

کاهش سطح مقطع راداری از طریق بررسی نامریی ساز

الکترومغناطیسی استوانه‌ای ساده شده

علی قائدی^۱، زهرا اطلس باف^{۲*}، عباس پیرهادی^۳

۱- دانشجوی دکتری و ۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۱۹)

چکیده

در این مقاله، عملکرد و حساسیت نامریی‌ساز الکترومغناطیسی استوانه‌ای با در نظر گرفتن اثر انواع مختلف نامریی‌سازهای ساده شده، مورد بررسی قرار گرفته است. هر چند که از نظر کاهش انعکاس و پراکندگی، عملکرد نامریی‌سازهای ساده شده مانند عملکرد نامریی‌ساز ایده‌آل نیست، ولی ضمن قابلیت تحقق عملی، استتار و کاهش سطح مقطع راداری قابل قبولی را ارائه می‌دهند. برای بررسی عملکرد ساختارهای اشاره شده، معادله موج درون نواحی مختلف استخراج شده و حل دقیق آن به صورت تحلیلی ارائه شده است. نتیجه‌های تحلیلی حاصل با نتیجه‌های شبیه‌سازی تمام موج مبتنی بر روش المان محدود با استفاده از بسته نرم‌افزاری COMSOL Multiphysics مقایسه و تأیید شده است. شبیه‌سازی برای محاسبه سطح مقطع راداری در محدوده فرکانسی ۱۰ MHz تا ۳ GHz انجام شده است. نتیجه‌های شبیه‌سازی، کاهش سطح مقطع راداری بیش از ۱۸ dB برای نامریی‌ساز ساده شده را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: نامریی‌ساز الکترومغناطیسی، انتقال مختصات، پراکندگی، معادله موج، استتار، سطح مقطع راداری.

Simplified Cylindrical Electromagnetic Cloak for Reduction of RCS

A. Ghaeadi, Z. Atlasbaf*, A. Pirhadi

Tarbiat Modares University

(Received: 19/06/2012; Accepted: 09/12/2012)

Abstract

In this paper, the performance and sensitivity of the cylindrical electromagnetic cloak considering the effect of different simplified cloaks are investigated. The performance of simplified cloak is less than ideal cloak; however, it can be realized in practice with acceptable level of RCS reduction. The exact wave solution for different regions of cylindrical cloak is derived and validated with full-wave simulations results based on COMSOL Multiphysics. Numerical experiments of RCS are performed for frequency band from 10MHz to 3GHz. The results of simulation show more than 18dB RCS reduction for simplified cloak.

Keywords: Electromagnetic Cloak, Coordinate Transformation, Scattering, Wave Equation, Invisibility, RCS.

* Corresponding author E-mail: atlasbaf@modares.ac.ir

۱. مقدمه

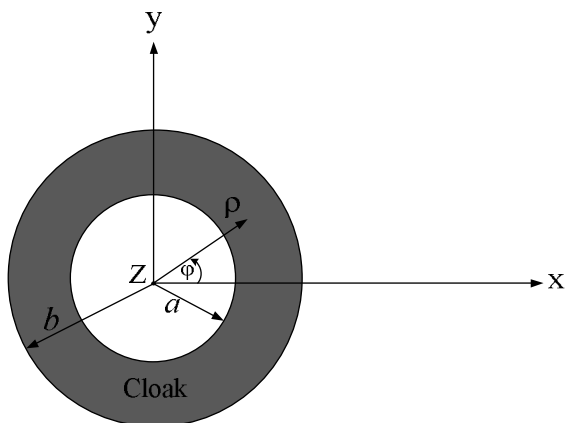
شده راجع به نامریی‌ساز الکترومغناطیسی، برای موج تابشی استوانه‌ای در میدان‌های نزدیک و میدان‌های دور از نظر کاهش سطح مقطع راداری کمترین بررسی تحلیلی یا مدل‌سازی عددی منتشر شده است. در این مقاله، معادله موج در محیط نامریی‌ساز الکترومغناطیسی استوانه‌ای استخراج و حل شده است و فرمول‌بندی تحلیلی میدان‌های الکترومغناطیسی نزدیک و دور مسئله ارائه شده است و مشخصات پراکندگی نامریی‌ساز الکترومغناطیسی استوانه‌ای با تمام جزئیات بررسی شده است. میدان‌های الکترومغناطیسی حاصل از فرمول‌بندی تحلیلی نواحی مختلف با استفاده از نرم‌افزار MATLAB محاسبه شده و با نتیجه‌های شبیه‌سازی تمام موج بسته نرم‌افزاری COMSOL Multiphysics مقایسه و تصدیق شده است. عملکرد و حساسیت نامریی‌ساز استوانه‌ای در حضور برخی از ملاحظات عملی، مانند اثر نامریی‌ساز ساده شده، بررسی شده است و پارامترهای نامریی‌سازهای ساده شده مختلف بررسی و با پارامترهای نامریی‌ساز ایده‌آل مقایسه شده است. میزان کاهش سطح مقطع راداری، با به‌کارگیری هر کدام از نامریی‌سازهای ساده شده بررسی و با هم مقایسه شده است.

این مقاله در شش بخش سازمان‌دهی شده است. در بخش دوم، پاسخ دقیق معادله موج برای محیط نامریی‌ساز الکترومغناطیسی، استخراج شده است. در بخش سوم فرمول‌بندی میدان‌های نزدیک و دور الکترومغناطیسی برای مسئله بحث شده است. در بخش چهارم نتیجه‌های عددی و شبیه‌سازی ارائه شده است. بخش پنجم نتیجه‌گیری را دربر می‌گیرد و در نهایت مراجع آمده است.

