

## تأثیر لایه‌ای شدن زمین بر نحوه توزیع پتانسیل بر سطح زمین پست و نیروگاه ها در شرایط بروز اتصال کوتاه با استفاده از روش تصاویر استاتیکی و بکارگیری روش ممان

سام ذاکر      رویاسادات نیکجو      ابراهیم امیری      سیدحسین (حسام الدین) صادقی      روزبه معینی مازندران  
sanzaker@aut.ac.ir      nikjoo@aut.ac.ir      sadeghi@aut.ac.ir      moini@aut.ac.ir  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

چکیده- با توجه به ساختار ژئوفیزیکی خاک در اکثر مناطق، برای آنالیز سیستم زمین نمی توان از یک مدل کاملا همگن برای خاک استفاده کرد. لذا در این مقاله با در نظر گرفتن محیط خاک زمین بصورت یک محیط ناهمگن با ساختار چند لایه، به آنالیز آن پرداخته ایم و چون با توجه به پایین بودن رنج فرکانس قدرت و محدود بودن اندازه پست، می توان از ترم انتشاری موج الکترومغناطیسی مربوط به جریان روی ساختار شبکه زمین صرف نظر کرد، می توان میدان الکترومغناطیسی را به صورت یک میدان استاتیکی در نظر گرفت. از این روش تصاویر استاتیکی برای آنالیز سیستم زمین چند لایه با بکارگیری روش ممان استفاده شده است که موجب افزایش قابل توجه سرعت آنالیز سیستم زمین در کنار دقت بسیار خوب آن گردیده است. در این مقاله سیستم زمین یک پست را در حالیکه شبکه زمین در لایه اول قرار دارد و نیز برای شرایطی که روی سطح زمین از ماده دیگری مانند برف پوشیده شده است و شبکه زمین در لایه دوم قرار می گیرد مطالعه می کنیم.

کلیدواژه- سیستم زمین- زمین چند لایه- روش تصاویر استاتیکی- روش ممان- ولتاژ گامی

### ۱. مقدمه

خودی هادی های دفن شده و اثرات القای متقابل که در اثر نزدیکی هادی ها در شبکه زمین ایجاد می شود در نظر گرفته شده است. در مقاله ذکر شده درباره جریان القایی هادی های فلزی متحرک بحثی مطرح نشده است. Mader و Zaffanella [2] یک مدل شبکه الکتریکی و فرمول هایی را برای محاسبه مقاومت و اندوکتانس خودی بین هادی های نزدیک به هم، در یک سیستم توزیع ارائه کرده اند. در آن مقاله، اندوکتانس متقابل به زوج هادی های کنارهم با طول مساوی، محدود شده و جریان های نشتی در نظر گرفته نشده است. پس از آن، Selby و Dawalibi [3] بر روی توزیع جریان های نشتی در شبکه هادی های هوایی و دفن شده تاکید کرده اند. البته در این روش توزیع جریان در هر هادی ثابت می باشد. یعنی برای محاسبه توزیع جریان بر روی ساختارهای فلزی دفن شده فرض بر آن است که جریان در تمامی قسمتها یکسان توزیع گردیده است. این روش برای محاسبه توزیع جریان برای هر

بمنظور تحلیل سیستم زمین از دید نحوه توزیع پتانسیل ناشی از جریان نفوذی به درون خاک و یافتن سایر پارامترهای ایمنی از قبیل ولتاژ گامی و نیز بدست آوردن مقاومت زمین می بایست در ابتدا به نحوه توزیع جریان بر روی ساختار زمین دست یافت. مکان قرارگیری شبکه زمین و نحوه پیکر بندی آن عواملی هستند که نحوه توزیع جریان بر روی ساختار شبکه زمین را تحت تاثیر قرار می دهند. با توجه به شکل کلی ساختار زمین در نقاط مختلف، مشاهده می گردد با نفوذ به درون زمین، نوع خاک و به دنبال آن پارامترهای مرتبط از قبیل رسانایی، گذردهی الکتریکی دچار تغییر می شوند. لذا در نظر گرفتن زمین چند لایه به منظور آنالیز سیستم زمین، امری اجتناب ناپذیر می باشد. برای اولین بار Dawalibi [1] درباره توزیع جریان بر روی ساختار زمین و میدان های الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط جریان های شبکه زمین به بحث پرداخت. امیدانس

