

نامری ساز الکترومغناطیسی به عنوان شیلد الکتریکی

با کمترین سطح مقطع پراکندگی

علی قائدی^۱

زهرا اطلس باف^۲، عباس پیرهادی^۳

چکیده

در این مقاله، میدان‌های الکترومغناطیسی برای نامری ساز استوانه‌ای فرامواد^۴ با تمام جزئیات بررسی شده است. معادله موج برای نواحی مختلف، استخراج شده است. مسئله در دو حالت قرار گرفتن منبع خطی الکتریکی^۵ در ناحیه درون و نیز در ناحیه بیرون از نامری ساز بررسی شده است و میدان‌های پراکندگی متناظر محاسبه شده است و نتایج با شبیه‌سازی تمام موج با استفاده از بسته نرم افزاری کامسول^۶ تصدیق شده است. وابستگی رفتار نامری ساز به فرکانس بررسی شده است و نتایج تحقیق نشان می‌دهد از ساختار نامری ساز الکترومغناطیسی ساده شده با قابلیت پیاده‌سازی عملی، می‌توان به عنوان شیلد و محافظ الکتریکی مدارات مخابراتی و الکترونیکی فرکانس بالا، با کمترین اثر پراکندگی بهره برد.

کلید واژه

نامری ساز الکترومغناطیسی، فرا مواد، انتقال مختصات، شیلد الکتریکی، سطح مقطع پراکندگی

^۱ دانشجوی دکتری برق مخابرات، دانشگاه تربیت مدرس alighaedi@modares.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

^۳ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی

^۴ Metamaterial Cylindrical Cloak

^۵ Electric Line Source

^۶ COMSOL Multiphysics

تاریخ پذیرش: ۱۵ تیر ۱۳۹۱

تاریخ دریافت: ۲۲ فروردین ۱۳۹۱

مقدمه

علاقه زیاد به استتار و پنهان‌سازی اجسام منجر به پیشرفت‌های اخیر در زمینه ساختار نامریی‌ساز الکترومغناطیسی گردیده است [۱-۳]. برای نخستین بار پندری و همکارانش [۱] ساختار نامریی‌ساز الکترومغناطیسی بر مبنای انتقال مختصات پیشنهاد دادند. در نامریی‌ساز پیشنهاد شده، میدان‌های الکترومغناطیسی طوری کنترل و دستکاری می‌شدند که از اطراف ناحیه پنهان‌شونده مورد نظر منتشر شوند. یک نمونه از این نوع نامریی‌ساز با پارامترهای ساده شده، شامل حلقه‌های شکافته شده تشدیدي^۷ در فرکانس‌های میکروویو ساخته و اندازه‌گیری شده است [۲]. با توجه به تغییر ناپذیر بودن معادلات ماکسول در اثر انتقال مختصات، پارامترهای اساسی ماده در سیستم مختصات انتقال یافته به عنوان یک مجموعه از پارامترهای اساسی ماده جدید تعبیر می‌شود [۳]. استفاده از پوشش مواد پلاسمونیک برای حذف پراکندگی [۴] و روش انتقال همدیس نوری [۵]، از جمله رویکردهای دیگری هستند که برای دستیابی به پنهان‌سازی وجود دارد. نامریی‌ساز الکترومغناطیسی بر مبنای انتقال مختصات، هم به صورت تحلیلی و هم به صورت عددی مدل‌سازی و بررسی شده است. یک مدل بر مبنای روش پراکندگی Mie برای تحلیل نامریی‌ساز کروی به کار گرفته شده است [۶]. همچنین نشان داده شده است که سطوح ولتاژ الکتریکی و مغناطیسی غیرعادی بر روی سطح درونی نامریی‌ساز ایده‌آل القاء می‌گردد [۷]. مدل پراکندگی تمام موج نیز برای بررسی نامریی‌ساز استوانه‌ای استفاده شده است [۸-۱۰]. در مطالعات انجام شده، مشخصات نامریی‌ساز شامل حساسیت یک نامریی‌ساز ایده‌آل نسبت به اختلال کوچک در پارامترها، تاثیر تلفات و نیز نامریی‌ساز با پارامترهای ساده شده بحث شده است. مدل‌سازی‌های عددی متعددی برای نامریی‌ساز الکترومغناطیسی بر مبنای انتقال مختصات انجام شده است از جمله شبیه‌سازی با استفاده از بسته نرم‌افزاری تجاری کامسول که بر اساس روش المان محدود است [۱۱-۱۲] و شبیه‌سازی بر اساس مدل FDTD که در حوزه زمان است [۱۳]. روش تحلیلی سری توابع ویژه برای مطالعه مشخصات میدان نزدیک استوانه‌ای با ضرایب گذردهی و نفوذپذیری هر دو منفی در [۱۴] ارائه شده است. اکثر مطالعات بر اساس موج مسطح تابیده شده از بیرون نامریی‌ساز بوده است و کمترین بررسی و مطالعه راجع به منبع خطی الکتریکی در درون نامریی‌ساز استوانه‌ای انجام شده است هر چند بحث شیلد با ساختار استوانه‌ای از دیر هنگام مورد توجه و مطالعه بوده است [۱۵] و نیز میزان اثر بخشی انواع شیلدهای مغناطیسی و الکتریکی با ساختار استوانه‌ای معمولی بررسی شده است [۱۶-۱۸]. ولی ساختار نامریی‌ساز الکترومغناطیسی استوانه‌ای به عنوان شیلد تاکنون بررسی نشده است. با توجه به اینکه بسیاری از سازه‌های هوافضایی مانند ماهواره‌ها و موشک‌های حاوی مدارات مخابراتی و الکترونیکی فرکانس بالا،

Split Ring Resonators (SRRs)^۷

نیز دارای ساختار استوانه‌ای هستند، اهمیت بررسی ساختارهای مختلف شیلد استوانه‌ای مضاعف می‌گردد.