۲. معادله موج در محیط نامریی‌ساز الکترومغناطیسی استوانه‌ای

شکل (۱) مدل نامریی‌ساز استوانه‌ای ایده‌آل را نشان می‌دهد. این نوع نامریی‌ساز با استفاده از یک انتقال مختصات به‌صورت زیر ایجاد می‌شود [۲].

$$\rho \rightarrow \frac{b-a}{b}\rho + a, \quad \phi \rightarrow \phi, \quad z \rightarrow z \quad (1)$$



شکل ۱. مدل نامریی‌ساز استوانه‌ای ایده‌آل

دستیابی به نامریی‌سازی و استتار برای دهه‌های مختلف موضوع مورد علاقه فیزیکدانان و مهندسان بوده است. استفاده از مواد جاذب و پوشش‌های بدون انعکاس به‌منظور کاهش پراکندگی یا انعکاس از اجسام به‌عنوان یک روش مرسوم در خیلی از کاربردها مدنظر بوده است. چگونگی استفاده از پوشش‌های پسیو کم تلف (یا حتی بدون تلف) به‌منظور کاهش شدید پراکندگی از اجسام، همواره بحث اصلی به‌شمار رفته است. توجه بسیار زیاد به‌موضوع استتار و نامریی‌سازی اجسام و نیز کاهش سطح مقطع راداری به پیشرفت‌ها و تحقیقات جدیدی در زمینه ساختارهای نامریی‌ساز الکترومغناطیسی^۱ منجر شده است [۵-۱]. پندری و همکارانش برای اولین بار یک نامریی‌ساز الکترومغناطیسی براساس انتقال مختصات^۲ پیشنهاد دادند [۱]. در این روش، میدان‌های الکترومغناطیسی را می‌توان طوری کنترل کرد که از اطراف جسم نامریی‌شونده منتشر شوند و با جسم مذکور هیچ نوع برخوردی نداشته باشند. در مرجع [۲] یک نمونه نامریی‌ساز با پارامترهای ساده شده با استفاده از حلقه‌های شکافته شده تشدیدی^۳ ساخته شده و نتیجه‌های آزمایش و اندازه‌گیری آن در فرکانس‌های میکروویو گزارش شده است. همچنین برای طراحی نامریی‌ساز دوبعدی یک روش نگاشت همدیس نوری به‌صورت دنبال کردن اشعه مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. با توجه به تغییرناپذیر بودن معادلات ماکسول در اثر انتقال مختصات، مشخصات پارامترهای اساسی ماده از روی پارامترهای انتقال یافته، قابل استخراج است [۶]. رویکردهای دیگری نیز برای کاهش آشکارسازی وجود دارد، به‌عنوان مثال با طراحی یک پوشش پلاسمائی برای جسم، با حذف دوقطبی پراکندگی، سطح مقطع پراکندگی جسم نسبت به حالت بدون پوشش به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۷-۹].

ساختارهای نامریی‌ساز الکترومغناطیسی مبتنی بر روش Pendry هم با روش‌های تحلیلی و هم با روش‌های عددی مدل‌سازی و بررسی شده‌اند [۱۰-۱۸]. در مرجع [۱۰] یک مدل پراکندگی برای تحلیل نامریی‌سازهای کروی ارائه شده است، همچنین نشان داده شده است که سطوح ولتاژ الکتریکی و مغناطیسی غیر عادی بر روی سطح درونی نامریی‌ساز ایده‌آل القاء می‌شود [۱۲ و ۱۱]. حساسیت ساختارهای نامریی‌ساز ایده‌آل و غیر ایده‌آل در مراجع [۱۴ و ۱۳] بررسی شده‌اند. همچنین شبیه‌سازی‌های عددی متعددی برای مطالعه نامریی‌سازی پندری صورت پذیرفته است که در آنها ابزارهایی هم‌چون روش تفاضل محدود در حوزه زمان^۴ [۱۵] و بسته نرم‌افزاری تجاری COMSOL Multiphysics مبتنی بر روش المان محدود^۵، به-کار گرفته شده است [۱۶-۱۸].

در تحقیقات و بررسی‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی منتشر

¹ Electromagnetic Cloak

² Coordinate Transformation

³ Split Ring Resonators (SRRs)

⁴ Finite-Difference Time-Domain (FDTD)

⁵ Finite-Element Method (FEM)

این انتقال ناحیه استوانه‌ای $0 \leq \rho \leq b$ را به ناحیه حلقوی $a \leq \rho \leq b$ فشرده می‌سازد، که شعاع داخلی و شعاع خارجی نامریی‌ساز استوانه‌ای است.

$$E_z^c(\rho) = e^{j\beta_z z}$$

دیفرانسیل بسل مرتبه n زیر به دست می‌آید [۱۹]:

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

با توجه به تغییرناپذیر بودن معادلات ماکسول در اثر انتقال مختصات و تفسیر انتقال به تبدیل ضریب‌های گذردهی و نفوذپذیری ماده، به‌طور معادل یک مجموعه کامل از پارامترهای ماده برای نامریی‌ساز ایده‌آل به‌صورت معادله‌های (۲) به دست می‌آید [۲].

$$\varepsilon_\rho(\rho) = \mu_\rho(\rho) = \frac{\rho-a}{\rho} \quad (۲-الف)$$

$$\varepsilon_\phi(\rho) = \mu_\phi(\rho) = \frac{\rho}{\rho-a} \quad (۲-ب)$$

$$\varepsilon_z(\rho) = \mu_z(\rho) = \left(\frac{b}{b-a} \right)^2 \frac{\rho-a}{\rho} \quad (۲-ج)$$

$$E_z^c(\rho, \phi, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \alpha_n^{C1} J_n[\beta_\rho(\rho-a)] + \alpha_n^{C2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(\rho-a)] \right\} e^{jn(\phi-\phi') + j\beta_z z} \quad (۸)$$

پارامترهای فوق عناصر قطر اصلی تانسورهای ضریب‌های گذردهی و نفوذپذیری نامریی‌ساز ایده‌آل را نشان می‌دهند و سایر عناصر تانسورهای مذکور صفر هستند.