مسئله زمین و با توجه به زمان بر بودن سایر روشهایی که به آنالیز سیستم زمین در شرایط وقوع اتصال کوتاه می پردازند، با در نظر گرفتن ساختار زمین بصورت یک محیط چند لایه و نیز اثر نشتی جریانها به درون خاک، با بهره گیری از روش تصویر اصلاح شده استاتیکی که در محدوده فرکانس قدرت، پاسخگویی بسیار نزدیکی برای آنالیز سیستم زمین دارد، به ارائه روشی در جهت آنالیز سریعتر و در عین حال با دقت مطلوب در جهت تحلیل سیستم زمین در لایه های مختلف پرداخته شده است. در روش پیشنهادی از تکنیک تبدیل معادلات انتگرالی به معادلات ماتریسی ممان و بهره گیری از روش بسط نمایی استفاده شده است. شایان ذکر است روش بسط نمایی بطور قابل ملاحظه ای سرعت محاسبات روش ممان را نسبت به سایر روش های اشاره شده بالا افزایش خواهد داد.

## ۲. تئوری

### ۲-۱. فرمول بندی مسئله

شبکه زمین بطور کلی به صورت یک شبکه متصل بهم از یک سری هادی های سیمی (به شکل استوانه) ساخته شده است که می توانند در هر جهت و به هر شکلی در داخل زمین قرار بگیرند. منظور از سیم نازک در اینجا همان ارتباط شعاع سیم با طول آن است که می بایست شعاع سیم بسیار کوچکتر از طول سیم باشد که این شرط برای غالب الکتروود های سیمی صادق است.

فرض می کنیم شبکه هادی های زمین بطور کامل در داخل زمین چند لایه با رسانایی خاک  $\sigma$  مدفون شده است. و هوا نیز کاملاً عایق بوده و رسانایی آن صفر می باشد.

در آغاز ساختار هادی زمین را سگمنت بندی کرده و هر سگمنت بصورت یک المان واحد بررسی می شود. به کار گیری تعداد المان های بیشتر منجر به نتایج دقیقتری می گردد ولیکن باعث زمان بر شدن بیشتر برنامه خواهد شد. البته باید بین این دو پارامتر یک تعادل بهینه ایجاد کرد. در این مقاله هر هادی به ۸ قسمت تقسیم گردید و نتایج با دقت خوبی محاسبه شده اند (شکل ۶).

در سیستم زمین ارتباط بین جریان داخل شونده به زمین و پتانسیل تولید شده ناشی از آن از طریق معادله انتگرالی زیر

ساختار پیچیده ای از هادی های شبکه زمین مناسب نبوده و جواب مطلوبی نخواهد داشت. Huang و Kasten [4] مدل جدیدی را برای محاسبه توزیع جریان ها، هم در سیستم زمین هم در هادی های فلزی، با توجه به افت ولتاژ در طول هادی های شبکه زمین، ارائه داده اند. به هر حال، جریان های نشتی و جریان های شبکه زمین به طور جداگانه در محاسبات در نظر گرفته شده اند و اثر متقابل آنها و اثر کوپل خازنی زمین نیز در نظر گرفته نشده است. Otero و Cidras، Alamo [5] مدلی را برای محاسبه توزیع جریان ها در سیستم زمین ارائه کرده اند. این مدل بر اساس تئوری مدار الکتریکی می باشد و برای حل از روش گره استفاده شده است، که در آن القای متقابل و اثر کوپل خازنی بین این جریان های نشتی در طول هادی در نظر گرفته شده است. اما در این مدل زمین بصورت یک محیط یکنواخت مدل شده و بطور کلی با واقعیت سازگار نیست.

در روش IEEE80 [6] شبکه زمین بصورت یک شبکه مربعی بوده که در خاک یکنواخت قرار گرفته است. وجود محدودیتهایی در تعداد هادیها، عمق شبکه، تقارن شبکه و نیز یکنواخت بودن توزیع جریان در هادیهای شبکه باعث گردیده تا دقت محاسبات پایین آمده و نتوان از آن در تمام زمینه های موردنظر استفاده کرد. همچنین در روش IEEE2000 اگر چه نحوه توزیع جریان در هادیها غیر یکنواخت در نظر گرفته شده، ولیکن اثر لایه های زمین بطور مستقیم لحاظ نگردیده است و تنها از مقاومتهای معادل بدین منظور استفاده شده است. هر چند این روش در محاسبه مقاومت زمین جواب نسبتاً قابل قبولی می دهد، اما در محاسبه سایر پارامترهای مربوطه از جمله پروفیل ولتاژ از دقت خوبی برخوردار نیست.

