

تحلیل اثرات صفحه زمین دایروی محدود در آنتن‌های تک‌قطبی سیمی

داود بصائری^۱، دانشجوی دکتری؛ سیدمحمدجواد رضوی^۲، دانشیار؛ سیدحسین محسنی ارمکی^۳، دانشیار

۱- مجتمع دانشگاهی مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - d.basaery@gmail.com

۲- مجتمع دانشگاهی مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - razavismj@yahoo.com

۳- مجتمع دانشگاهی مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - mohseni@ee.iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله اثر صفحه زمین محدود آنتن بر الگوی تشعشعی آن تحلیل و بررسی شده است. الگوی تشعشعی چند نمونه آنتن تک‌قطبی سیمی ساده و یک آنتن تک‌قطبی خط‌پیچ‌دار تیغه‌ای شکل - که با المان‌های فشرده بارگذاری شده و پهنای باند 30-500MHz را پوشش می‌دهد - با صفحه زمین‌های محدود با روش‌های تحلیلی تفرق هندسی (GTD) و جریان معادل لبه (EEC) محاسبه شده‌اند. نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش GTD در حالتی که ابعاد صفحه زمین کوچک باشد کارایی خود را از دست می‌دهد و اعمال روش EEC در این حالت پترن میدان دور دقیق‌تری را از آنتن نتیجه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آنتن تک‌قطبی سیمی، صفحه زمین دایروی محدود، روش تفرق، روش جریان معادل لبه، آنتن F معکوس، آنتن T شکل، آنتن L معکوس، آنتن تیغه‌ای.

Analysis of the Effect of Finite Circular Ground Plane on the Wire Monopole Antennas

D. Basaery¹, PhD Student; S. M. J. Razavi², Associate Professor; S. H. Mohseni Armaki³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Malek-e-Ashtar, Tehran, Iran, Email: d.basaery@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Malek-e-Ashtar, Tehran, Iran, Email: razavismj@yahoo.com

3- Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Malek-e-Ashtar, Tehran, Iran, Email: mohseni@ee.iust.ac.ir

Abstract: In this paper, the effect of the finite ground plane on the antenna radiation pattern is analyzed and presented. The radiation pattern of simple wire monopoles and a blade-shaped meanderline monopole - that loaded with lumped elements and covers the 30-500MHz bandwidth - is calculated using the Geometrical Theory of Diffraction (GTD) and the Equivalent Edge Current (EEC) analytical methods. Results show that the GTD method loses its efficiency when the ground plane is small and the EEC Method results a more accurate far field pattern in this case.

Keywords: Wire monopole antenna, circular finite ground plane, diffraction method, equivalent edge current method, inverted-F antenna, T antenna, inverted-L antenna, blade antenna.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۴ و ۱۳۹۵/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۳

نام و نام خانوادگی نویسنده مسئول: سیدمحمدجواد رضوی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - تقاطع بزرگراه شهید بابایی و امام علی - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی مهندسی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

ابتدا فرض می‌شود آنتن بر روی صفحه زمین بی‌نهایت یک میدان تشعشعی را ایجاد نموده است. سپس اثر میدان تفرق شده از برخورد این میدان تشعشعی به لبه‌های صفحه زمین را محاسبه با میدان تشعشعی با صفحه زمین بی‌نهایت جمع می‌کنیم [۱۶].

برای بعضی از ساختارها مانند آنتن مونوپل ساده بر روی صفحه زمین بی‌نهایت به کمک توزیع جریان یک فرمول بسته برای الگوی تشعشعی ارائه شده است. اما برای آنتن‌هایی مثل T و L و F معکوس الگوی میدان تشعشعی با زمین بی‌نهایت به کمک یک شبیه‌سازی ساده و سریع به دست می‌آید. در واقع در این دسته از آنتن‌ها، فرایند تحلیل جداگانه صفحه زمین، کار محاسبه الگوی تشعشعی را که در روش‌های عددی با مش‌بندی پیچیده و بزرگ انجام می‌شود آسان می‌کند. به این صورت که تنها آنتن را با صفحه زمین بی‌نهایت شبیه‌سازی می‌کنیم و خروجی را به‌عنوان ورودی برای روش تحلیلی در نظر گرفته و تفرق را اعمال می‌نماییم. در نهایت پترن تشعشعی میدان دور را برای صفحه زمین محدود به دست می‌آوریم. طبق آنچه گفته شد، اساس این تحلیل آن است که میدانی که به لبه‌های صفحه زمین می‌رسد میدان دور آنتن باشد. این مسئله برای صفحات زمین با شعاع کوچک مشکلاتی ایجاد خواهد کرد که در ادامه مطرح خواهد شد.

خروجی‌های روش GTD در بازه‌ای به‌صورت $\theta_0 < \theta < \pi - \theta_0$ پاسخی منطقی خواهد داشت و در خارج آن دچار تکینگی شده و از اعتبار کافی برخوردار نمی‌باشد. با کاهش ابعاد صفحه زمین این بازه به‌طوری بزرگ می‌شود که برای شعاع صفحه زمین کمتر از 0.5λ تمام بازه $\theta_0 < \theta < \pi - \theta_0$ را فرامی‌گیرد و الگوی میدان دور به‌دست‌آمده از روش GTD کاملاً غلط خواهد بود.

۲-۱- تئوری تفرق برای صفحه زمین محدود

در بخش قبل مطرح شد که اساس روش تئوری هندسی تفرق برای حل مسئله صفحه زمین محدود آنتن‌ها، آن است که با قرار گرفتن آنتن بر روی صفحه زمین محدود، الگوی تشعشعی آنتن از تفرق میدان در لبه‌های صفحه زمین متأثر می‌شود و لازم است اصلاح گردد.