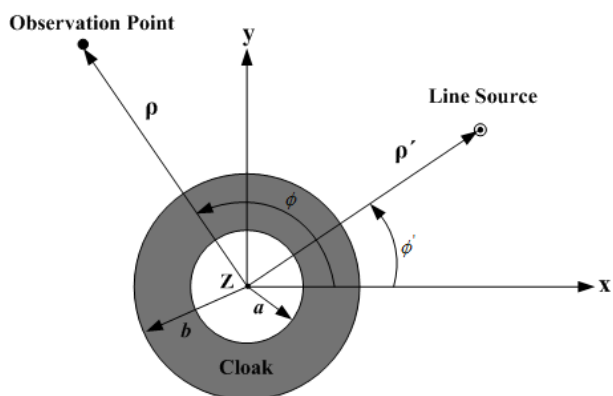
به‌منظور استخراج معادله موج در نامریی‌ساز استوانه‌ای، معادله‌های ماکسول برای محیط بدون منبع و با ضریب‌های گذردهی و نفوذپذیری تانسوری، استفاده می‌شود [۲۰].

در اینجا فرمول‌بندی میدان‌های الکترومغناطیسی برای حالت‌های میدان نزدیک و میدان دور استخراج خواهد شد.

۳. فرمول‌بندی میدان‌های الکترومغناطیسی

۳-۱. میدان‌های نزدیک الکترومغناطیسی

مطابق شکل (۲) یک استوانه هادی به شعاع a درون ناحیه نامریی‌شونده^۱ در نظر می‌گیریم که یک لایه نامریی‌ساز استوانه‌ای با شعاع داخلی a و شعاع خارجی b و با محور استوانه در راستای محور z ، آن را دربر گرفته است و یک منبع خطی الکتریکی به‌طول بی‌نهایت در بیرون از نامریی‌ساز و در فاصله ρ' از مبدأ و به موازات محور z قرار گرفته است، کل ساختار را روشن می‌کند.



شکل ۲. پیکربندی نامریی‌ساز استوانه‌ای با منبع خطی الکتریکی در بیرون از ناحیه نامریی‌ساز

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega \bar{\mu} \bar{H} \quad (۳-الف)$$

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \bar{\varepsilon} \bar{E} \quad (۳-ب)$$

با ترکیب معادله‌های کرل فوق و با در نظر گرفتن تانسورهای $\bar{\mu}$ و $\bar{\varepsilon}$ معادله موج درون نامریی‌ساز را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\nabla \times \left[\left(\bar{\mu} \right)^{-1} \left(\nabla \times \bar{E}^C \right) \right] - \omega^2 \left(\bar{\varepsilon} \right) \bar{E}^C = 0 \quad (۴)$$

که \bar{E}^C نمایانگر میدان الکتریکی درون نامریی‌ساز است و برای مؤلفه z آن، رابطه (۴) به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

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

که β_0 عدد موج در فضای آزاد است. همان‌طور که از رابطه (۵) می‌توان دید فقط پارامترهای μ_ϕ ، μ_ρ ، ε_z با معادله موج برای مؤلفه z میدان الکتریکی درون نامریی‌ساز E_z^c مرتبط است. با جایگذاری پارامترهای نامریی‌ساز ایده‌آل، معادله موج مذکور به‌صورت رابطه (۶) 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 و با فرض $E_z^c(\rho, \phi, z) = E_z^c(\rho) \cdot E_z^c(\phi) \cdot E_z^c(z)$ و نیز $E_z^c(\phi) = e^{jn\phi}$

^۱ Cloaked Region

با استفاده از رابطه (۱۳) مؤلفه ϕ میدان مغناطیسی در ناحیه بیرون از نامریی ساز و درون ناحیه نامریی ساز به ترتیب به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) به دست می آید:

$$H_{\phi}^{out}(\rho, \phi) = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_z^{out}}{\partial \rho} = j \frac{\beta_0 I_e}{4} \times \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [J'_n(\beta_0 \rho) H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') + \alpha_n^s H_n^{(2)'}(\beta_0 \rho)] e^{jn(\phi-\phi')} & b \leq \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} [J_n(\beta_0 \rho') + \alpha_n^s] H_n^{(2)'}(\beta_0 \rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (14)$$

$$H_{\phi}^c(\rho, \phi) = \frac{1}{j\omega\mu_0\mu_\phi} \frac{\partial E_z^c}{\partial \rho} = j \frac{\beta_\rho I_e}{4\mu_\phi} \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \alpha_n^{c1} J_n'[\beta_\rho(\rho-a)] + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)'}[\beta_\rho(\rho-a)] \right\} e^{jn(\phi-\phi')} \quad a \leq \rho \leq b \quad (15)$$

ضریب های مجهول α_n^{c1} ، α_n^{c2} و α_n^s با اعمال شرایط مرزی بر روی دو سطح $\rho = a$ و $\rho = b$ تعیین می شوند. برای پرهیز از وقوع تکیه موجود در رابطه (۱-ب) مرز داخلی نامریی ساز را به جای $\rho = a$ در $\rho = a + \delta$ فرض می کنیم و در نهایت این پارامتر δ را در معادله ها به سمت صفر میل می دهیم.