در این مقاله، مشخصات پراکندگی نامرئی‌ساز الکترومغناطیسی استوانه‌ای، برای دو حالت منبع در بیرون و نیز منبع در درون آن مطالعه و بررسی شده است و نامرئی‌ساز الکترومغناطیسی به عنوان شیلد و محافظ الکتریکی مدارات الکترونیکی فرکانس بالا معرفی شده و وابستگی عملکرد آن به فرکانس و امکان تحقق عملی آن بررسی شده است. در ادامه حل دقیق معادله موج برای نامرئی‌ساز ارائه شده است و فرمولاسیون میدان‌های الکترومغناطیسی و ضرایب بسط بحث و بررسی شده است و نتایج مدل‌سازی تحلیلی و مقایسه با شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار کامسول و بررسی وابستگی عملکرد نامرئی‌ساز به فرکانس و نیز بررسی نامرئی‌ساز ساده شده قابل پیاده‌سازی در بخش پایانی آمده است.

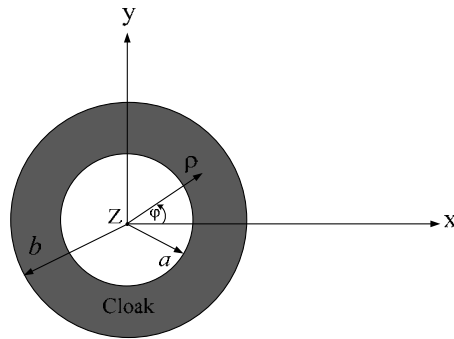
معادله موج در نامرئی‌ساز استوانه‌ای

یک نامرئی‌ساز الکترومغناطیسی استوانه‌ای بر اساس انتقال مختصات در شکل (۱) نشان داده شده است [۲]. این انتقال ناحیه استوانه‌ای $0 < \rho < b$ را به ناحیه حلقوی $a < \rho < b$ تبدیل می‌کند، که a و b شعاعهای داخلی و خارجی نامرئی‌ساز استوانه‌ای هستند. یک مجموعه کامل از پارامترهای ماده برای نامرئی‌ساز ایده‌آل به صورت زیر است [۲].

$$\varepsilon_{\rho} = \mu_{\rho} = \frac{\rho - a}{\rho} \quad (۱ - الف)$$

$$\varepsilon_{\varphi} = \mu_{\varphi} = \frac{\rho}{\rho - a} \quad (۱ - ب)$$

$$\varepsilon_z = \mu_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \frac{\rho - a}{\rho} \quad (۱ - ج)$$



شکل ۱. مدل نامریی‌ساز استوانه‌ای ایده‌آل

به منظور استخراج معادله موج در ناحیه نامریی‌ساز استوانه‌ای، از معادلات ماکسول در حالت بدون منبع و با تانسورهای ضرایب گذردهی و نفوذپذیری استفاده می‌کنیم.

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \bar{\mu} \vec{H} \quad (2-f)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \bar{\epsilon} \vec{E} \quad (2-b)$$

و از ترکیب دو معادله (۲-الف) و (۲-ب) می‌توان یک معادله فقط بر حسب میدان الکتریکی بدست آورد:

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega} \bar{\epsilon}^{-1} \left\{ \nabla \times \left[\frac{1}{-j\omega} \bar{\mu}^{-1} (\nabla \times \vec{E}) \right] \right\} \quad (3)$$

بنابراین معادله موج در ناحیه نامریی‌ساز به صورت زیر خواهد بود:

$$\nabla \times [\bar{\mu}^{-1} (\nabla \times \vec{E}^c)] - \omega^2 \bar{\epsilon} \vec{E}^c = 0 \quad (4)$$

منظور از \vec{E}^c میدان الکتریکی درون ناحیه نامریی‌ساز است در اینجا ما فقط پلاریزاسیون TM^z بررسی و تحلیل می‌کنیم، هر چند تحلیل پلاریزاسیون TE^z نیز کاملاً سر راست است. زیرا با توجه به رابطه (۱) و تشابه کامل تعریف مولفه‌های متناظر ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی برای نامریی‌ساز ایده‌آل، به طریق کاملاً مشابه می‌توان با استفاده از دوگانی الکترومغناطیسی معادله موج میدان مغناطیسی برای پلاریزاسیون TE^z استخراج نمود که دوگان

میدان الکتریکی استخراج شده است. بنابراین رفتار و عملکرد نامرئی‌ساز ایده‌آل مستقل از پلاریزاسیون است.

برای پلاریزاسیون TM^z که فقط با مولفه z میدان الکتریکی سر و کار داریم. معادله (۴) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\rho^2 \frac{\partial^2 E_z^c}{\partial \rho^2} + \rho \mu_\phi \frac{\partial E_z^c}{\partial \rho} + \frac{\mu_\phi}{\mu_\rho} \frac{\partial^2 E_z^c}{\partial \phi^2} + \varepsilon_z \mu_\phi \rho^2 \beta_0^2 E_z^c = 0 \quad (۵)$$

β_0 عدد موج در فضای آزاد است. همانطور که از معادله (۵) پیدا است، فقط پارامترهای μ_ρ ، μ_ϕ و ε_z با معادله موج مربوط به E_z^c مرتبط هستند. با جایگذاری پارامترهای نامرئی‌ساز ایده‌آل با استفاده از معادلات (۱-الف) تا (۱-ج)، معادله موج به صورت زیر در می‌آید.

$$\rho^2 \frac{\partial^2 E_z^c}{\partial \rho^2} + \frac{\rho^2}{\rho - a} \frac{\partial E_z^c}{\partial \rho} + \frac{\rho^2}{(\rho - a)^2} \frac{\partial^2 E_z^c}{\partial \phi^2} + \left(\frac{b}{b - a} \right)^2 \rho^2 \beta_0^2 E_z^c = 0 \quad (۶)$$