شهرتاش به ارائه روشی بر پایه روابط تحلیلی بمنظور محاسبه دقیق مقاومت و ولتاژ سیستم زمین پرداخته که قادرست با طراحی سیستم زمین در دو عمق متفاوت مقاومت شبکه زمین را بطور قابل توجهی کاهش دهد [7]. وی با استفاده از روش ممان به محاسبه پارامترهای سیستم زمین از جمله مقاومت زمین پرداخته است. با توجه به مقاومت هادیها و مقاومت متقابل آنها توزیع جریان در شبکه زمین را بدست آورده و بر اساس آن پتانسیل روی زمین را محاسبه نموده است [8].

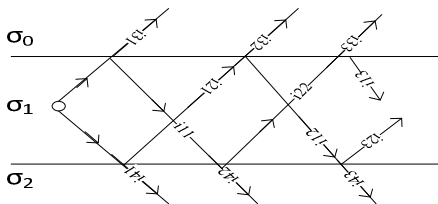
در این مقاله بمنظور در نظر گرفتن شرایط واقعی حاکم بر

## ۲-۲ روش تصویر اصلاح شده استاتیکی و

### یافتن تابع گرین

هدف اصلی در شبیه سازی سیستم زمین یافتن عناصر ماتریس Z در (معادله ۲) می باشد وقتی که زمین به شکل محیط چند لایه منظور می شود، عناصر ماتریس Z به سرعت از طریق روش تصاویر استاتیکی اصلاح شده قابل محاسبه می باشد. برای انجام محاسبات در ابتدا می بایست تابع گرین مربوطه را بدست آورد. تابع گرین بمنظور محاسبه پتانسیل الکتریکی ناشی از یک منبع نقطه ای جریان در محیط همگن هدایت پذیر در هر نقطه، بکار می رود [1].

در یک محیط چند لایه برای بدست آوردن تابع گرین مربوطه پس از تقسیم بندی هادیهای شبکه زمین به سگمنتهای کوچک با فرض یکنواخت بودن توزیع جریان در هر سگمنت، هر یک از این سگمنتهای را بصورت یک منبع جریان نقطه ای در نظر می گیرند. با استفاده از روش نور هندسی هر یک از منابع نقطه ای جریان را بصورت یک منبع نور لحاظ می کنند [3]. به این صورت که با تابش نور از هر یک از این منابع با برخورد آن با مرز محیطی متفاوت، اشعه نور به دو قسمت تقسیم می شود. یکی نوری است که از مرز عبور می کند و وارد محیط دیگر می گردد و دیگری اشعه ای است که از مرز به سمت همان محیط شامل منبع بازتابیده می شود. هر اشعه با ضریب  $\alpha$  به درون محیط اولیه بازتابیده و با ضریب  $\beta$  به محیط ثانویه وارد می شود. شکل زیر این موضوع را نمایش می دهد.



شکل ۱. نحوه تولید تصاویر استاتیکی به روش نور هندسی در شرایطی که هادی در لایه اول باشد.

$$i_{2j} = \alpha_{12} i_{1,j-1} : \alpha_{12} = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (4\text{-الف})$$

$$i_{1j} = \alpha_{01} i_{2,j-1} : \alpha_{01} = (\sigma_1 - \sigma_0) / (\sigma_1 + \sigma_0) \quad (4\text{-ب})$$

$$l_{2j} = h + l_{1,j-1} \quad (4\text{-ج}) \quad \text{از مرز ناحیه ۱ و ۲ به سمت پایین}$$

بهم مربوط می گردند [6].

$$\varphi = \sum_{k=1}^N \int_{l_j} G(r, r') I_k dl_k = \frac{1}{4\pi\sigma} \sum_{k=1}^N \frac{I_k}{l_k} \int \frac{1}{r_k} dl_k \quad (1)$$

که در آن تابع G بیانگر تابع گرین مورد نیاز ناشی از تاثیر جریان هر سگمنت بر روی ساختار هادی شبکه زمین بر میدان ایجاد شده در هر نقطه از فضا می باشد. در رابطه بالا  $\varphi$  مقدار پتانسیل الکتریکی در هر نقطه از فضا،  $I_k$  جریان در هر سگمنت،  $r_k$  فاصله هر نقطه از فضا،  $l_k$  طول هر سگمنت و  $\sigma$  رسانایی محیط می باشد.