از اعمال شرایط مرزی بر مرز درونی نامریی ساز $\rho = a$ که سطح هادی است، می توان نوشت:

$$E_z^c(a, \phi) = 0 \Rightarrow \alpha_n^{c1} J_n[\beta_\rho(\delta)] + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(\delta)] = 0 \quad (16)$$

از اعمال شرایط مرزی بر مرز بیرونی نامریی ساز $\rho = b$ نیز می توان نوشت:

$$E_z^{out}(b, \phi) = E_z^c(b, \phi) \Rightarrow J_n(\beta_0 b) H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') + \alpha_n^s H_n^{(2)}(\beta_0 b) = \alpha_n^{c1} J_n[\beta_\rho(b-a)] + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(b-a)] \quad (17)$$

$$H_{\phi}^{out}(b, \phi) = H_{\phi}^c(b, \phi) \Rightarrow \beta_0 [J_n'(\beta_0 b) H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') + \alpha_n^s H_n^{(2)'}(\beta_0 b)] = \frac{\beta_\rho}{\mu_\phi(b)} \left\{ \alpha_n^{c1} J_n'[\beta_\rho(b-a)] + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)'}[\beta_\rho(b-a)] \right\} \quad (18)$$

در رابطه (۱۶) وقتی $\delta \rightarrow 0$ ، آرگومان تابع هنکل به سمت صفر میل می کند، بنابراین برای اجتناب از بی نهایت شدن سمت چپ این رابطه، ضریب α_n^{c2} باید صفر شود. با توجه به اینکه در رابطه (۱۸) ضریب $\frac{\beta_\rho}{\mu_\phi(b)}$ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\beta_\rho}{\mu_\phi(b)} = \frac{\beta_0 \frac{b}{b-a}}{\frac{b}{b-a}} = \beta_0 \quad (19)$$

پس α_n^s به صورت رابطه (۲۰) محاسبه می شود.

$$\alpha_n^s = H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') \times \frac{J_n(\beta_0 b) J_n'[\beta_\rho(b-a)] - J_n'(\beta_0 b) J_n[\beta_\rho(b-a)]}{J_n[\beta_\rho(b-a)] H_n^{(2)'}(\beta_0 b) - J_n'[\beta_\rho(b-a)] H_n^{(2)}(\beta_0 b)} \quad (20)$$

ولی با توجه به $\beta_\rho(b-a) = \beta_0 b$ صورت رابطه (۲۰) صفر می شود، پس ضریب α_n^s نیز صفر می شود.

با توجه به اینکه برای میدان های تشعشعی ناشی از منبع خطی الکتریکی به طول بی نهایت در جهت محور z ، فقط مد TM^z وجود دارد [۱۹]، بنابراین فقط با مؤلفه z میدان الکتریکی سر و کار داریم. بدون این که از کلیت مسئله کاسته شود، محیط بیرون نامریی ساز و محل قرار گرفتن منبع را فضای آزاد در نظر می گیریم.

برای میدان نزدیک، میدان الکتریکی تابشی ناشی از منبع خطی الکتریکی را می توان به صورت (۹) نوشت [۱۹]:

$$\vec{E}^T(\rho, \phi) = -\hat{a}_z \frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0} \times \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_0 \rho) H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_0 \rho') H_n^{(2)}(\beta_0 \rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (9)$$

با توجه به این میدان الکتریکی تابشی، میدان های الکتریکی در نواحی مختلف را می توان به دست آورد. میدان الکتریکی پراکندگی در بیرون از ناحیه نامریی ساز عبارت است از [۱۹]:

$$\vec{E}^s(\rho, \phi) = -\hat{a}_z \frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_n^s H_n^{(2)}(\beta_0 \rho) e^{jn(\phi-\phi')} \quad \rho \geq b \quad (10)$$

که در آن، α_n^s ضریب مجهول بسط میدان الکتریکی پراکندگی است. بنابراین میدان الکتریکی کل برای ناحیه بیرون از نامریی ساز ($\rho \geq b$) را می توان به صورت مجموع میدان های الکتریکی تابشی و پراکندگی نوشت [۲۰]:

$$\vec{E}^{out}(\rho, \phi) = \vec{E}^T(\rho, \phi) + \vec{E}^s(\rho, \phi) = -\hat{a}_z \frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0} \times \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [J_n(\beta_0 \rho) H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') + \alpha_n^s H_n^{(2)}(\beta_0 \rho)] e^{jn(\phi-\phi')} & b \leq \rho \leq \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} [J_n(\beta_0 \rho') + \alpha_n^s] H_n^{(2)}(\beta_0 \rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \rho \geq \rho' \end{cases} \quad (11)$$

میدان الکتریکی در محیط نامریی ساز ($a \leq \rho \leq b$) طبق رابطه (۸) است، پس می توان نوشت:

$$\vec{E}^c(\rho, \phi) = -\hat{a}_z \frac{\beta_0^2 I_e}{4\omega\epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \alpha_n^{c1} J_n[\beta_\rho(\rho-a)] + \alpha_n^{c2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(\rho-a)] \right\} e^{jn(\phi-\phi')} \quad a \leq \rho \leq b \quad (12)$$

که در آن α_n^{c1} و α_n^{c2} ضرایب مجهول بسط برای میدان الکتریکی درون ناحیه نامریی ساز هستند.

در نهایت با توجه به هادی بودن استوانه به شعاع a ، در ناحیه $(\rho \leq a)$ میدان های الکترومغناطیسی صفر خواهند بود. از معادله های ماکسول و با استفاده از قانون فاراده میدان های مغناطیسی نیز می توان استخراج کرد:

$$\vec{H}(\rho, \phi) = \frac{1}{-j\omega\mu_0} [\nabla \times \vec{E}(\rho, \phi)] \quad (13)$$

چون برای مد TM^z ، میدان الکتریکی فقط مؤلفه z دارد، پس میدان مغناطیسی مؤلفه های ϕ و ρ دارد. اما برای اعمال شرایط مرزی فقط به مؤلفه های مماسی نیاز است، پس به این منظور با توجه به ساختار استوانه ای مسئله فقط با مؤلفه های z و ϕ میدان های الکترومغناطیسی سر و کار داریم.