با استفاده از روش جداسازی متغیرها $E_z^c(\rho, \phi, z) = E_z^c(\rho) \cdot E_z^c(\phi) \cdot E_z^c(z)$ و نیز با در نظر گرفتن $E_z^c(\phi) = e^{jn\phi}$ و $E_z^c(z) = e^{j\beta_z z}$ می‌توان $E_z^c(\rho)$ را با حل معادله دیفرانسیل بسل مرتبه n زیر یافت [۱۹].

$$(\rho - a)^2 \frac{d^2 E_z^c(\rho)}{d\rho^2} + (\rho - a) \frac{dE_z^c(\rho)}{d\rho} + \left[\left(\frac{b}{b - a} \right)^2 (\rho - a)^2 \beta_0^2 - n^2 \right] E_z^c(\rho) = 0 \quad (۷)$$

حل عمومی معادله (۷) به صورت $f_n[\beta_\rho(\rho - a)]$ است، که $\beta_\rho = \beta_0 b / (b - a)$ و f_n تابع بسل یا هنکل درجه n است. بنابراین میدان الکتریکی درون ناحیه نامرئی‌ساز را می‌توان به صورت معادله (۸) نوشت:

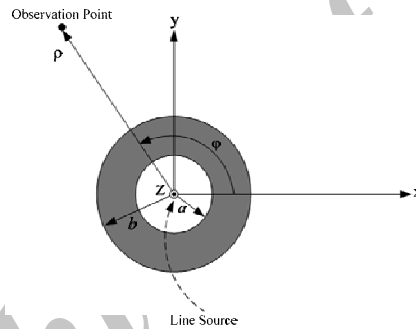
$$E_z^c(\rho, \phi, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \alpha_n^{c1} J_n[\beta_\rho(\rho - a)] + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(\rho - a)] \right\} e^{jn\phi + j\beta_z z} \quad (۸)$$

که α_n^{c1} و α_n^{c2} ضرایب مجهول بسط هستند و نیز J_n و $H_n^{(1)}$ توابع بسل و هنکل نوع اول مرتبه n هستند.

فرمول بندی میدان الکتریکی

در این بخش میدان‌های الکتریکی برای نواحی مختلف استخراج شده است. شکل (۲) پیکربندی یک نامریی‌ساز استوانه‌ای با شعاع بیرونی b و شعاع درونی a و نیز محور استوانه در راستای Z را نشان می‌دهد.

در این پیکربندی منبع خطی الکتریکی در درون نامریی‌ساز واقع شده است. بدون آن که از کلیت مسأله کاسته شود فرض می‌کنیم ناحیه درونی $\rho < a$ و ناحیه بیرون از نامریی‌ساز $\rho > b$ فضای آزاد باشد. میدان الکتریکی یک منبع خطی الکتریکی بی‌نهایت را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۹]:



شکل ۲. پیکربندی نامریی‌ساز استوانه‌ای با منبع خطی الکتریکی در درون نامریی‌ساز

$$E_z^i(\rho, \varphi) = -\frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0} \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_0 \rho) H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') e^{jn(\varphi - \varphi')} & \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_0 \rho') H_n^{(2)}(\beta_0 \rho) e^{jn(\varphi - \varphi')} & \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (9)$$

بنابراین میدان الکتریکی برای ناحیه درونی $\rho < a$ را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۲۰]:

$$E_z^{\text{int}}(\rho, \varphi) = E_z^i(\rho, \varphi) + \left(-\frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_n^{\text{int}} J_n(\beta_0 \rho) e^{jn(\varphi - \varphi')} \quad (10)$$

مطابق معادله (۸)، میدان الکتریکی در ناحیه نامرئی‌ساز یعنی $a < \rho < b$ به صورت زیر در می‌آید:

$$E_z^{\text{out}}(\rho, \phi) = \left(-\frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \alpha_n^{c1} J_n(\beta_\rho(\rho - a)) + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}(\beta_\rho(\rho - a)) \right\} e^{jn(\phi - \phi')} \quad (11)$$

و در نهایت میدان الکتریکی در ناحیه بیرونی به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۰]:

$$E_z^{\text{out}}(\rho, \phi) = \left(-\frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_n^{\text{out}} H_n^{(2)}(\beta_0 \rho) e^{jn(\phi - \phi')} \quad (12)$$

ضرایب مجهول چهار گانه α_n^{int} ، α_n^{c1} ، α_n^{c2} و α_n^{out} برای محاسبه میدان الکتریکی در نواحی مختلف بایستی با اعمال شرایط مرزی پیدا کرد. برای پرهیز از واگرایی در محاسبات، شعاع داخلی نامرئی‌ساز را $\rho = a + \delta$ فرض می‌کنیم [۸].

از اعمال شرایط مرزی بر روی مرز $\rho = a$ می‌توان نوشت:

$$J_n(\beta_0 \rho') H_n^{(2)}[\beta_0(a + \delta)] + \alpha_n^{\text{int}} J_n[\beta_0(a + \delta)] = \alpha_n^{c1} J_n(\beta_\rho \delta) + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}(\beta_\rho \delta) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \beta_0 J_n(\beta_0 \rho') H_n^{(2)}[\beta_0(a + \delta)] + \beta_0 \alpha_n^{\text{int}} J_n[\beta_0(a + \delta)] \\ = \frac{\beta_\rho}{\mu_\phi(a + \delta)} \alpha_n^{c1} J_n(\beta_\rho \delta) + \frac{\beta_\rho}{\mu_\phi(a + \delta)} \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}(\beta_\rho \delta) \end{aligned} \quad (14)$$