مطابق شکل ۱ آنتن مونوپلی را بر صفحه زمین دایروی شکل فرض نمایید. در این حالت تنها پرتوهای تفرق‌یافته از نقاط Q_1 و Q_2 در برآیند میدان حاصل در نقطه مشاهده P مشارکت خواهند داشت و میدان تفرق‌شده از بقیه نقاط صفحه زمین یکدیگر را ساده می‌کند [۱۴]. این دو نقطه محل تلاقی صفحه مشاهده (در اینجا صفحه $\varphi=0^\circ$) با صفحه زمین می‌باشند.

میدان تفرق‌شده بر اثر تابش E^i از Q_1 به نقطه P (که در میدان دور قرار دارد) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_1^d = E^i(Q_1) \cdot D_{el} \sqrt{\frac{\rho_{el}}{s d_1 (\rho_{el} + s d_1)}} e^{-jks d_1} \quad (1)$$

به‌طور کلی آنتن‌ها از اهمیت زیادی در ارتباطات بی‌سیم برخوردارند [۱-۲]. بیشتر روابط تشعشعی برای آنتن‌های تک‌قطبی سیمی با ساختارهای مختلف برای حالتی بیان می‌شوند که صفحه زمین آنتن یک صفحه ایده‌آل بی‌نهایت با ضریب هدایت بی‌نهایت فرض شده است. معمولاً صفحه‌ای دایروی با شعاع بزرگ‌تر یا مساوی 10λ را معادل صفحه بی‌نهایت فرض می‌کنیم و نشان داده شده است که این ابعاد از صفحه زمین تقریباً آمپدانس آنتن‌های تک‌قطبی سیمی را نسبت به صفحه بی‌نهایت تغییر نمی‌دهد [۳]. اما در اکثر کاربردهای عملی آنتن‌ها نمی‌توانند بر روی چنین صفحات بزرگی قرار گیرند. در این‌گونه موارد تحلیل و طراحی آنتن بر روی صفحه زمین واقعی معقول‌ترین راه‌حل است.

برای تحلیل تأثیر کاهش ابعاد صفحه زمین از بی‌نهایت به ابعاد واقعی معمولاً از روش شناخته‌شده تئوری هندسی تفرق (GTD) استفاده می‌شود [۳]. روش GTD از مبنایی‌ترین تکنیک‌های الکترومغناطیس است که در آن به کمک تحلیل‌های هندسی و معادلات موج پدیده تفرق امواج در لبه‌ها تحلیل می‌شود [۴]. این روش بارها در تحلیل آنتن‌های منصوب بر سطوح لبه‌دار بزرگ مانند هواپیماها [۵] و ماهواره‌ها [۶]، لبه آنتن‌های رفلکتوری [۷-۹] و صفحات زمین ناقص [۱۰-۱۲] استفاده شده است. همچنین در برخی تحقیقات از این روش برای کاهش محاسبات روش ممان استفاده شده است [۱۳-۱۴].

در آنتن‌های دارای صفحه زمین محدود، لبه‌های صفحه زمین میدان تفرق شده‌ای را ایجاد می‌کند که با میدان تشعشعی اصلی جمع می‌شود. در این حالت فرض بر این است که میدان دور آنتن به لبه صفحه برخورد می‌کند و از همین‌رو پاسخ به‌دست‌آمده در حالتی که صفحه زمین کوچک باشد دقت کافی را نخواهد داشت. در این حالت از روش جایگزین جریان معادل لبه^۲ استفاده می‌کنیم. در این روش فرض می‌شود میدان تشعشعی در لبه‌های صفحه زمین ایجاد یک جریان معادل لبه می‌کند که این جریان مجدداً تشعشعی می‌نماید.

در این مقاله پس از طرح اساس روش تفرق مثال‌هایی را به کمک این تکنیک حل کرده و با نتیجه شبیه‌سازی ساختار در نرم‌افزار CST Microwave Studio [۱۵] مقایسه می‌شود. سپس مسئله تکینگی را در روش تفرق شرح داده و برای حل مشکل روش جریان معادل لبه ارائه می‌شود. آنگاه مزیت نسبی این روش در حل مشکل صفحات زمین کوچک نشان داده خواهد شد.

۲- تحلیل صفحه زمین دایروی محدود به کمک تئوری

هندسی تفرق

برای بررسی اثر صفحه زمین محدود به کمک روش GTD لازم است میدان تفرق شده از لبه‌های صفحه زمین را یافته و آن را بر میدان تشعشعی اصلی اعمال نمود. در این روش بر اساس یک جمع آثار ساده،

و نیز:

$$\sqrt{\frac{\rho_{e2}}{s^{d2}(\rho_{e2} + s^{d2})}} \cong \frac{1}{s^{d2}} \sqrt{\frac{a}{\sin\theta}} \quad (8)$$

و لذا جمع میدان تفرق شده از دو نقطه برابر است با:

$$E^d = E^i(Q1) \cdot \sqrt{\frac{a}{\sin\theta}} \left[D_{e1} \frac{e^{-jks^{d1}}}{s^{d1}} + jD_{e2} \frac{e^{-jks^{d2}}}{s^{d2}} \right] \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (9)$$