با در نظر گرفتن تابع گرین مشاهده می شود که معادله انتگرالی بالا به راحتی قابل حل نمی باشد. البته با بکارگیری روش ممان [5] و استفاده از روش انطباق نقطه ای، معادله انتگرالی بالا به صورت معادله زیر در خواهد آمد.

$$[I] = [Z]^{-1} [V] \quad (2)$$

ماتریس بالا شامل اثر هدایتی زمین بوده و عناصر آن امپدانسهای متقابل بین سگمنتهای شبکه زمین با هم و یا بین سگمنتهای نقاط مختلف فضا میباشد.

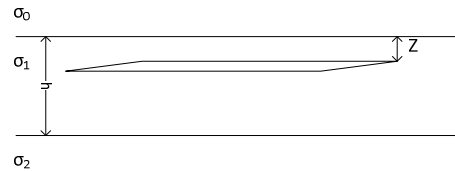
برای محیط هدایتی همگن عناصر ماتریس Z بصورت زیر محاسبه می شود.

$$Z_{jk} = \int_{l_j} \int_{l_k} G(r, r') \frac{dl_j dl_k}{l_j l_k} = \frac{1}{4\pi\sigma \cdot l_j \cdot l_k} \cdot \int_{l_j} \int_{l_k} \frac{1}{r_{jk}} dl_j dl_k \quad (3)$$

که در آن  $l_j$  طول سگمنت j ام و  $l_k$  طول سگمنت k ام می باشد. باید توجه داشت که محیط بکار رفته در شرایط معادله بالا همگن و بینهایت می باشد در حالیکه در اغلب موارد با محیط های چند لایه روبه رو هستیم، با بکار گیری از روش تصویر اصلاح شده استاتیکی می توانیم با دقت و سرعت خوبی به حل این موضوع پردازیم که در ادامه بیان خواهد شد.

$$(4-5) \quad l_{1j} = l_{2,j-1} + h \quad \text{از مرز ناحیه او ۰ به سمت بالا}$$

با استفاده از راه حل بالا برای محیط زیر به تصاویر شکل ۳ خواهیم رسید.



شکل ۲. پیکر بندی لایه های زمین و محل قرارگیری شبکه

$$G(r, r') = 1/(4\pi\sigma |r - r'|) \quad (5)$$

که در آن  $r$  بردار مکان نقطه ای است که در آن ولتاژ را بدست می آوریم و  $r'$  بردار مکان منبع نقطه ای جریان می باشد. در مورد زمین دو لایه شکل بسته تابع گرین با توجه به اندازه تصاویر و مکان آنها بصورت زیر بدست می آید، که با نتایج روش [9] یکسان است.

$$G = \frac{1}{4\pi\sigma_1} \left[ \frac{1}{r_0} + \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{k^n}{r_{n1}} + \frac{k^{n+1}}{r_{n2}} + \frac{k^{n+1}}{r_{n3}} + \frac{k^{n+1}}{r_{n4}} \right) \right] \quad (6)$$

که در آن:

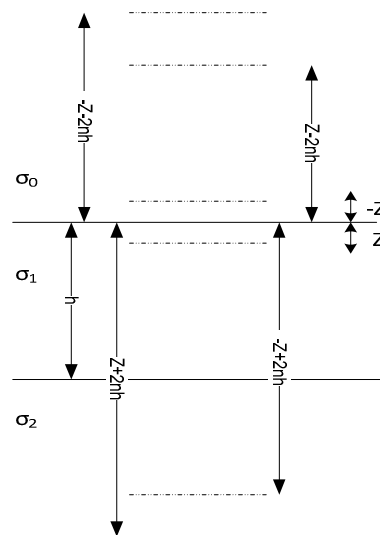
$$r_{n1} = [\rho^2 + (z + z' + H)^2]^{1/2} \quad (6-الف)$$