به همین ترتیب با اعمال شرایط مرز بر روی مرز $\rho = b$ نیز می‌توان نوشت:

$$\alpha_n^{\text{out}} H_n^{(2)}(\beta_0 b) = \alpha_n^{c1} J_n[\beta_\rho(b - a)] + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(b - a)] \quad (15)$$

$$\beta_0 \alpha_n^{\text{out}} H_n^{(2)}[\beta_0(a + \delta)] = \frac{\beta_\rho}{\mu_\phi(b)} \alpha_n^{c1} J_n[\beta_\rho(b - a)] + \frac{\beta_\rho}{\mu_\phi(b)} \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(b - a)] \quad (16)$$

با استفاده از معادلات (۱۳) تا (۱۶) و نیز رونسکین توابع بسل [۱۹] ضرایب بسط مجهول را می‌توان به صورت زیر یافت:

$$\alpha_n^{\text{int}} = -J_n(\beta_0 \rho') \times \frac{\left[\frac{b\delta}{a(b-a)} \frac{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)}{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)} H_n^{(2)}(\beta_0 a) - H_n^{(2)}(\beta_0 a) \right]}{\left[\frac{b\delta}{a(b-a)} \frac{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)}{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)} J_n(\beta_0 a) - J_n(\beta_0 a) \right]} \quad (17)$$

$$\alpha_n^{\text{out}} = -\frac{J_n(\beta_0 a)}{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)} \times J_n(\beta_0 \rho') \times \frac{\left[\frac{b\delta}{a(b-a)} \frac{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)}{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)} H_n^{(2)}(\beta_0 a) - H_n^{(2)}(\beta_0 a) \right]}{\left[\frac{b\delta}{a(b-a)} \frac{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)}{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)} J_n(\beta_0 a) - J_n(\beta_0 a) \right]} + \frac{H_n^{(2)}(\beta_0 a)}{H_n^{(2)}\left(\beta_0 \frac{b}{b-a}\delta\right)} J_n(\beta_0 \rho') \quad (18)$$

$$\alpha_n^{c1} = 2\alpha_n^{\text{out}}, \quad \alpha_n^{c2} = -\alpha_n^{\text{out}} \quad (19)$$

هنگامی که $\delta \rightarrow 0$ مخرج (۱۸) به سمت بی نهایت میل می کند و صورت آن محدود باقی می ماند، بنابراین ضریب α_n^{out} به سمت صفر میل می کند و با توجه به معادله (۱۹) ضرایب α_n^{c1} و α_n^{c2} نیز صفر می گردند. پس در حالت منبع در ناحیه درونی $\rho < a$ ، هیچ میدانی درون لایه نامریی ساز وجود ندارد و نیز میدانی در ناحیه بیرونی $\rho > a$ نیز وجود نخواهد داشت. یعنی از منبع خطی الکتریکی موجود در ناحیه درونی، هیچ موجی به بیرون از نامریی ساز نشت نمی کند، بنابراین در این حالت نامریی ساز ایده آل نمایانگر یک شیلد کامل است.

به روشی مشابه، روابط تحلیلی میدان الکتریکی برای نامریی ساز الکترومغناطیسی که از بیرون تحت تابش امواج ناشی از منبع خطی الکتریکی قرار می گیرد، را می توان استخراج نمود. میدان های الکتریکی در نواحی مختلف را می توان به صورت زیر بیان نمود [۱۹]:

$$E_z^S(\rho, \varphi) = -\frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega \epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[A_n^S H_n^{(2)}(\beta_0 \rho) \right] e^{jn(\varphi-\varphi)} \quad \rho \geq b \quad (20)$$

$$E_z^S(\rho, \varphi) = -\frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega \epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ A_n^{c1} J_n[\beta_\rho(\rho-a)] + A_n^{c2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(\rho-a)] \right\} \times e^{jn(\varphi-\varphi)} \quad a \leq \rho \leq b \quad (21)$$

$$E_z^{int}(\rho, \varphi) = -\frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [A_n^{int} J_n(\beta_0 \rho)] e^{in(\varphi - \varphi')} \quad \rho \leq a \quad (22)$$

که ضرایب مجهول چهارگانه A_n^{int} ، A_n^{C1} ، A_n^{C2} و A_n^S را برای محاسبه میدان الکتریکی در نواحی مختلف بایستی با اعمال شرایط مرزی پیدا کرد.

با اعمال شرایط مرزی بر روی سطوح استوانه‌ای و نیز پس از انجام عملیات جبری و بهره‌گرفتن از محدودیت‌های تابع بسل هنگامی که آرگومان آن به سمت صفر میل می‌کند، ضرایب مجهول مذکور به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$A_n^{C1} = -H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') \times \frac{J'_n(\beta_0 b) H_n^{(2)}(\beta_0 b) - J_n(\beta_0 b) H_n^{(2)'}(\beta_0 b)}{J'_n[\beta_\rho(b-a)] H_n^{(2)}(\beta_0 b) - J_n[\beta_\rho(b-a)] H_n^{(2)'}(\beta_0 b)} \quad (23 - \text{الف})$$

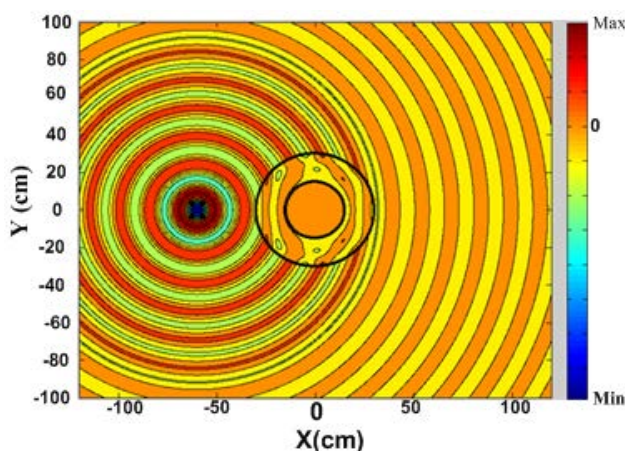
$$A_n^{C2} = 0, \quad A_n^S = 0, \quad A_n^{int} = 0 \quad (23 - \text{ب})$$

این خود نمایانگر این موضوع است که میدان‌های پراکندگی از نامرئی‌ساز، هنگامی که از بیرون تحت تابش امواج قرار می‌گیرد صفر است در نتیجه سطح مقطع راداری آن نیز صفر خواهد بود.