در فرمول‌های بالا k عدد موج و a شعاع صفحه زمین و θ زاویه نقطه مشاهده از محور z است. همچنین s^{d1} و s^{d2} به ترتیب فاصله نقطه مشاهده از Q_1 و Q_2 می‌باشد و بر این اساس خواهیم داشت:

$$\begin{cases} s^{d1} = r - a \sin\theta \\ s^{d2} = r + a \sin\theta \end{cases} \dots (\text{inPhase}) \quad (10)$$

$$s^{d1} \cong s^{d2} \cong r \dots (\text{inScalar})$$

که در آن r فاصله نقطه مشاهده P از مبدأ مختصات است. در نتیجه میدان دور آنتن بر روی یک صفحه زمین محدود عبارت است از:

$$E_\theta = (E_{\theta \text{ inf.GND}} + E^d) \bar{\theta} \quad (11)$$

ضمناً E_ϕ نیز بدون تغییر باقی می‌ماند (درواقع میدان E_ϕ به دلیل موازی بودن با لبه صفحه زمین تأثیری از آن نمی‌پذیرد).

$$E_\phi = (E_{\phi \text{ inf.GND}}) \bar{\phi} \quad (12)$$

۲-۲- محاسبه الگوی تشعشی یک مونوپل سیمی ساده با صفحه

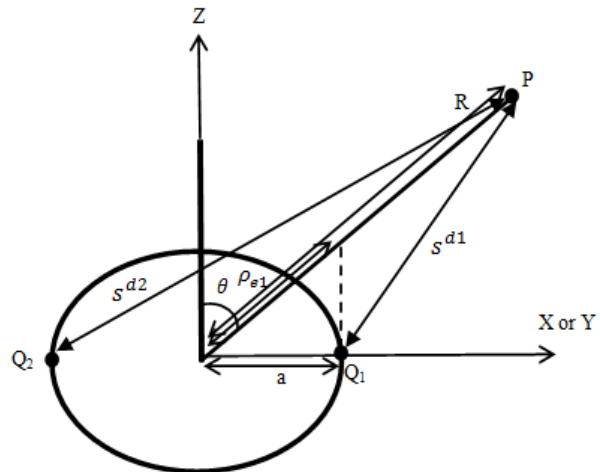
زمین محدود

میدان E_θ یک آنتن تک قطبی ساده با صفحه زمین بی‌نهایت به کمک فرمول زیر تعیین می‌گردد [۱۸]:

$$E_\theta = \frac{jZ_0 I_0 e^{-jkR} \cos(kh \cos\theta) - \cos kh}{2\pi R \sin kh \sin\theta} \quad (13)$$

توجه نمایید که از آنجا که صفحه زمین بی‌نهایت می‌باشد، میدان E فقط در نیم‌صفحه بالایی ($0 < \theta < \pi/2$) مقدار دارد و در نیم‌صفحه پایین صفر است.

حال با اعمال فرمول E^d برای این آنتن می‌توان الگوی تشعشی آنتن را با صفحه زمین‌های محدود محاسبه نمود. در شکل ۲ چند نمونه الگوی تشعشی محاسبه‌شده از این روش با حالتی که آنتن به صورت کامل با یک صفحه زمین محدود شبیه‌سازی می‌شود مقایسه شده است. در این بخش و بخش‌های آتی، فرکانس کار در مقایسه‌ها ۱GHz می‌باشد. شکل ۲-b کاملاً مشابه نمودار مرجع [۳] می‌باشد و این مسئله صحت روش را مستقل از میزان دقت شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد. توجه نمایید که محاسبه الگوی تشعشی به کمک روش GTD سرعت را تا حد زیادی افزایش می‌دهد زیرا تنها با محاسبه میدان در دو نقطه Q_1 و Q_2 الگوی تشعشی کامل آنتن در صفحه Q_1 و Q_2 به دست می‌آید.



شکل ۱: آنتن بر روی صفحه زمین دایروی

پارامتر ρ_{e1} شعاع خمیدگی جبهه موج کروی تفرق شده و یا عبارت دیگر فاصله کانونی پرتو تفرق شده از نقطه Q_1 می‌باشد. ثابت می‌شود که [۱۴]:

$$\rho_{e1} \cong \frac{a}{\sin\theta} \quad (2)$$

همچنین D_{e1} ضریب تفرق از نقطه Q_1 می‌باشد و برابر است با:

$$D_{e1} = \frac{e^{\frac{j\pi}{4}}}{2\sqrt{2\pi k}} \frac{F[2ka \cos^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2})]}{\cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2})} \quad (3)$$

$F(x)$ تابع انتقال با متغیر x می‌باشد که به صورت زیر تعریف شده است [۳]:

$$F(x) = 2j\sqrt{x} e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} -e^{-jt^2} dt \quad (4)$$

از آنجا که حل این انتگرال و تعیین مقدار $F(x)$ ساده نیست در [۱۷] توابع جایگزینی ارائه شده است که امروزه با امکانات نرم‌افزاری موجود نیازی به استفاده از آن‌ها نیست. با ساده‌سازی عبارت زیر رادیکال در (1) داریم:

$$\sqrt{\frac{\rho_{e1}}{s^{d1}(\rho_{e1} + s^{d1})}} \cong \frac{1}{s^{d1}} \sqrt{\frac{a}{\sin\theta}} \quad (5)$$

به همین صورت برای میدان تفرق شده از نقطه Q_2 خواهیم داشت:

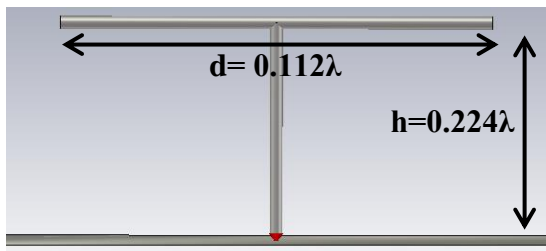
$$E_2^d = E^i(Q2) \cdot D_{e2} \sqrt{\frac{\rho_{e2}}{s^{d2}(\rho_{e2} + s^{d2})}} e^{-jks^{d2}} \quad (6)$$