میدان الکتریکی در محیط نامریی‌ساز ($a \leq \rho \leq b$) در این حالت نیز طبق رابطه (۸) است، پس می‌توان نوشت:

$$\vec{E}^c(\rho, \phi) = \hat{a}_z \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ A_n^{C1} J_n[\beta_\rho(\rho-a)] + A_n^{C2} H_n^{(1)}[\beta_\rho(\rho-a)] \right\} e^{jn\phi} \quad a \leq \rho \leq b \quad (25)$$

که در آن، A_n^{C1} و A_n^{C2} ضرایب مجهول بسط برای میدان الکتریکی درون ناحیه نامریی‌ساز در این حالت هستند. چون در این حالت نیز میدان الکتریکی فقط مؤلفه z دارد، پس میدان مغناطیسی مؤلفه-های ϕ و ρ دارد. اما برای اعمال شرایط مرزی فقط به مؤلفه‌های مماسی نیاز است، پس به این منظور با توجه به ساختار استوانه‌ای مسئله فقط با مؤلفه‌های z و ϕ میدان‌های الکترومغناطیسی سر و کار داریم.

با استفاده از رابطه (۱۳) مؤلفه ϕ میدان مغناطیسی در ناحیه بیرون از نامریی‌ساز و درون ناحیه نامریی‌ساز به ترتیب به صورت معادله‌های (۲۶) و (۲۷) به دست می‌آیند:

$$H_\phi^{out}(\rho, \phi) = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_z^{out}}{\partial \rho} \quad (26)$$

$$= \frac{\beta_0}{j\omega\mu_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [j^{-n} J_n'(\beta_0 \rho) + A_n^S H_n^{(2)'}(\beta_0 \rho)] e^{jn\phi} \quad \rho \geq b$$

$$H_\phi^C(\rho, \phi) = \frac{1}{j\omega\mu_0\mu_\phi} \frac{\partial E_z^C}{\partial \rho} \quad (27)$$

$$= \frac{\beta_\rho}{j\omega\mu_0\mu_\phi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ A_n^{C1} J_n'[\beta_\rho(\rho-a)] + A_n^{C2} H_n^{(1)'}[\beta_\rho(\rho-a)] \right\} e^{jn\phi} \quad a \leq \rho \leq b$$

ضریب‌های مجهول A_n^S ، A_n^{C1} و A_n^{C2} با اعمال شرایط مرزی بر روی مرزهای استوانه‌ای $\rho = a$ و $\rho = b$ تعیین می‌شوند. به طریقی مشابه حالت میدان‌های نزدیک، برای حالت میدان دور نیز ضریب‌های مجهول مذکور عبارت است از:

$$A_n^{C2} = 0, \quad A_n^S = 0, \quad A_n^{C1} = j^{-n} \quad (28)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حالت میدان‌های دور نیز، در بیرون نامریی‌ساز هیچ میدان پراکندگی وجود ندارد و امواج از درون ناحیه نامریی‌ساز بدون حس کردن حضور استوانه هادی عبور می‌کنند.

۴. نتایج عددی و شبیه‌سازی

در این بخش برای ساختار نامریی‌ساز استوانه‌ای شکل‌های (۲) و (۳) میدان‌های نزدیک و دور براساس فرمول‌بندی تحلیلی بخش قبل محاسبه و صحت آن، با نتیجه‌های شبیه‌سازی تمام موج حاصل از بسته نرم‌افزاری COMSOL Multiphysics (که براساس المان محدود است) بررسی می‌شود. علاوه بر آن در حالت میدان دور بر روی میزان کاهش سطح مقطع راداری در اثر استفاده از لایه نامریی‌ساز الکترومغناطیسی استوانه‌ای تحقیق شده است و نیز از نظر تحقق عملی، با ساده‌سازی پارامترها، رفتار انواع نامریی‌سازهای ساده شده

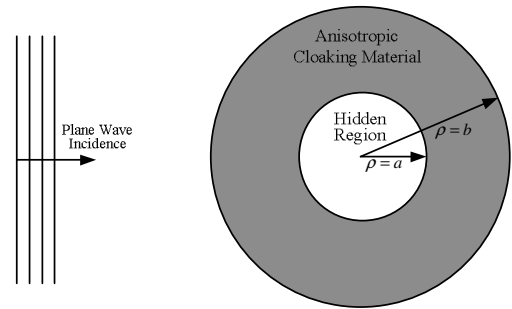
بنابراین با استفاده از (۱۷) ضریب α_n^{C1} نیز طبق رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\alpha_n^{C1} = H_n^{(2)}(\beta_0 \rho') \quad (21)$$

از صفر بودن ضریب پراکندگی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، α_n^S ، به‌طور کامل واضح است که در حالت نامریی‌ساز ایده‌آل، هیچ نوع میدان پراکندگی در بیرون از نامریی‌ساز وجود ندارد و امواج در درون نامریی‌ساز نیز مانند محیط فضای آزاد بیرون از نامریی‌ساز و با ثابت انتشار مربوطه منتشر شده و حضور استوانه هادی درونی نیز حس نمی‌شود.

۲-۳. میدان‌های دور الکترومغناطیسی

برای حالت میدان دور، مطابق شکل (۳) ساختار شامل نامریی‌ساز استوانه‌ای به‌همراه استوانه هادی به شعاع $\rho = a$ درون ناحیه نامریی‌شونده، به‌وسیله یک موج مسطح روشن می‌شود.