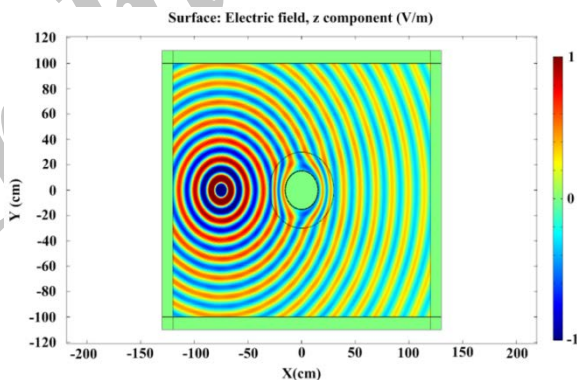
نتایج عددی و شبیه‌سازی

در این بخش، برای پیکربندی شکل (۲) میدان‌های الکترومغناطیسی محاسبه شده در کلیه نواحی براساس عبارات تحلیلی (۱۰) تا (۱۲) و نیز (۲۰) تا (۲۲) با شبیه‌سازی تمام موج حاصل از بسته نرم‌افزاری کامسول، که بر پایه مدل‌المان محدود کار می‌کند، تأیید شده است. در این شبیه‌سازی‌ها فرکانس کار را ۲GHz فرض شده است و شعاع درونی نامرئی‌ساز برابر با یک طول موج و شعاع بیرونی آن دو برابر طول موج نظر گرفته شده است. برای حالت تابش از بیرون نامرئی‌ساز، یک منبع خطی الکتریکی در فاصله دو برابر طول موج از مرکز بیرونی نامرئی‌ساز در نظر گرفته شده است و برای حالت تابش از درون نامرئی‌ساز یک منبع خطی بر روی محور استوانه فرض شده است. برای حصول اطمینان از همگرایی در محاسبات، مجموع سری‌ها را تا ۴۵ جمله در نظر گرفته شده است [۱۴].

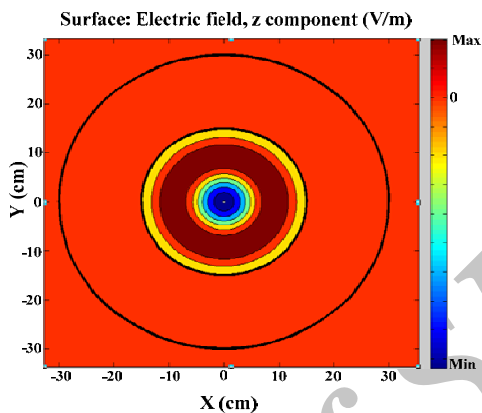
شکل (۳) توزیع میدان الکتریکی ناشی منبع خطی الکتریکی در بیرون از نامریی‌ساز و براساس عبارات تحلیلی میدان‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد میدان الکتریکی کل در بیرون از نامریی‌ساز نسبت به میدان الکتریکی تابشی بدون تغییر باقی مانده است که این خود بدان معنی است که میدان پراکندگی نزدیک به صفر است. شکل (۴) نیز نتایج شبیه‌سازی تمام موج بر اساس بسته نرم‌افزاری کامسول برای حالت منبع خطی الکتریکی در بیرون از نامریی‌ساز را نشان می‌دهد، که از مقایسه شکل‌های (۳) و (۴) نتایج فرمول‌بندی تحلیلی به خوبی تأیید می‌گردد.



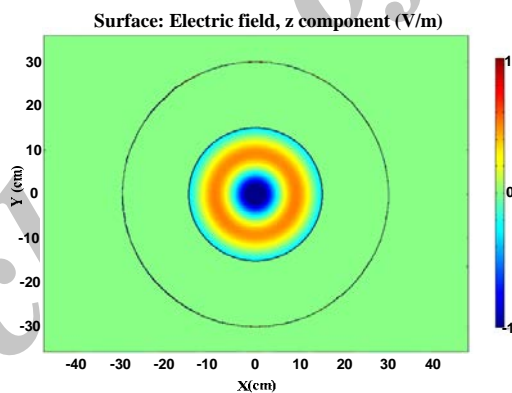
شکل ۳. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در بیرون از نامریی‌ساز ایده‌آل در فرکانس ۲ GHz و بر اساس فرمول‌بندی تحلیلی و با استفاده نرم افزار MATLAB



شکل ۴. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در بیرون از نامریی‌ساز ایده‌آل در فرکانس ۲ GHz و بر اساس بسته نرم‌افزاری کامسول



شکل ۵. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در درون نامرئی‌ساز ایده‌آل در فرکانس ۲ GHz و بر اساس فرمول‌بندی تحلیلی و با استفاده نرم‌افزار MATLAB