برای ضریب تفرق از نقطه Q_2 داریم:

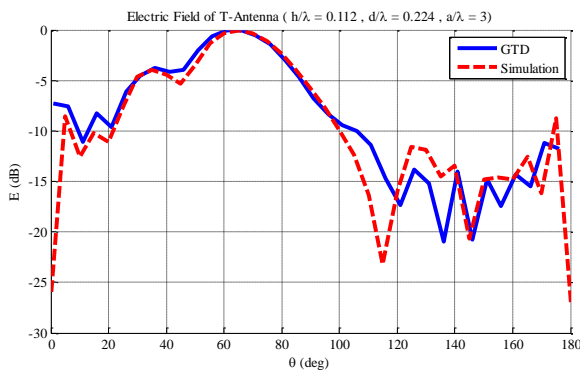
$$D_{e2} = \frac{e^{\frac{j\pi}{4}}}{2\sqrt{2\pi k}} \frac{F[2ka \cos^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2})]}{\cos(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2})} \quad (7)$$

۳-۲- محاسبه پترن تشعشی آنتن تک قطبی T شکل با صفحه زمین محدود

برای ساختارهای پیچیده تر از تک قطبی، الگوی تشعشی آنتن با صفحه زمین بی نهایت E^i رابطه بسته ندارد. برای به دست آوردن میدان با صفحه زمین محدود به صورت جداگانه آنتن را بر روی یک صفحه بی نهایت شبیه سازی نموده و $E^i(Q_1)$ و $E^i(Q_2)$ به دست آمده را برای استفاده در روابط تفرق استفاده می نماییم. به عنوان اولین مثال یک تک قطبی T شکل را مطابق شکل ۳ ابتدا بر صفحه بی نهایت شبیه سازی می نماییم و از خروجی آن برای اعمال GTD بهره می گیریم. در شکل ۴ الگوی تشعشی نهایی با حالتی که سیستم را به صورت کامل بر صفحه زمین محدود شبیه سازی کنیم مقایسه شده است.



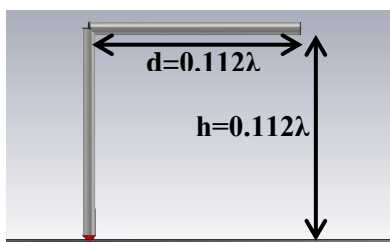
شکل ۳: آنتن تک قطبی T شکل



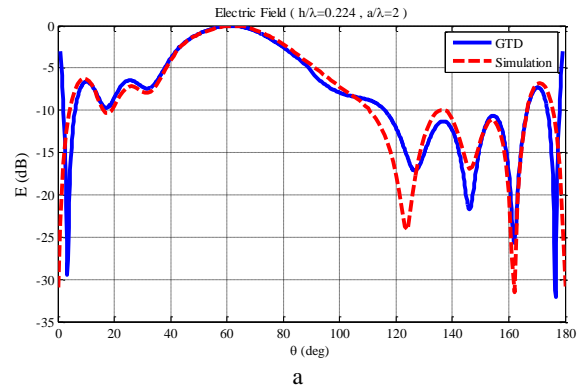
شکل ۴: مقایسه الگوی تشعشی محاسبه شده از روش GTD با شبیه سازی تمام موج CST برای آنتن تک قطبی T شکل

۴-۲- محاسبه الگوی تشعشی تک قطبی L شکل با صفحه زمین محدود

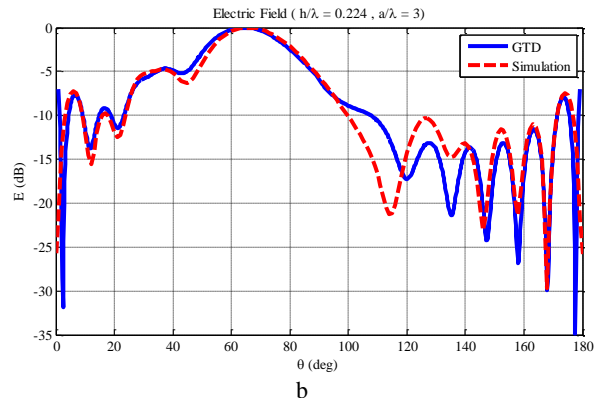
مشابه روش به کار رفته برای تک قطبی T شکل میدان تشعشی را برای یک تک قطبی L معکوس (شکل ۵) محاسبه می نماییم. در شکل ۶ الگوی تشعشی نهایی با حالتی که سیستم را به صورت کامل بر صفحه زمین محدود شبیه سازی کنیم، مقایسه شده است.