$$r_{n2} = [\rho^2 + (z - z' + 2h + H)^2]^{1/2} \quad (6-ب)$$

$$r_{n3} = [\rho^2 + (z - z' - 2h - H)^2]^{1/2} \quad (6-ج)$$

$$r_{n4} = [\rho^2 + (z + z' - 2h - H)^2]^{1/2} \quad (6-د)$$

$\rho$  بردار مکان در مختصات استوانه ای هر عنصر جریان،  $Z$  و  $z'$  فاصله از سطح جدا کننده زمین و هوا به ترتیب برای هر نقطه از فضا و منبع نقطه ای جریان می باشد،  $h$  عمق لایه اول و  $H=2nh$  می باشد. اگر شرایطی را در نظر بگیریم که سطح روی زمین تا ارتفاع  $h$  از ماده ای با جنس متفاوت پوشیده شده باشد، مثلاً حالتی که روی سطح زمین از برف پوشیده شده است، شبکه زمین در لایه دوم واقع می گردد و می بایست پتانسیل بر روی برف (لایه بالایی) محاسبه گردد. به عبارت دیگر منبع جریان در لایه دوم قرار دارد. تصاویر استاتیکی مربوطه بصورت زیر بدست می آید.



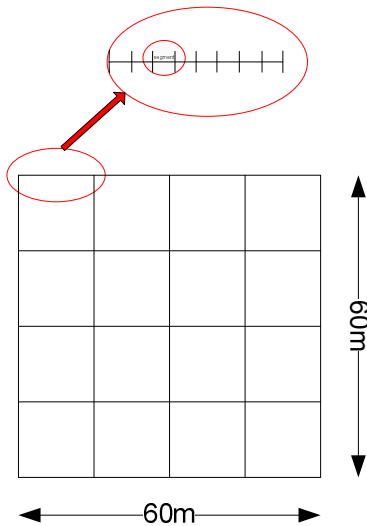
شکل ۳. مکان تصاویر استاتیکی در حالتی که شبکه زمین در لایه اول واقع گردد.

بدین ترتیب با جاگذاری تصاویر استاتیکی منبع نقطه ای جریان، محیط چند لایه به یک محیط همگن با رسانایی لایه ای تبدیل می شود که منبع نقطه ای جریان در آن قرار گرفته است و با استفاده از رابطه تابع گرین در محیط همگن، ولتاژ در هر نقطه از فضا بدست می آید. در حالت کلی با توجه به شکل مسئله می بایست، از دیدگاه مکان منبع نقطه ای جریان و مکانی که در آن می خواهیم میدان را بدست آوریم، تابع گرین را محاسبه نمود. حال آنکه در این روش با یافتن تصاویر با الگوریتم مربوطه می توان تنها با استفاده از یک تابع گرین که همان تابع گرین محیط همگن (معادله ۵) می باشد، ولتاژ را در هر نقطه از فضا

یک از این تصاویر، تابع گرین کل ساختار بدست می آید.

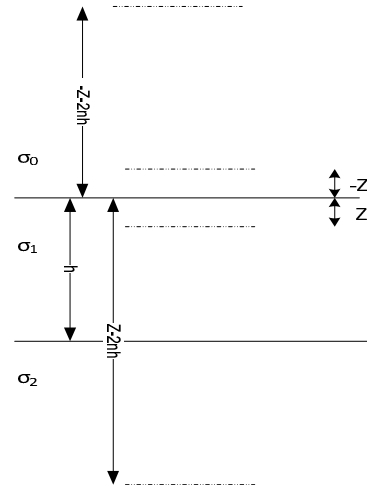
### ۳. ارزیابی و نتایج

به منظور ارزیابی روش بکار رفته در آنالیز سیستم زمین، نتایج حاصل با روش دقیق الکترومغناطیسی مورد مقایسه قرار گرفته است. در روش الکترومغناطیسی، شبکه زمین را بصورت مجموعه ای از آنتنهای سیمی در نظر گرفته و با استفاده از معادلات ماکسول حاکم بر سیم نازک واقع در محیط چند لایه در حوزه فرکانس، به حل عددی معادله انتگرال از نوع الکتریکی پرداخته می شود. دقت بسیار بالایی این روش آنرا به عنوان یک مرجع مناسب برای مقایسه نتایج، معتبر ساخته است [10]. مورد بررسی شده، یک شبکه زمین مطابق شکل ۶ در ابعاد ۶۰ در ۶۰ متر می باشد که هر طول آن، ۴ مش را شامل می شود که در یک ساختار زمین متشکل از دو لایه با رسانایی ۰/۰۰۵ برای لایه اول (لایه بالایی) و رسانایی ۰/۰۰۱۲۵ برای لایه دوم می باشد که ضخامت لایه بالایی ۴ متر بوده و جریانی برابر ۱۰۰۰ آمپر به درون شبکه زمین تزریق می گردد و شبکه زمین در دو حالت مختلف درون این ساختار زمین واقع شده است. حالت اول مربوط به یک پست برق می باشد که در آن فرض بر آنست که شبکه زمین در عمق ۰/۵ متری زمین و درون لایه اول قرار داده شده است.

