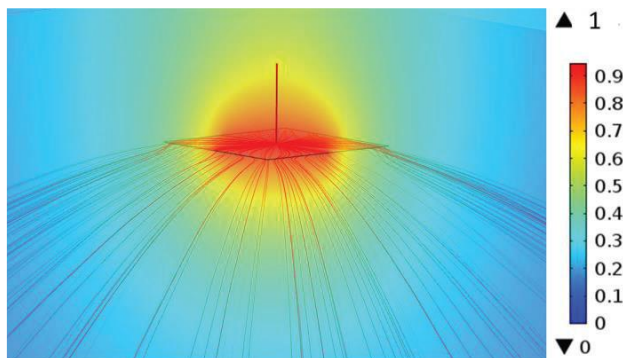


شکل ۹: پتانسیل در اطراف الکترود زمین مشبک در سطح زمین با نصب افقی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )

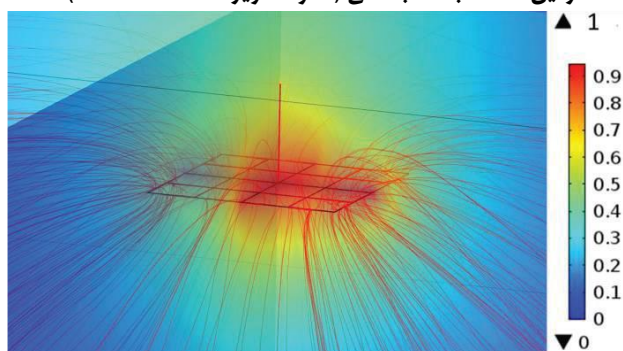
خطوط چگالی جریان در شکل ۴-۷ و توزیع پتانسیل در سطح زمین در شکل ۸-۹ و توزیع پتانسیل در عمق دفن الکترود زمین (۱ متری از سطح زمین) در شکل ۱۰-۱۱ برای هر دو نوع الکترود زمین مشبک و صفحه‌ای با نصب به صورت افقی نشان داده شده است.



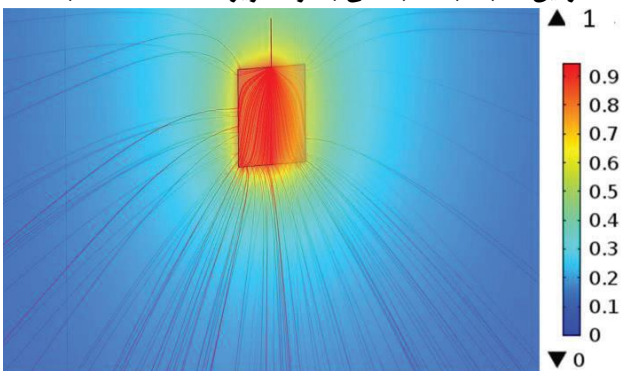
شکل ۱۰: توزیع پتانسیل در عمق دفن الکترود زمین مشبک با نصب به صورت افقی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )



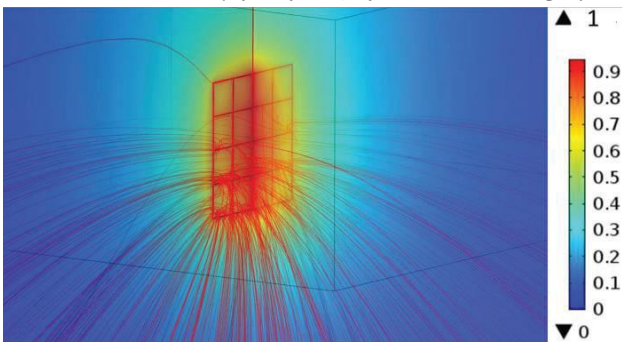
شکل ۴: توزیع پتانسیل و خطوط چگالی جریان در اطراف الکترود زمین صفحه با نصب افقی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )



شکل ۵: توزیع پتانسیل و خطوط چگالی جریان در اطراف الکترود زمین مشبک با نصب افقی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )

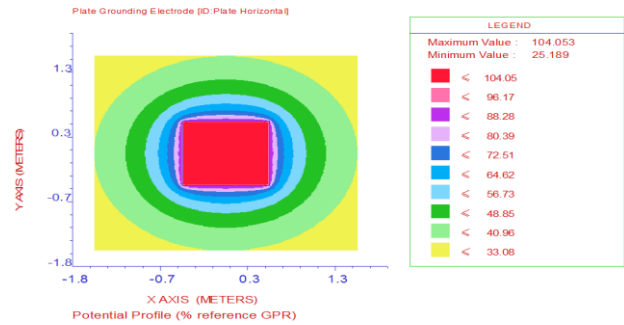


شکل ۶: توزیع پتانسیل و خطوط چگالی جریان در اطراف الکترود زمین صفحه با نصب عمودی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )

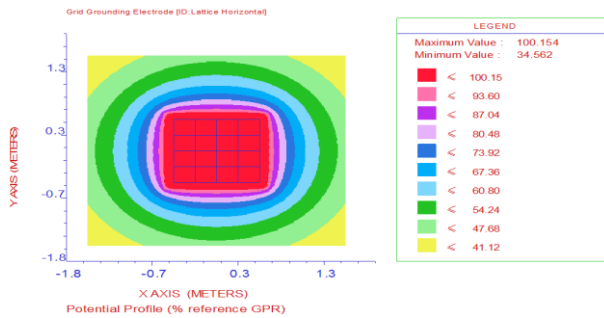


شکل ۷: توزیع پتانسیل و خطوط چگالی جریان در اطراف الکترود زمین مشبک با نصب عمودی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )

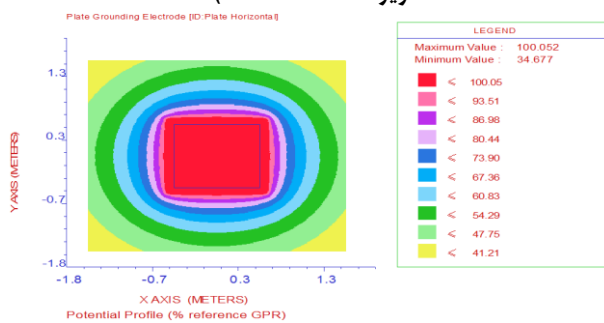
نتایج شبیه‌سازی استفاده از مواد کاهنده در جدول ۴ نشان داده شده است. کاملا مشهود است که در صورت استفاده از مواد کاهنده میزان اختلاف مقاومت الکتروود زمین صفحه‌ای و الکتروود زمین مشبک به حداقل ممکن کاهش می‌یابد. همچنین توزیع پتانسیل در عمق ۹۰ سانتیمتری از سطح زمین و یا به عبارتی بر روی سطح مواد کاهنده در شکل ۱۳-۱۴ نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده است در صورت استفاده از مواد کاهنده توزیع پتانسیل به صورت یکنواخت‌تری انجام خواهد شد و در نتیجه از میزان خطرات ناشی از ولتاژ و گام هادی‌های مشبک کاسته خواهد شد.



شکل ۱۱: توزیع پتانسیل در عمق دفن الکتروود زمین مشبک با نصب به صورت افقی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )



شکل ۱۳: توزیع پتانسیل در عمق ۹۰ سانتیمتری (بر روی سطح مواد کاهنده) و استفاده از الکتروود زمین مشبک به صورت افقی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )



شکل ۱۴: توزیع پتانسیل در عمق ۹۰ سانتیمتری (بر روی سطح مواد کاهنده) و استفاده از الکتروود زمین صفحه به صورت افقی (مقاومت ویژه خاک  $100 \Omega.m$ )

### ۳- نتیجه

مقاومت و توزیع پتانسیل در مجاورت هر دو نوع الکتروود زمین مشبک و صفحه به نصب به صورت افقی و عمودی در خاک همگن با مقاومت‌های ویژه مختلف و با استفاده از روش‌های مختلف (MOM و EEM) و نرم-افزارهای COMSOL و CDEGS (ماژول MALT) مورد مقایسه قرار گرفت.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف چندانی بین ویژگی‌های الکتروودهای زمین مشبک و صفحه‌ای با ابعاد یکسان در فرکانس قدرت وجود ندارد و این امر در هر دو مورد توزیع پتانسیل و میزان مقاومت صادق می‌باشد. هر چند که نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الکتروود زمین مشبک به صورت نامحسوس دارای کارایی کمتری می‌باشد (میزان مقاومت بیشتر و توزیع غیر یکنواخت‌تر پتانسیل)؛ اما از سوی دیگر هزینه آن نسبت به الکتروود زمین صفحه بسیار پایین‌تر می‌باشد و با استفاده از مواد کاهنده مناسب می‌توان این اختلاف را به میزان