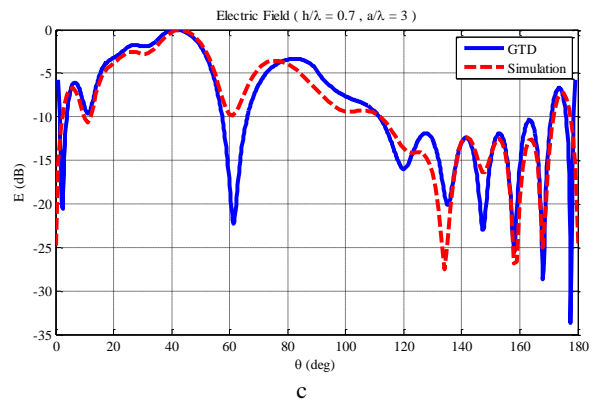
شکل ۵: آنتن تک قطبی L معکوس



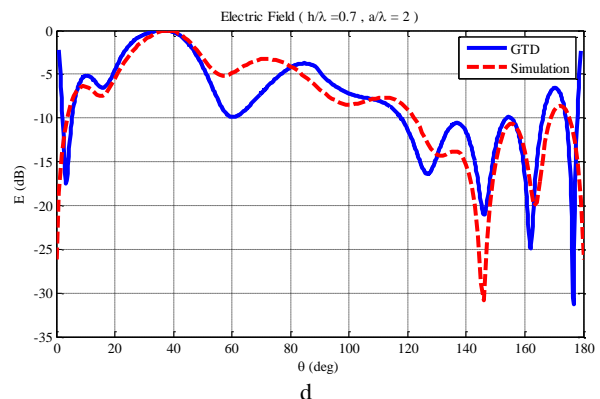
a



b



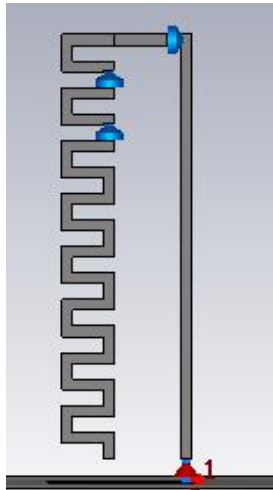
c



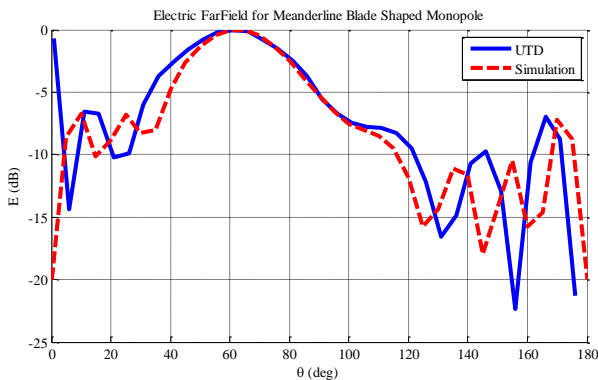
d

شکل ۶: مقایسه الگوی تشعشی محاسبه شده از روش GTD با شبیه سازی تمام موج CST برای آنتن تک قطبی ساده (a) $a/\lambda=2$, $h/\lambda=0/224$ (b) $h/\lambda=0/224$, $a/\lambda=3$ (c) $h/\lambda=0/224$, $a/\lambda=3$ (d) $h/\lambda=0/7$, $a/\lambda=2$

ارائه شده است. این آنتن برای کار در باند فرکانسی ۳۰-۵۰۰MHz به صورت کم حجم و کوچک طراحی شده است. در شکل ۱۰ الگوی تشعشعی نهایی با حالتی که سیستم را به صورت کامل بر صفحه زمین محدود شبیه سازی کنیم، مقایسه می شود. شعاع صفحه زمین $1/5\lambda$ می باشد و مقایسه پترن ها برای فرکانس ۱۰۰MHz صورت می گیرد.



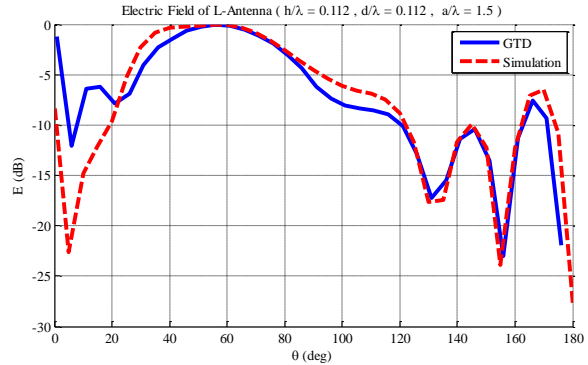
شکل ۹: آنتن تک قطبی خط پیچ دار تیغه ای شکل بارگذاری شده با المان های فشرده [۲۰]



شکل ۱۰: مقایسه الگوی تشعشعی محاسبه شده از روش GTD با شبیه سازی تمام موج CST برای آنتن تک قطبی خط پیچ دار تیغه ای شکل بارگذاری شده با المان های فشرده

۲-۷- نقاط تکینه

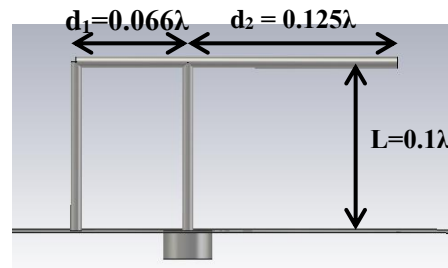
همان طور که مشاهده می شود بیشترین خطای محاسبات GTD در نقاط خارج از بازه $\theta_0 < \theta < \pi - \theta_0$ می باشد. در زوایای مشاهده نزدیک به 180° ، $\theta = 0^\circ$ درجه فرمول تفرق دچار تکینگی می گردد و از اعتبار ساقط می شود. این تکینگی ناشی از آن است که نقاط پیرامون زمین دایروی مانند یک حلقه تشعشع کننده عمل نموده و سبب ایجاد یک «خط کانونی» در این جهات می گردند. لذا نتایج حاصل از GTD در محدوده مخروط معینی که با زاویه حدی θ_0 معین می گردد فاقد اعتبار می باشد. این زاویه به شعاع خمیدگی سطح بستگی دارد و اندازه آن با رابطه ۱۴ به دست می آید [۶].