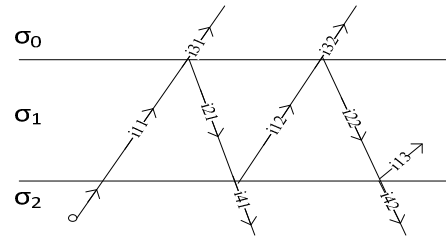


شکل ۶. ساختار شبکه زمین و ابعاد آن

در این مقاله توزیع پتانسیل را بر روی سطح زمین بدست



شکل ۴. مکان تصاویر استاتیکی در حالتیکه شبکه زمین در لایه دوم مدفون باشد.



شکل ۵. نحوه ایجاد تصاویر استاتیکی به روش نور هندسی در شرایطی که هادی در لایه دوم باشد.

و تابع گرین مربوطه برابر معادله (۷) خواهد شد.

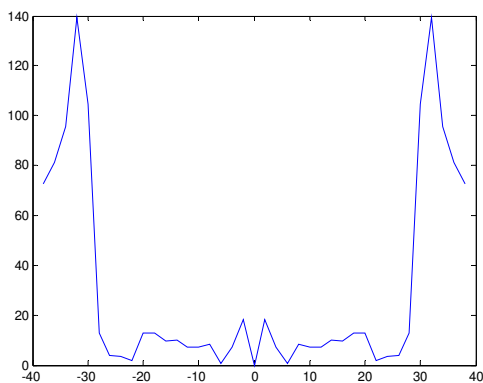
$$G = \frac{1}{4\pi\sigma_2} \left[ \frac{1}{r_0} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^n}{r_{n1}} + \frac{k^{n+1}}{r_{n2}} \right] \quad (7)$$

که در آن:

$$r_{n1} = [\rho^2 + (z + z' + H)^2]^{1/2} \quad (7\text{-الف})$$

$$r_{n2} = [\rho^2 + (z + z' + H + h)^2]^{1/2} \quad (7\text{-ب})$$

بطورکلی یافتن تابع گرین مربوط به یک ساختار بدین صورت است که ابتدا تصاویر استاتیکی عناصر جریان واقع بر ساختار شبکه زمین و یا الگوریتمی که ارتباط بین تصاویر را بیان نماید، در مورد ساختارهای با لایه بندی بیشتر بکار می رود. سپس کل مسئله بصورت یک محیط همگن با تصاویر استاتیکی عناصر جریان در نظر گرفته می شود، که با بکاربردن تابع گرین محیط همگن (معادله ۵)، برای هر



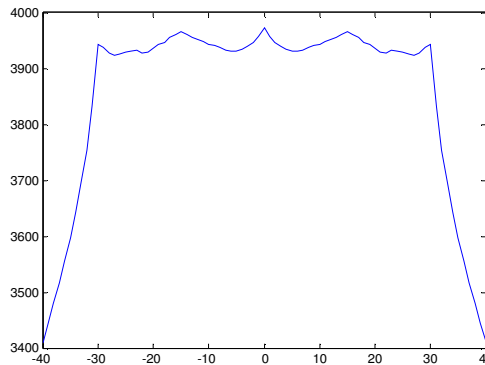
شکل ۹. نمودار ولتاژ گامی بر حسب فاصله از مرکز شبکه زمین بروش تصاویر استاتیکی

در حالت دوم به مطالعه توزیع پتانسیل در محیط یک نیروگاه پرداخته شده است، در شرایطی که روی سطح زمین با ماده ای متفاوت پوشانیده شده باشد. مثال کاربردی برای این مورد زمانیست که سطح زمین بدلیل بارش برف کاملاً پوشیده شده است. در این حالت شبکه زمین در عمق ۴/۵ متری زیر لایه اول و درون لایه دوم دفن شده است، باز هم با فرض رسانایی ماده پوشاننده سطح زمین برابر ۰/۰۰۵ و رسانایی زمین معادل ۰/۰۰۱۲۵، توزیع پتانسیل را بر روی سطح ماده پوشاننده از طریق روش الکترو مغناطیسی در شکل ۱۰ و با استفاده از روش تصاویر استاتیکی در شکل ۱۱ آورده شده است.