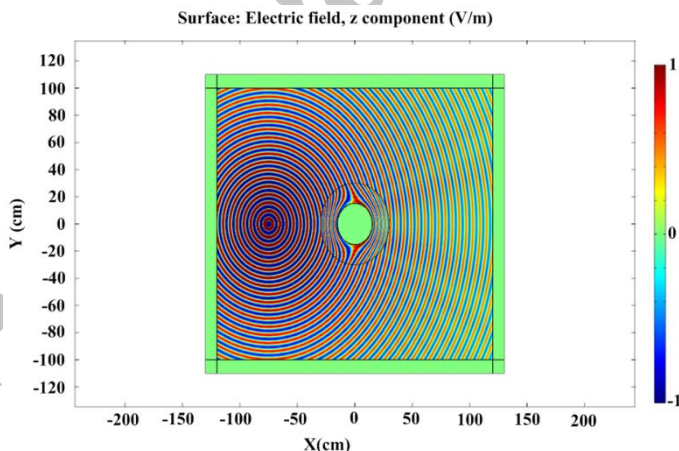
شکل ۶. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در درون نامرئی‌ساز ایده‌آل در فرکانس ۲ GHz و بر اساس بسته نرم‌افزاری کامسول

شکل (۵) توزیع میدان الکتریکی در حالت منبع خطی الکتریکی در درون نامرئی‌ساز و براساس فرمول‌بندی تحلیلی را نشان می‌دهد. شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی تمام موج براساس بسته نرم‌افزاری

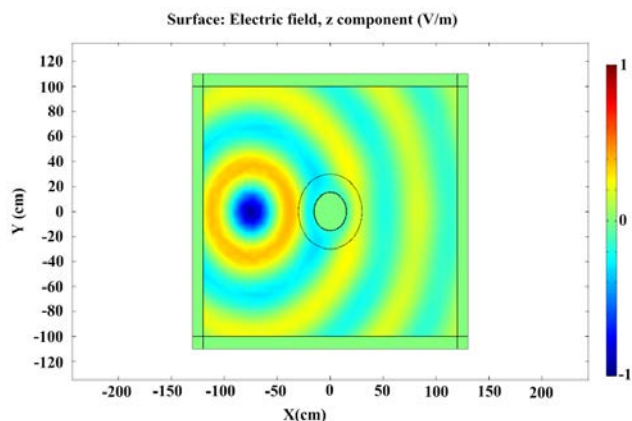
کامسول برای حالت منبع خطی الکتریکی در درون نامریی‌ساز را نشان می‌دهد از مقایسه شکل‌های (۵) و (۶) نتایج عبارتهای تحلیلی در این حالت نیز به خوبی تأیید می‌گردد و از هر دو شکل مذکور می‌توان دید که امواج تابشی ناشی از منبع به هیچ وجه از ناحیه درونی به بیرون نشت نمی‌کنند، بنابراین در این حالت نامریی‌ساز ایده‌آل نمایانگر یک شیلد کامل است.

پس با توجه به شکل‌های (۳) تا (۶)، می‌توان گفت که شیلد کامل حاصل از روش نامریی‌ساز الکترومغناطیسی، ضمن این که برای مدارات الکترونیکی و مخابراتی درونش محافظ و شیلد کاملی است بطور همزمان در اثر تابش امواج الکترومغناطیسی از بیرون نیز پراکندگی امواج ایجاد نمی‌کند و در نتیجه بر خلاف شیلدهای PEC متداول سطح مقطع راداری خیلی ناچیزی از خود نشان خواهد داد.

برای بررسی و مقایسه عملکرد نامریی‌ساز در فرکانسهای مختلف، برای همان پیکربندی شکل (۲) و با همان ابعاد، شبیه‌سازی تمام موج در فرکانس‌های 5GHz و 0.5GHz با استفاده از بسته نرم‌افزاری COMSOL Multiphysics انجام شده است که نتایج آن در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در بیرون از نامریی‌ساز ایده‌آل در فرکانس 5GHz و بر اساس بسته نرم‌افزاری کامسول



شکل ۸. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در بیرون از نامرئی‌ساز ایده آل در فرکانس ۰/۵ GHz و بر اساس بسته نرم‌افزاری کامسول

از مقایسه شکل‌های (۴) و (۷) و (۸) که به ترتیب نتایج شبیه‌سازی تمام موج مسئله در فرکانسهای ۲GHz و ۵GHz و ۰/۵GHz نشان می‌دهند، می‌توان ملاحظه کرد که در فرکانس ۵GHz است رفتار و عملکرد نامرئی‌ساز به خوبی مشهود است و در فرکانس ۰/۵GHz نیز از شکل (۸) می‌توان دید علیرغم طول موج در حدود ابعاد نامرئی‌ساز هنوز تا حدود زیادی رفتار نامرئی‌ساز مشاهده می‌گردد.

مطابق رابطه (۱) نامرئی‌ساز ایده آل در مرز درونی نامرئی‌ساز رفتار تکینگی دارد، یعنی در مرز مذکور مقادیر پارامترهای ϵ_ϕ و μ_ϕ مربوط به تانسورهای ضرایب گذردهی و نفوذپذیری بی‌نهایت بزرگ می‌گردند و مقادیر پارامترهای ϵ_ρ و μ_ρ بی‌نهایت کوچک می‌شوند و به سمت صفر میل می‌کنند، پس تحقق عملی نامرئی‌ساز ایده آل حتی با استفاده از پیشرفتهای شگرف اخیر در حوزه فرامواد نیز ناممکن است. بنابراین برای تحقق و پیاده‌سازی عملی نامرئی‌ساز و بهره‌برداری از قابلیت‌های آن، ضروری است که ضرایب گذردهی و نفوذپذیری نامرئی‌ساز ایده آل به روشی ساده سازی شوند. همانطور که اشاره شد اولین بار در مرجع [۲] یک مجموعه از پارامترهای ساده شده ماده پیشنهاد شد و با استفاده از حلقه‌های شکافته شده تشدیدی ساخته و نتایج آزمایش و اندازه