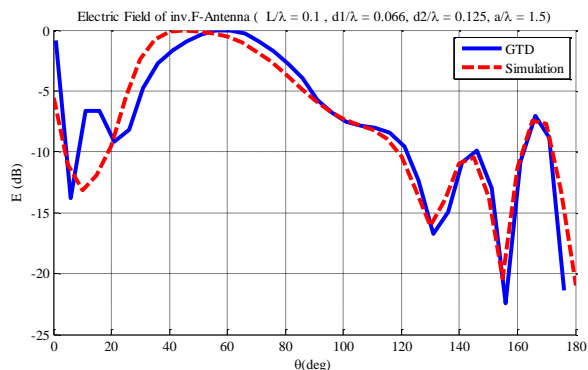
شکل ۶: مقایسه الگوی تشعشعی محاسبه شده از روش GTD با شبیه سازی تمام موج CST برای آنتن تک قطبی L معکوس

۲-۵- محاسبه الگوی تشعشعی آنتن F معکوس با صفحه زمین محدود

روش GTD را برای آنتن F معکوس شکل ۷ پیاده می نمایم. این آنتن از جمله پرکاربردترین آنتن ها در مخابرات سیار و ادوات متحرک می باشد [۱۹]. در شکل ۸ الگوی تشعشعی نهایی با حالتی که سیستم را به صورت کامل بر صفحه زمین محدود شبیه سازی کنیم، مقایسه شده است.



شکل ۷: آنتن F معکوس



شکل ۸: مقایسه الگوی محاسبه شده از روش GTD با شبیه سازی تمام موج CST برای آنتن F معکوس

۲-۶- محاسبه الگوی تشعشعی آنتن تک قطبی خط پیچ دار تیغه ای بارگذاری شده با صفحه زمین محدود

در این بخش، روش GTD را برای آنتن تک قطبی خط پیچ دار تیغه ای شکل بارگذاری شده با المان های فشرده پیاده می نمایم. ساختار آنتن در شکل ۹ آمده است. نحوه طراحی و مشخصات کامل این آنتن در [۲۰]

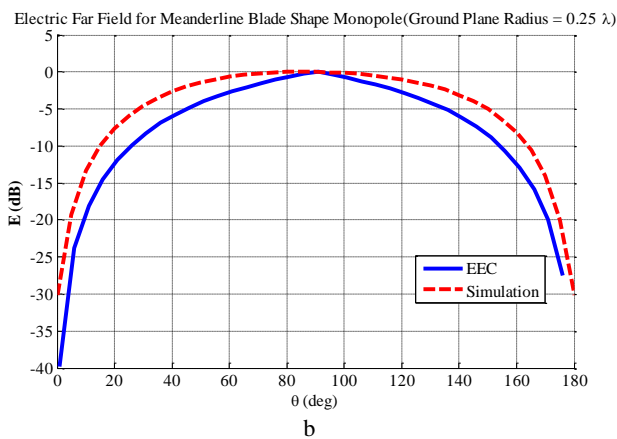
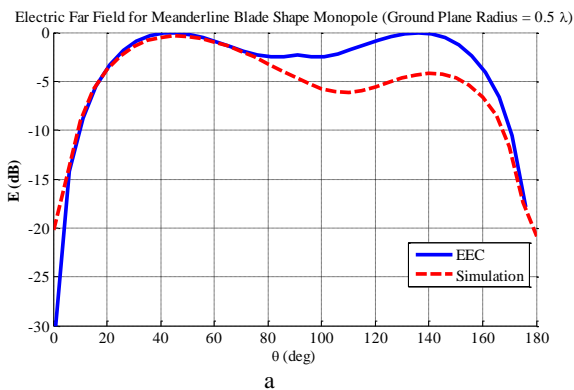
از اینجا به کمک روابط پتانسیل برداری خواهیم داشت:

$$E_{\theta}^d = a.k.M^f . J_1(k a \sin \theta) \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (16)$$

بر اساس این فرمول به سادگی می توان میدان تشعشعی آنتن با صفحه زمین کوچک را یافت.

۳-۱ - محاسبه الگوی تشعشعی آنتن تک قطبی تیغه ای بارگذاری شده با صفحه زمین محدود کوچک

در این بخش تنها به دو مقایسه از آنتن مونوپل تیغه ای بارگذاری شده با المان های فشرده با صفحه زمین های کوچک اکتفا می کنیم. در شکل ۱۲ پترن نهایی به دست آمده از EEC را با حالتی که سیستم را به صورت کامل بر صفحه زمین محدود شبیه سازی کنیم مقایسه شده است. شعاع صفحه زمین 0.5λ و 0.25λ می باشد و مقایسه پترن ها برای فرکانس 100MHz صورت گرفته است.

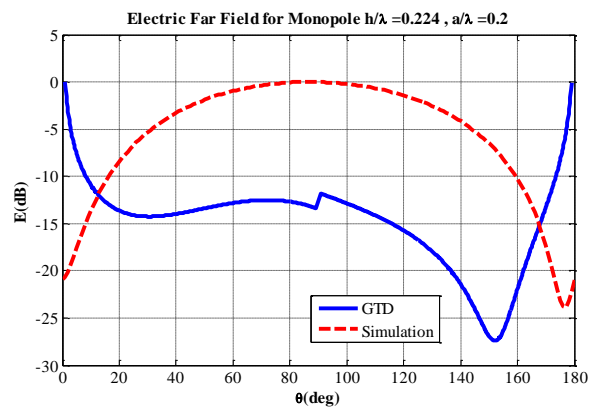


شکل ۱۲: مقایسه الگوی تشعشعی محاسبه شده از روش EEC با شبیه سازی تمام موج CST برای آنتن تک قطبی خط پیچ دار تیغه ای شکل بارگذاری شده با المان های فشرده (a) شعاع صفحه زمین 0.5λ (b) شعاع صفحه زمین 0.25λ