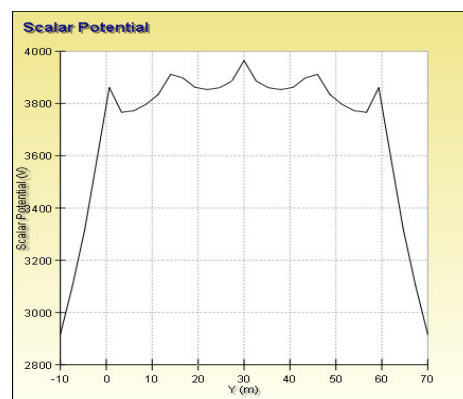
جدول ۱- مقادیر مربوط به شبکه زمین در دو حالت

ابعاد شبکه (متر)	۶۰ در ۶۰؛ شامل ۱۶ مش
عمق قرارگیری شبکه (متر)	در حالت اول؛ ۰/۵ در حالت دوم؛ ۴/۵
قطر هادی (متر)	۰/۰۱۵
رسانایی ویژه لایه بالایی (زیمنس بر متر)	۰/۰۰۵
رسانایی ویژه (زیمنس بر متر)	۰/۰۰۱۲۵
ضخامت لایه بالایی (متر)	۴

آورده ایم. نتایج حاصل از روش مقاله در شکل ۷ و نتایج حاصل از روش الکترومغناطیسی در شکل ۸ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود نتایج دو روش با یکدیگر مطابقت دارند. ولتاژ گامی حاصل از این توزیع پتانسیل بر روی سطح زمین در شکل ۹ آورده شده است.



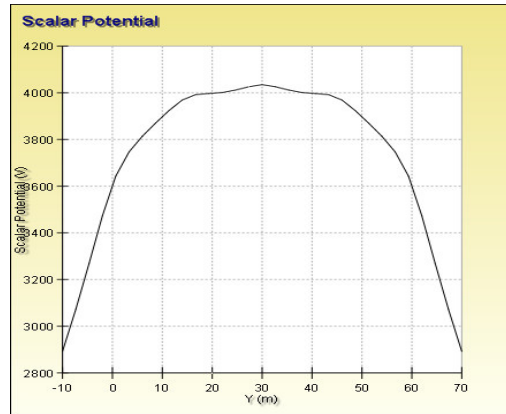
شکل ۷. نمودار ولتاژ روی سطح پست بر حسب فاصله از مرکز شبکه زمین به روش تصاویر استاتیکی



شکل ۸. نمودار ولتاژ بر حسب فاصله از لبه شبکه بروش الکترومغناطیسی

اندازه تصویر	مکان تصویر
۱	$-Z$
$k^n$	$Z + 2nh$
$k^n$	$Z - 2nh$
$k^n$	$-Z + 2nh$
$k^n$	$-Z - 2nh$

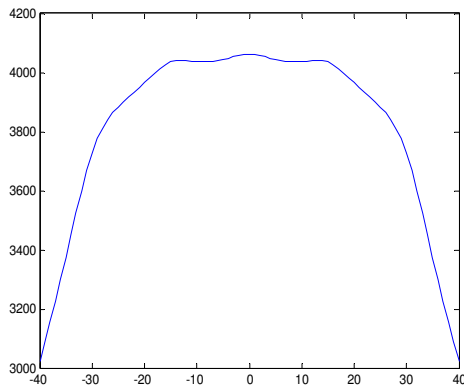
همانطور که مشاهده می شود نتایج دو روش از تطابق قابل قبولی برخوردارند که صحت نتایج روش بکار رفته در مقاله را تایید می کند. در جدول ۲ و جدول ۳ به ترتیب ضرائب و مقادیر پارامترهای مربوط به تصاویر ناشی از عناصر جریان ساختار زمین حالت اول و حالت دوم (معادله ۶ و معادله ۷)، آورده شده است.