شکل ۳. پیکربندی نامریی‌ساز استوانه‌ای روشن شده با موج مسطح

با فرض مد TM^z ، میدان الکتریکی تابشی یک موج مسطح را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۹]:

$$\vec{E}^i(\rho, \phi) = \hat{a}_z \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} J_n(\beta_0 \rho) e^{jn\phi} \quad (22)$$

با توجه به میدان دور تابشی (۲۲)، میدان‌های الکتریکی در نواحی مختلف را می‌توان به دست آورد. میدان پراکندگی در بیرون از ناحیه نامریی‌ساز عبارت است از [۱۹]:

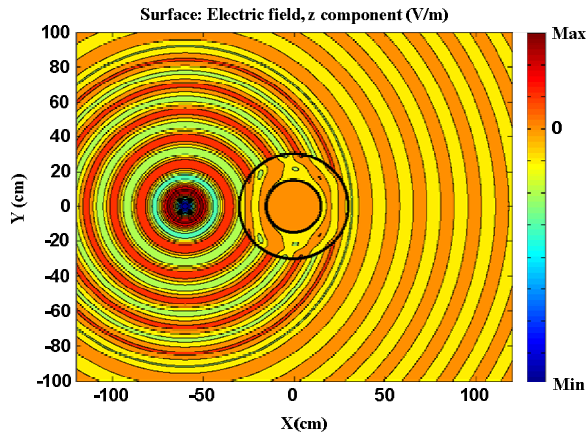
$$\vec{E}^S(\rho, \phi) = \hat{a}_z \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^S H_n^{(2)}(\beta_0 \rho) e^{jn\phi} \quad \rho \geq b \quad (23)$$

که در آن، A_n^S ضریب مجهول بسط میدان الکتریکی پراکندگی در حالت میدان دور است.

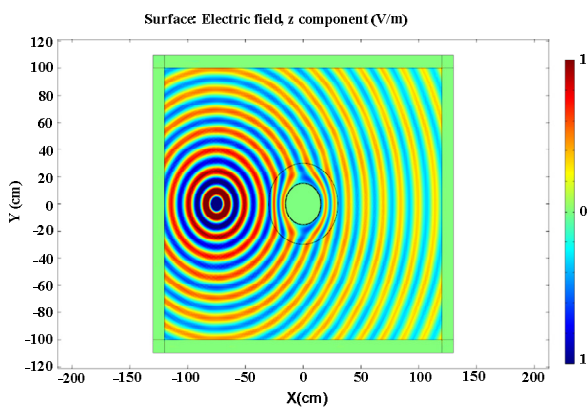
بنابراین در این حالت میدان کل برای ناحیه بیرون از نامریی‌ساز ($\rho \geq b$) را می‌توان به صورت مجموع میدان‌های الکتریکی تابشی و پراکندگی نوشت [۲۰]:

$$\vec{E}^{out}(\rho, \phi) = \vec{E}^i(\rho, \phi) + \vec{E}^S(\rho, \phi) \quad (24)$$

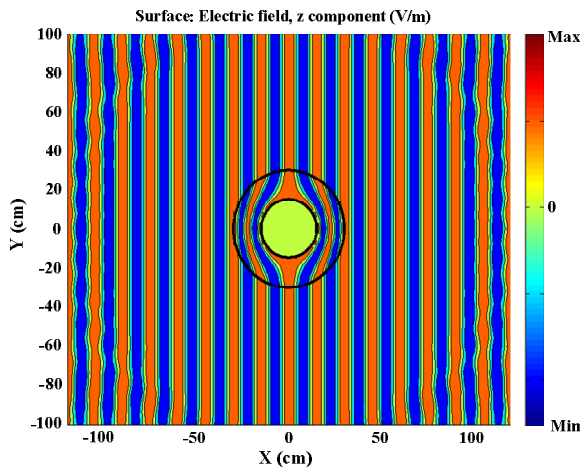
$$= \hat{a}_z \sum_{n=-\infty}^{\infty} [j^{-n} J_n(\beta_0 \rho) + A_n^S H_n^{(2)}(\beta_0 \rho)] e^{jn\phi}$$



شکل ۴. توزیع میدان الکتریکی برای حالت میدان نزدیک و براساس فرمول بندی تحلیلی و با استفاده نرم افزار MATLAB



شکل ۵. شبیه سازی تمام موج نامریی ساز ایده آل برای حالت میدان نزدیک و براساس بسته نرم افزاری COMSOL Multiphysics



شکل ۶. توزیع میدان الکتریکی برای حالت میدان دور و براساس فرمول بندی تحلیلی و با استفاده نرم افزار MATLAB

شکل (۷) نیز نتیجه های شبیه سازی تمام موج مسئله میدان دور براساس بسته نرم افزاری COMSOL Multiphysics نشان می دهد. با مقایسه شکل های (۶) و (۷) درستی نتیجه های فرمول بندی تحلیلی به وسیله نتیجه های شبیه سازی تمام موج تأیید می شود. از شکل های (۶) و (۷) نیز عملکرد صحیح و مورد انتظار نامریی ساز ایده آل، قابل مشاهده است، به طوری که موج مسطح الکترومغناطیسی در اطراف

استوانه ای جهت کاهش سطح مقطع راداری تک هنگامی^۱ و دو هنگامی^۲ نیز مطالعه شده است.