نتایج نشان می دهد روش EEC می تواند تا حد زیادی به حل مشکل تحلیل صفحه زمین های کوچک کمک نماید. البته توجه نمایید که اگرچه این روش برای آنتن های کوچک با صفحه زمین های کوچک مناسب می باشد، در حالتی که ابعاد آنتن و یا صفحه زمین بزرگ می شود دچار واگرایی خواهد شد. برای حل مشکل واگرایی روش EEC راه حل هایی در [۲۴-۲۱] پیشنهاد شده است.

$$\theta_0 = \sqrt[3]{\frac{2}{ka}} \quad (14)$$

در این رابطه a شعاع صفحه زمین و k عدد موج می باشد. شبیه سازی ها نشان می دهد مقدار θ_0 برای آنتن های با صفحه زمین بزرگ قابل صرف نظر است اما با کوچک شدن ابعاد صفحه زمین محدوده θ_0 افزایش یافته و کل الگوی تشعشعی را تحت تأثیر قرار می دهد. به عنوان مثال برای شعاع صفحه زمین 0.2λ پترن یک آنتن تک قطبی ساده مطابق نمودار زیر با روش GTD کاملاً غلط به دست خواهد آمد. نمونه ای از تحلیل آنتن تک قطبی ساده با صفحه زمین کوچک را در شکل ۱۱ مشاهده می کنید.



شکل ۱۱: مقایسه الگوی تشعشعی محاسبه شده از روش GTD با شبیه سازی تمام موج CST برای آنتن تک قطبی ساده با صفحه زمین کوچک

۳- استفاده از روش EEC برای حل مشکل صفحه زمین های کوچک

با توجه به مشکل مشاهده شده در روش تفرق لازم است تا راه حل دیگری را نیز بررسی نماییم. روش EEC بر اساس این تئوری بنا گردیده است که میدان های القایی و تشعشعی آنتن در لبه های صفحه زمین جریان ثانویه ای را القا می نمایند که خود مانند یک آنتن عمل نموده و تشعشع جداگانه ای خواهد داشت. بر اساس این تئوری ساده طبعاً ریاضیات ساده ای نیز به دست خواهد آمد. فرض کنید آنتنی با صفحه زمین بی نهایت در فاصله محوری Q از خود میدان $E^i(Q)$ را ایجاد نماید. توجه شود که در اینجا فاصله Q از آنتن ممکن است طوری باشد که هر دوی میدان های تشعشعی و القایی حضور داشته باشند.

این میدان بر روی محیط دایره ای به شعاع فاصله Q از آنتن (که بعداً شعاع صفحه زمین خواهد بود) ایجاد جریان های الکتریکی و مغناطیسی می کند که به کمک این جریان ها میدان تشعشعی از حلقه دایروی مربوطه به دست خواهد آمد:

$$\begin{cases} I^f = 0 \\ M^f = E^i(Q) \frac{2j \cos \theta}{k(1 + \sin \theta)} \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1 - \sin \theta}} \right] \end{cases} \quad (15)$$

با استفاده از روش‌های ارائه شده می‌توان بدون استفاده از روش‌های عددی تمام موج و مش‌بندی تمام صفحه زمین - که خصوصاً در شرایطی که صفحه زمین ابعاد بزرگی دارد کار محاسبات را سنگین خواهد کرد- با محاسباتی ساده الگوی تشعشعی آنتن‌های تک‌قطبی مختلف را بر روی صفحات زمین دایروی محدود محاسبه کرد.

مراجع

[۱] فرهاد خسروی افوسی، محمدتقی آذرمنش و جواد نوری‌نیا، «به‌کارگیری ساختارهای EBG به‌منظور افزایش پهنای باند و دایرکتیویته آنتن میکرواستریپ»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۳، شماره ۲، صفحات ۱-۸، ۱۳۹۲.

[۲] آزاده ایمانی، جواد نوری‌نیا و چنگیز قبادی، «آنتن دایورسیتی مسطح جدید پهن‌بند جهت استفاده در ارتباطات سیار»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۰، شماره ۲، صفحات ۱۳-۱۹، ۱۳۸۹.

[3] R. C. Johnson, and H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1984.

[4] J. B. Keller, "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 52, pp. 116-130, 1962.

[5] P. H. Pathak, G. Carluccio, and M. Albani, "The uniform geometrical theory of diffraction and some of its applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, no. 4, pp. 41-69, 2013.

[6] P. Alloatti, and J. Ravot, "Utilization of the geometrical theory of diffraction for antenna pattern prediction on satellites," *15th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, pp. 1-5, 2012.

[7] Y. Kim, *On a Uniform Geometrical Theory of Diffraction Based Complex Source Beam Diffraction by a Curved Wedge with Applications to Reflector Antenna Analysis*, PhD dissertation, The Ohio State University, 2009.

[8] P. H. Pathak, and Y. Kim, "A uniform geometrical theory of diffraction (UTD) for curved edges illuminated by electromagnetic beams," *General Assembly and Scientific Symposium*, pp. 1-4, 2011.

[9] M. Albani, G. Carluccio, and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for vertices formed by truncated curved wedges," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 7, pp. 3136-3143, 2015.

[10] K. H. Awadalla, and T. M. Maclean, "Input impedance of a monopole antenna at the center of a finite ground plane," *IEEE Trans. AP*, vol. 26, pp. 244-248, 1978.

[11] K. H. Awadalla, and T. M. Maclean, "Monopole antenna at center of circular ground plane: Input impedance and radiation pattern," *IEEE Trans. AP*, vol. AP. 27, no.2, pp. 151-153, 1979.