جدول ۳. مکان و اندازه تصویر برای منبع واقع در لایه دوم

اندازه تصویر	مکان تصویر
$1 - k$	$-Z$
$(1 - k)k^n$	$Z - 2nh$
$(1 - k)k^n$	$-Z - 2nh$

شکل ۱۰. نمودار ولتاژ بر حسب فاصله از لبه به روش الکترومغناطیسی [10]



#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش تصاویر استاتیکی، محیط چند لایه را در دو حالت مختلف مدل کردیم. یکی در شرایطی مانند پست های برق که در آنها معمولا شبکه زمین درون لایه اول قرار می گیرد، و دیگری در حالتی مانند زمین نیروگاه ها که زمین در زیر توده برف قرار گرفته یا عاملی که بتواند بعنوان لایه بالایی برای زمین محسوب شود، (یعنی شبکه زمین داخل لایه دوم واقع شود و ما به محاسبه پتانسیل بر روی لایه بالایی بپردازیم) و نتایج با روش الکترومغناطیسی مقایسه گردیدند. ملاحظه می گردد که استفاده از روش تصاویر استاتیکی اصلاح شده در کنار بکارگیری روش ممان، تقریب مناسبی برای محاسبات آنالیز سیستم زمین در محیط چند لایه و فرکانس قدرت می باشد، که با کاهش قابل توجه زمان محاسبات و با دقت مطلوب، جواب مورد نظر را ارائه خواهد داد. برای بدست آوردن توزیع جریان بر روی ساختار زمین که ممکن است در هر یک از لایه های زمین واقع گردد، با بهره گیری از روش تصاویر استاتیکی اصلاح شده و با بدست آوردن تصاویر هر یک از المان های جریان روی ساختار زمین، محیط چند

شکل ۱۱. نمودار ولتاژ بر حسب فاصله از مرکز شبکه به روش SIM (روش تصاویر استاتیکی)

جدول ۲. مکان و اندازه تصویر برای منبع جریان واقع در لایه اول

model”, *Int. J. Commun Numer. Meth. Eng.*, pp. 2359-2380, June 2006.

[7] س. م. شهرتاش و ن. رضانی، "طراحی کامپیوتری شبکه زمین برای پستهای کوچک"، پانزدهمین کنفرانس مهندسی برق، ۱۳۷۹.

[8] س. م. شهرتاش و م. نجاتی، "طراحی شبکه زمین در پستهای فشار قوی"، دوازدهمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۷۶.

[9] Z. X. Li and W. J. Chen, "Numerical simulation grounding system buried within horizontal multilayer earth in frequency domain", *Commun. Numer. Meth. Eng.*, June 2007.

[10] S. A. Mosaddeghi, A. Shoory, R. Moini, and S. H. H. Sadeghi, "Electromagnetic field radiation due to energized conductors buried in multi-layer soils," *Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Avignon, France, pp. 612- 616, Sept. 2004.

لایه به یک محیط همگن تبدیل می گردد و تنها با استفاده از تابع گرین محیط همگن، و استفاده از روش ممان، توزیع جریان روی هر ساختار زمین و توزیع پتانسیل در هر یک از لایه های زمین بدست می آید. نرم افزار نوشته شده بر این اساس قادر است توزیع جریان را بر روی هر نوع پیکربندی ساختار زمین و هر شکلی از شبکه زمین بدست آورد. با استفاده از این نرم افزار می توان توزیع پتانسیل، ولتاژ گامی، توزیع میدان الکتریکی و مقاومت زمین را در زمان بسیار کوتاهی بدست آورد و نیز در فرایند طراحی سیستم زمین اثر هر یک از عوامل بالا را به راحتی مورد مطالعه قرار داد.

#### مراجع

[1] F. Dawalibi, "Electromagnetic field generated by overhead and buried short conductors, Part2 rounding networks," *IEEE Trans. Power Del.*, pp. 112-119, Oct. 1986.

[2] D. L. Madar and L. E. Zaffanella, "Network analysis of ground currents in a residential distribution system," *IEEE Trans. Power Del.*, pp 344-350, Jan. 1993.

[3] A. Selby and F. Dawalibi, "Determination of current distribution in energized conductors for the computation of electromagnetic fields," *IEEE Trans., Power Del.*, pp. 1069-1078, Apr. 1994.

[4] L. Huang and D. G. Kasten, "Model of ground grid and metallic conductor currents in high voltage ac substation for the computation of electromagnetic fields," *Elect. Power syst. Res.*, pp. 31-37, 2001.

[5] Z. J. Yuan, Z. Li, "The complex image method and its application in numerical simulation in substation grounding grids," *Commun. Numer Meth. Eng.*, pp. 835-839, 1999.

[6] Z. X. Li and J. B. Fan, " Numerical simulation of substation grounding grids buried in both horizontal and vertical earth