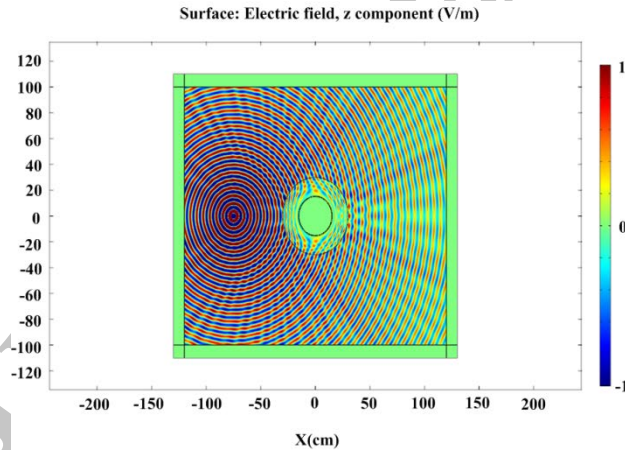
گیری آن در فرکانسهای میکروویو گزارش شده است که ما آن را نامرئی ساز ساده شده می نامیم و پارامترهای آن به صورت زیر است:

$$\varepsilon_\rho = \mu_\rho = \left(\frac{\rho - a}{\rho}\right)^2 \quad (۲۴ - \text{الف})$$

$$\varepsilon_\varphi = \mu_\varphi = 1 \quad (۲۴ - \text{ب})$$

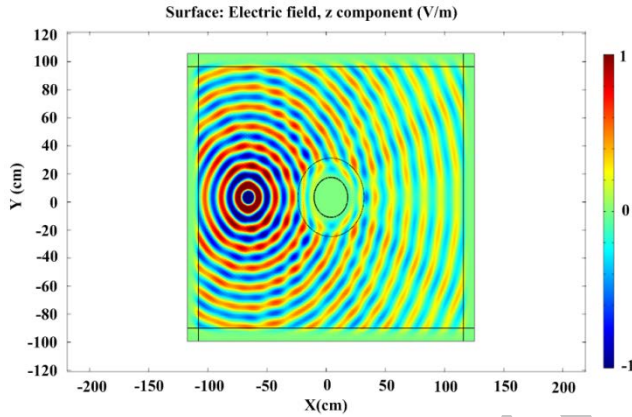
$$\varepsilon_z = \mu_z = \left(\frac{b}{b - a}\right)^2 \quad (۲۴ - \text{ج})$$

به منظور بررسی تحقق عملی نامرئی ساز و نیز مقایسه عملکرد نامرئی ساز ساده شده با نامرئی ساز ایده آل، برای همان پیکربندی شکل (۲) و با همان ابعاد، شبیه سازی تمام موج در فرکانسهای ۵GHz، ۲GHz و ۰/۵GHz با استفاده از بسته نرم افزاری کامسول انجام شده است که نتایج آن در شکل های (۹) تا (۱۱) نشان داده شده است.

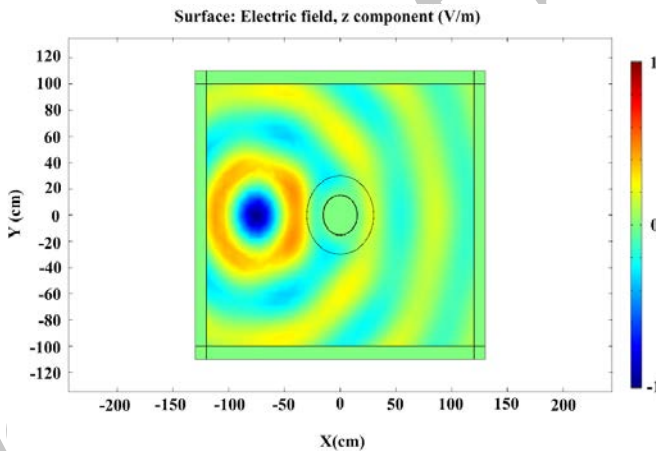


شکل ۹. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در بیرون از نامرئی ساز ساده شده در فرکانس ۵GHz و بر

اساس بسته نرم افزاری کامسول



شکل ۱۰. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در بیرون از نامریی‌ساز ساده شده در فرکانس ۲GHz و بر اساس بسته نرم‌افزاری کامسول



شکل ۱۱. توزیع میدان الکتریکی برای حالت منبع تابش در بیرون از نامریی‌ساز ساده شده در فرکانس ۰/۵GHz و بر اساس بسته نرم‌افزاری کامسول

از مقایسه شکل‌های (۹) و (۱۰) و (۱۱) به ترتیب با شکل‌های (۷) و (۴) و (۸) مشاهده می‌گردد که این شکل‌ها دو به دو تا حدود زیادی مشابه هستند و فقط در جهت پراکندگی جلو ساختار در حالت استفاده از نامریی‌ساز ساده شده مقداری پراکندگی بیشتر است. بنابراین هر چند عملکرد

نامری‌ساز ساده شده با قابلیت عملی پیاده سازی [۲] نسبت به نامری‌ساز ایده‌آل دارای افت است، با این حال عملکرد بسیار خوبی از نظر پنهان‌سازی و نیز کاهش پراکندگی دارد به طوری که در مقایسه با شیلدهای فلزی متداول که در اثر پراکندگی، در جلو آن‌ها سایه ایجاد می‌شود و میزان پراکندگی همراه با بازتابش موج خیلی شدید است، استفاده عملی از نامری‌ساز ساده شده به عنوان یک شیلد الکتریکی با کمترین پراکندگی امکان پذیر و دارای مزیت و عملکرد بسیار بالاتری است.