[12] Z. Živković, D. Senić, C. Bodendorf, J. Skrzypczyński, and A. Šarolić, "Radiation pattern and impedance of a quarter wavelength monopole antenna above a finite ground plane," *20th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, pp. 1-5, 2012.

[13] G. A. Thiele, and T. Newhouse, "A hybrid technique for combining moment methods with the geometrical theory of diffraction," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, no. 1, pp. 62-69, 1975.

۴- ارزیابی خطا

برای محاسبه میانگین مربع خطاها نسبت به شبیه‌سازی تمام موج از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$MSE = \text{mean} \left\{ (E_{sim} - E_{anal.})^2 \right\} \quad (17)$$

در این رابطه E_{sim} میدان الکتریکی تشعشعی حاصل از شبیه‌سازی تمام موج ساختار و $E_{anal.}$ میدان الکتریکی تشعشعی محاسبه‌شده از روش تحلیلی می‌باشد. جدول ۱ میزان خطا را در هر مورد نشان می‌دهد.

جدول ۱: خطای روش‌های تحلیلی نسبت به شبیه‌سازی

روش تحلیلی	نوع آنتن	شعاع صفحه زمین (λ)	MSE
GTD	0.224λ monopole	۲	۰/۰۰۷۵
	0.224λ monopole	۳	۰/۰۰۵۰
	0.7λ monopole	۲	۰/۰۱۶۹
	0.7λ monopole	۳	۰/۰۰۸۱
	inverted-L	۱/۵	۰/۰۱۶۹
	T-shape	۳	۰/۰۰۸۱
	inverted-F	۱/۵	۰/۰۱۱۹
	meanderline	۱/۵	۰/۰۳۲۴
EEC	meanderline	۰/۲	۰/۳۱۰۰
	meanderline	۰/۵	۰/۰۴۱۹
	meanderline	۰/۲۵	۰/۰۲۴۸

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر محدودیت صفحه زمین بر الگوی تشعشعی آنتن‌های تک‌قطبی را به کمک دو روش تحلیلی GTD و EEC موردبررسی قرار گرفت و این دو روش را با هم مقایسه شدند. بر اساس آنچه مشاهده شد روش GTD - که در آن اثر تفرق میدان در لبه‌های صفحه زمین مبنای محاسبه پترن تشعشعی قرار می‌گیرد- علی‌رغم قابلیت مناسب و نتایج خوبی که ارائه می‌دهد یک نقیصه بزرگ خواهد داشت. این روش در زوایای θ نزدیک به صفر و 180° درجه دچار تکینگی شده و پاسخ آن از درجه اعتبار ساقط می‌گردد. مشاهده شد که برای صفحه زمین‌های کوچک‌تر بازه زوایای تکینگی افزایش یافته و به‌مرور کل الگوی تشعشعی محاسبه‌شده را دچار خطای عمده می‌نماید. نشان داده شد که برای آنتنی با صفحه زمین به شعاع 0.2λ میانگین مربع خطاها تا 0.31 افزایش می‌یابد. برای حل این مشکل روش EEC پیشنهاد شده و موردبحث قرار گرفت. در این روش الگوی تشعشعی به کمک یک فرض ساده به‌دست می‌آید و آن اینکه لبه صفحه زمین به‌مثابه یک آنتن حلقوی در نظر گرفته می‌شود که توزیع جریان بر روی آن همان اثر میدان‌های القایی از آنتن اصلی است. به کمک این فرض و با محاسبه جریان القایی الگوی تشعشعی آنتن در حضور صفحه زمین محدود محاسبه می‌شود. نشان داده شد که الگوی تشعشعی محاسبه‌شده در این روش مشکل تکینگی را نخواهد داشت و میانگین مربع خطاها به حدود 0.04 کاهش می‌یابد.

- [19] R. King, C. Harrison, and D. Denton, "Transmission line missile antennas," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 8, no. 1, pp. 88-90, 1960.
- [20] D. Basaery, S. M. Razavi, and S. H. Mohsani-Armaki, "An ultra low-profile ultra wideband blade shape monopole antenna," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 7, pp. 1695-1699, 2015.
- [21] A. Michaeli, "Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation," *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. AP-32, no. 3, pp. 252-258, 1984.
- [22] A. Michaeli, "Correction to equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation," *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. AP-33, no.2, pp. 227-227, 1985.
- [23] A. Michaeli, "Elimination of infinities in equivalent edge currents, Part I: Fringe current components," *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. AP-34, no. 7, pp. 912-918, 1986.
- [24] A. Michaeli, "Elimination of infinities in equivalent edge currents, Part II: Physical optics components," *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. AP-34, no. 8, pp. 1034-1037, 1986.
- [14] A. Becker, and V. Hansen, "A hybrid method combining the multi temporal resolution time-domain method of moments with the time-domain geometrical theory of diffraction for thin-wire antenna problems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 3, pp. 953-960, 2006.
- [15] [Online], <https://www.cst.com/Products/CSTMWS>
- [۱۶] محمدصادق ناصری، تعیین پرتو تشعشی و امیدانس آنتن ماریچ تک قطبی در مد نرمال تشعشی بر روی زمین محدود دایروی با استفاده از نظریه پراش هندسی، پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۷۴.
- [17] P. H. Pathak, and R. G. Kouyoumjian, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proc.IEEE*, vol. 62, pp. 1448-1461, 1974.
- [18] C. A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, John Wiley & Sons Pub., 2008.

زیرنویس‌ها

¹ Geometrical Theory of Diffraction (GTD)

² Equivalent Edge Current Method (EEC)

³ Meanderline

⁴ Singular

⁵ Caustics

⁶ Mean Square Error (MSE)