## ۲-۱- تاثیر استفاده از مواد کاهنده در اطراف الکتروودهای زمین مشبک و صفحه‌ای

الکتروود زمین مشبک و صفحه‌ای با ابعادی برابر با قسمت پیشین، در عمق ۱ متری از سطح زمین به گونه‌ای قرار می‌گیرند که اطراف آن را از تمامی جهات، ۱۰ سانتیمتر مواد کاهنده با مقاومت ویژه در حدود  $2 \Omega.m$  پر کند. برای انجام شبیه‌سازی مقاومت ویژه خاک به ترتیب برابر  $10 \Omega.m$ ،  $100 \Omega.m$  و  $1000 \Omega.m$  در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۲: نمونه‌ای از مواد کاهنده

جدول ۴: میزان مقاومت محاسبه شده در صورت استفاده و یا عدم

استفاده از مواد کاهنده

|                  | R [ $\Omega.m$ ] | به صورت عمودی                  |                                | به صورت افقی                   |                                |
|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                  |                  | R <sub>صفحه</sub> [ $\Omega$ ] | R <sub>مشبک</sub> [ $\Omega$ ] | R <sub>صفحه</sub> [ $\Omega$ ] | R <sub>مشبک</sub> [ $\Omega$ ] |
| بدون مواد کاهنده | ۱۰۰۰             | ۲۴۷٫۸                          | ۲۷۳٫۰                          | ۲۵۹٫۰                          | ۲۸۳٫۹                          |
|                  | ۱۰۰              | ۲۴۷٫۹                          | ۲۷۳٫۰                          | ۲۵۹٫۰                          | ۲۸۳٫۹                          |
|                  | ۱۰               | ۲۴۷٫۹                          | ۲۷۳٫۰                          | ۲۵۹٫۰                          | ۲۸۳٫۹                          |
| با مواد کاهنده   | ۱۰۰۰             | ۱۷۸٫۹                          | ۱۷۹٫۳                          | ۱۸۸٫۸                          | ۱۸۹٫۶                          |
|                  | ۱۰۰              | ۱۸۰٫۵                          | ۱۸۱٫۳                          | ۱۹۰٫۸                          | ۱۹۱٫۵                          |
|                  | ۱۰               | ۱۹۶٫۸                          | ۲۰۱٫۳                          | ۲۰۷٫۴                          | ۲۱۱٫۷                          |

قابل توجهی کاهش داد. به همین دلیل توصیه می‌گردد تا از الکتروود زمین مشبک به جای الکتروود زمین در کاربردهای متعارف در کشور استفاده گردد. در این حالت با توجه به قیمت بالای مس از هزینه نهایی سیستم زمین کاسته خواهد شد و سالیانه میلیاردها تومان از هزینه‌های تاسیسات الکتریکی در کشور را کاهش داد.

## سپاسگزاری

این مقاله به منظور کاستن از هزینه‌های کشور و همچنین به منظور آشنایی هر چه بیشتر مهندسين جوان کشور با مزایا و معایب الکتروودهای زمین مشبک و آشنایی با قابلیت‌های پکیج نرم‌افزاری CDEGS تهیه گردیده است. در پایان از پیگیری‌های مجدانه همکار عزیز جناب آقای مجید محمودوند مدیرعامل محترم شرکت بهبود صنعت نیرو در پیشبرد اهداف این مقاله سپاسگزاری می‌نمایم.

## مراجع

- [۱] موسسیان، آلدیک، راهنمای طرح و اجرای تاسیسات برقی ساختمانها، ۱۳۸۲
- [۲] “Comparative Analysis of Plate and Grid Ground Electrode Characteristics as a Part of Grounding System”, by D. Jovanović, N. Cvetković, N. Raičević, Ž. Hederić
- [۳] “COMSOL”. [Online]. Available: <https://www.comsol.com>.
- [۴] “Integrated analysis software for grounding, EMF, and EMI”, by F. P. Dawalibi and F. Donoso.
- [۵] “Computerized Analysis of Grounding Plates in Multilayer Soils”, by J. Ma and F. P. Dawalibi.
- [۶] “Analysis of grounding systems in soils with finite volumes of different resistivities”, by J. Ma and F. P. Dawalibi.