نتیجه گیری

در این مقاله، مشخصات پراکندگی برای نامری‌ساز استوانه‌ای فرامواد در دو حالت منبع در درون و در بیرون از نامری‌ساز تحقیق و بررسی شده است. حل دقیق و تحلیلی معادله موج برای نواحی مختلف پیکربندی مسئله استخراج شده است و نتایج با شبیه‌ساز تمام موج حاصل بسته نرم‌افزاری کامسول مورد ارزیابی قرار گرفته است. در حالت منبع در درون نامری‌ساز، امواج تابشی ناشی از منبع به هیچ وجه از ناحیه درونی به بیرون نشت نمی‌کند و نیز در حالت منبع تابش موج در بیرون از نامری‌ساز، میدان الکتریکی کل در بیرون از نامری‌ساز نسبت به میدان الکتریکی تابشی بدون تغییر باقی مانده است این بدین معنی است که میدان پراکندگی نزدیک به صفر است. بنابراین نامری‌ساز الکترومغناطیسی، نمایانگر یک شیلد کامل است. این شیلد کامل مزیتی که نسبت به یک شیلد فلزی متداول دارد، علاوه بر محافظت الکتریکی کامل از مدارات مخابراتی و الکترونیکی فرکانس بالای درونش، بطور همزمان در اثر تابش امواج الکترومغناطیسی از بیرون بر آن نیز پراکندگی امواج ایجاد نخواهد کرد و در نتیجه بر خلاف شیلد فلزی سطح مقطع پراکندگی خیلی ناچیزی از خود نشان خواهد داد. عملکرد نامری‌ساز در فرکانسهای مختلف بررسی شده است و چنانچه نامری‌ساز حداقل دارای ابعادی برابر با طول موج و یا بزرگتر از آن باشد به خوبی رفتار پنهان سازی را داراست. از نقطه نظر تحقق عملی، نامری‌ساز ساده شده‌ی قابل پیاده‌سازی، دارای عملکرد قابل قبول است.

تقدیر و تشکر

این تحقیق طبق قرارداد شماره (۵۰۰/۴۲۸۴/ت) از حمایت مالی موسسه تحقیقات ارتباطات و فناوری اطلاعات (ITRC) برخوردار بوده است، بدینوسیله از این موسسه تشکر و قدردانی می‌شود.

- [1] J.B. Pendry, D. Schurig, and D.R. Smith, Controlling electromagnetic fields, *Science*, 2006, vol. 312, pp.1780-1782.
- [2] D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr, and D.R. Smith, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, *Science*, 2006, vol. 314, pp.977-980.
- [3] D. Schurig , J.B. Pendry, and D.R. Smith, Calculation of Material Properties and Ray Tracing in Transformation Media, *Optics Express*, 2006, vol. 14, no. 21, pp.9794-9804.
- [4] A. Alu, and N. Engheta, Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings, *Phys. Rev. E*, 2005, vol. 72, pp.016623_1-9.
- [5] U. Leonhardt, Optical conformal mapping, *Science*, 2006, vol. 312, pp.1777-1780.
- [6] H. Chen, B.-I. Wu, B. Zhang, and J. A. Kong, Electromagnetic wave interactions with a metamaterial cloak, *Phys. Rev. Lett*, 2007, vol. 99, pp.063903_1-4.
- [7] B. Zhang, H. Chen, B.-I. Wu, and J.A. Kong, Extraordinary surface voltage effect in the invisibility cloak with an active device inside, *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, pp.063904_1-6.
- [8] B. Zhang, H. Chen, B.-I. Wu, Y. Luo, L.X. Ran, and J.A. Kong, Response of a cylindrical invisibility cloak to electromagnetic waves, *Phys. Rev. B*, 2007, vol. 76, pp.121101_1-4.
- [9] Z. Ruan, M. Yan, C. W. Neff, and M. Qiu, Ideal cylindrical cloak: Perfect but sensitive to tiny perturbations, *Phys. Rev. Lett.*, 2007, vol. 99, pp.113903_1-10.
- [10] M. YAN, Z. RUAN, and M. QIU, Cylindrical Invisibility Cloak with Simplified Material Parameters is Inherently Visible, *Phys. Rev. Lett.*, 2007, vol. 99, pp.233901_1-10.
- [11] S.A. Cummer, B.I. Popa, D. Schurig, D.R. Smith, and J. Pendry, Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures, *Phys. Rev. E*, 2006, vol. 74, pp.036621_1-5.
- [12] Q. Wu, K. Zhang, F.-Y. Meng, and L.-W. Li, Electromgnetic characteristics of metamaterial cloak covered dielectric cylinder illuminated by electric line source, *IET Microw. Antennas Propag.*, 2010, vol. 4, pp.1680-1688.
- [13] C. Argyropoulos, Y. Zhao, and Y. Hao, A radially-dependent dispersive finite-difference time-domain method for the evaluation of electromagnetic cloaks, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2009, vol. 57, pp.1432-1441.
- [14] S. Arslanagic, O. Breinbjerg, Electric-line-source illumination of a circular cylinder of lossless doublenegative material: An investigation of near field, directivity, and radiation resistance, *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, 2006, vol. 48, pp.38-54.
- [15] S. Shenfeld, Shielding of cylindrical tubes, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, EMC*, 1968, vol. 10, no. 1, pp.29-34.
- [16] J. F. Hoburg, A computational methodology and results for quasistatic multilayered magnetic shielding, *IEEE Trans. Electromagn. Compatibility*, 1996, vol. 38, pp.92-103.

- [17] P.Sergeant, L. Dupré, L. Vandenbossche, and J. Melkebeek, Analytical formulation for magnetic shields taking into account hysteresis effects, *COMPEL*, 2005, vol. 24, pp.1470–1491.
- [18] P.Sergeant, M. Zucca, L. Dupre, and P. E. Roccatto, Magnetic Shielding of a Cylindrical Shield in Nonlinear Hysteretic Material *IEEE Trans. Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 10, pp.3189-3191.
- [19] C.A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, 1989, pp.570-634.
- [20] W.C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, IEEE Press, New York, 1995, pp.161-184.

Archive of SID