۴-۱. شبیه سازی میدان های نزدیک و دور برای ساختارهای شامل نامریی ساز ایده آل استوانه ای

در شبیه سازی ها شعاع درونی استوانه نامریی ساز را برابر با یک طول موج ($a = \lambda_0$) و شعاع بیرونی آن دو برابر طول موج ($b = 2\lambda_0$) در نظر گرفته شده است، بنابراین ضخامت لایه نامریی ساز استوانه ای برابر با یک طول موج است. در حالت میدان نزدیک، منبع خطی در فاصله دو برابر طول موج از مرکز بیرونی لایه نامریی ساز قرار گرفته است و فرکانس کار برابر با ۲ GHz فرض شده است. برای اطمینان از همگرایی محاسبه مجموع جملات سری در فرمول بندی تحلیلی، ۴۵ جمله اول سری در محاسبات در نظر گرفته شده است [۲۱]. در شبیه سازی با نرم افزار COMSOL Multiphysics، با مش بندی ریزتر برای لایه محدود استوانه ای با شعاع داخلی $\rho = a$ و شعاع خارجی $\rho = a + \delta$ (که δ برابر با ۵ میلی متر است) تأثیر رفتار ضریب های تانسور گذردهی و نفوذپذیری نامریی ساز ایده آل در مرز $\rho = a$ ، بهتر آشکار می شود، بنابراین برای این ناحیه حداکثر ابعاد المان های مش ۱ میلی متر در نظر گرفته شده است.

برای ساختار شکل (۲) با وجود نامریی ساز ایده آل استوانه ای و نیز یک استوانه هادی به شعاع $\rho = a$ ، بر اساس فرمول بندی تحلیلی موجود در معادله های (۱۲-۹) و نیز با استفاده از نرم افزار MATLAB میدان های الکتریکی نواحی مختلف محاسبه شده است و نتیجه ها در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۵) نیز نتیجه های شبیه سازی تمام موج مسئله میدان نزدیک را براساس بسته نرم افزاری COMSOL Multiphysics نشان می دهد.

با مقایسه شکل های (۴) و (۵) نتیجه های فرمول بندی تحلیلی به وسیله نتیجه های شبیه سازی تمام موج مورد تصدیق قرار می گیرد. از شکل های (۴) و (۵) مشاهده می شود که نامریی ساز، موج الکترومغناطیسی ورودی را به نرمی خم می کند و طوری آن را هدایت می کند که از پیرامون ناحیه نامریی شونده، منتشر شود. بنابراین استوانه هادی درون ناحیه نامریی شونده حس نمی شود و در بیرون از نامریی ساز نیز میدان الکتریکی تابشی بدون تغییر باقی مانده است، به عبارتی دیگر هیچ نوع میدان پراکندگی وجود ندارد. بنابراین سطح مقطع پراکندگی نامریی ساز ایده آل در حد صفر است.

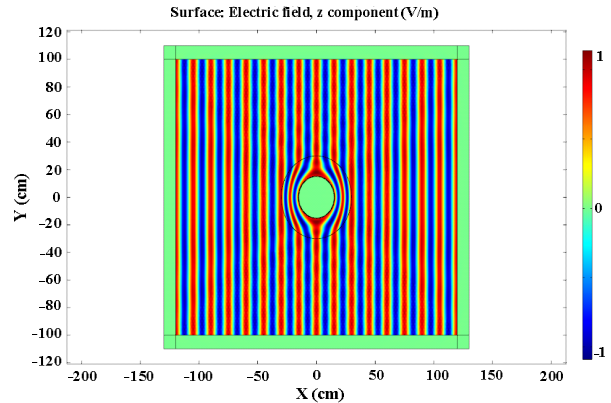
برای ساختار شکل (۳)، با وجود نامریی ساز ایده آل استوانه ای و نیز یک استوانه هادی کامل به شعاع $\rho = a$ ، براساس فرمول بندی تحلیلی موجود در معادله های (۲۵-۲۲) و نیز با استفاده از نرم افزار MATLAB میدان های الکتریکی نواحی مختلف ساختار محاسبه شده است و نتیجه ها در شکل (۶) نشان داده است.

¹ Monostatic Radar Cross Section

² Bistatic Radar Cross Section

گذردهی و نفوذپذیری در مرز $\rho = a$ بی‌نهایت بزرگ می‌شوند و مقادیر پارامترهای ϵ_ρ و μ_ρ بی‌نهایت کوچک می‌شوند و به سمت صفر میل می‌کنند، پس تحقق عملی نامریی‌ساز ایده‌آل حتی با استفاده از پیشرفت‌های شگرف اخیر در حوزه فرامواد^۱ نیز ناممکن است. بنابراین برای تحقق و پیاده‌سازی عملی نامریی‌ساز و بهره‌برداری از قابلیت‌های آن، ضروری است که ضریب‌های گذردهی و نفوذپذیری نامریی‌ساز ایده‌آل به روشی ساده‌سازی شود. اولین بار در مرجع [۲] یک مجموعه از پارامترهای ساده شده ماده پیشنهاد شد و استفاده از حلقه‌های شکافته شده تشدیدی ساخته و نتیجه‌های آزمایش و اندازه‌گیری آن در فرکانس‌های مایکروویو گزارش شده است که ما آن را نامریی‌ساز ساده شده-۱ می‌نامیم. پس از آن در مراجع [۲۲-۲۴]، نامریی‌سازهای استوانه‌ای با پارامترهای ساده شده مختلفی ارائه شد که مشخصات پارامترهای نامریی‌سازهای ساده شده مورد بحث در جدول (۱) آمده است. تابع انتقال مختصات همه نامریی‌سازهای ساده شده در اینجا خطی هستند. برای نامریی‌سازهای ساده شده ۴ و ۵ که در جدول (۱) معرفی شده‌اند، از یک نوع تبدیل مختصات استفاده می‌شود و در انتقال مختصات به‌جای انتقال مرز $\rho = a$ به نقطه مرکز دایره مانند نامریی‌ساز ایده‌آل، مرز $\rho = a$ به مرزهای دایروی $\rho_1 = 0.1m$ برای نامریی‌ساز ساده شده-۴ و $\rho_2 = 0.05m$ برای نامریی‌ساز ساده شده-۵ منتقل می‌شود. تغییرات شعاعی ضریب‌های گذردهی ماده برای نامریی‌ساز ایده‌آل و نیز نامریی‌سازهای ساده شده مختلف در شکل (۸) رسم و مقایسه شده است. از مقایسه تغییرات پارامترهای نامریی‌سازهای مختلف با پارامترهای نامریی‌ساز ساده شده-۱ که پیش از این ساخته و آزمایش شده است [۲] ملاحظه می‌شود که ساخت و پیاده‌سازی اکثر نامریی‌سازهای ساده شده با استفاده از فرامواد امکان‌پذیر است.

ناحیه نامریی‌شونده به نرمی خم می‌شود و از آن ناحیه عبور می‌کند و خارج از ناحیه نامریی‌ساز جبهه موج به‌طور تقریبی بدون تغییر مانده است و همانند جبهه موج تابشی در حالت بدون وجود استوانه هادی است، یعنی میدان پراکندگی وجود ندارد.



شکل ۷. شبیه‌سازی تمام موج نامریی‌ساز ایده‌آل برای حالت میدان دور و براساس بسته نرم‌افزاری COMSOL Multiphysics

۲-۴. شبیه‌سازی سطح مقطع راداری دو هنگامی و تک هنگامی برای ساختارهای شامل نامریی‌سازهای استوانه‌ای مختلف

در این بخش میزان کاهش سطح مقطع راداری با استفاده از نامریی‌ساز الکترومغناطیسی بررسی می‌شود. مطابق رابطه (۲) نامریی‌ساز ایده‌آل در مرز $\rho = a$ رفتار تکینگی دارد، یعنی مقادیر پارامترهای ϵ_ϕ و μ_ϕ در روی قطر اصلی تانسورهای ضریب‌های

جدول ۱. پارامترهای مواد شامل ضرایب گذردهی و نفوذپذیری برای نامریی‌ساز ایده‌آل و نامریی‌سازهای ساده شده

نامریی‌ساز ساده شده-۲ [۲۲]	نامریی‌ساز ساده شده-۱ [۲]	نامریی‌ساز ایده‌آل [۱]
$\epsilon_\rho = \mu_\rho = \left(\frac{\rho-a}{\rho}\right)^2 \frac{b}{b-a}$ $\epsilon_\phi = \mu_\phi = \frac{b}{b-a}$ $\epsilon_z = \mu_z = \frac{b}{b-a}$	$\epsilon_\rho = \mu_\rho = \left(\frac{\rho-a}{\rho}\right)^2$ $\epsilon_\phi = \mu_\phi = 1$ $\epsilon_z = \mu_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2$	$\epsilon_\rho = \mu_\rho = \frac{\rho-a}{\rho}$ $\epsilon_\phi = \mu_\phi = \frac{\rho}{\rho-a}$ $\epsilon_z = \mu_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \frac{\rho-a}{\rho}$
نامریی‌ساز ساده شده-۵ [۲۴]	نامریی‌ساز ساده شده-۴ [۲۴]	نامریی‌ساز ساده شده-۳ [۲۲]
$\epsilon_\rho = \mu_\rho = \frac{\rho(b-\rho_2)-b(a-\rho_2)^2}{(b-\rho_2)\rho}$ $\epsilon_\phi = \mu_\phi = \frac{1}{\epsilon_\rho} = \frac{(b-\rho_2)\rho}{\rho(b-\rho_2)-b(a-\rho_2)^2}$ $\epsilon_z = \mu_z = (\epsilon_\rho) \left(\frac{b-\rho_2}{b-a}\right)^2$	$\epsilon_\rho = \mu_\rho = \frac{\rho(b-\rho_1)-b(a-\rho_1)^2}{(b-\rho_1)\rho}$ $\epsilon_\phi = \mu_\phi = \frac{1}{\epsilon_\rho} = \frac{(b-\rho_1)\rho}{\rho(b-\rho_1)-b(a-\rho_1)^2}$ $\epsilon_z = \mu_z = (\epsilon_\rho) \left(\frac{b-\rho_1}{b-a}\right)^2$	$\epsilon_\rho = \mu_\rho = \frac{(b^2-\rho a)^2(\rho-a)^2}{(b-a)^4 \rho^2}$ $\epsilon_\phi = \mu_\phi = \frac{(a^2+b^2-2\rho a)^2}{(b-a)^4}$ $\epsilon_z = \mu_z = 1$

¹ Metamaterial

COMSOL Multiphysics از دقت بسیار خوب و قابل قبولی برخوردار است.

برای محاسبه سطح مقطع راداری، یک استوانه هادی به طول بی نهایت با شعاع $a = 0.15 \text{ m}$ در نظر می گیریم و لایه نامریی ساز نیز دارای شعاع داخلی $a = 0.15 \text{ m}$ و شعاع خارجی $b = 0.30 \text{ m}$ است. برای محاسبه سطح مقطع راداری دو هنگامی، فرکانس کار مانند بخش قبل برابر با ۲ GHz فرض شده است و سطح مقطع راداری تک هنگامی برای محدوده فرکانسی ۰.۱ GHz تا ۳ GHz محاسبه شده است.

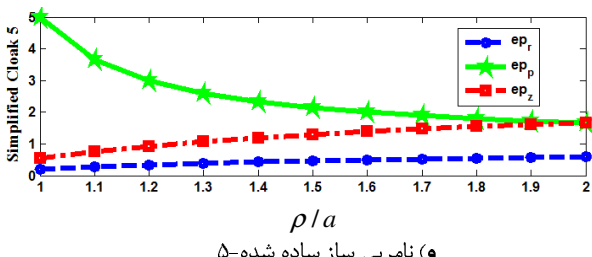
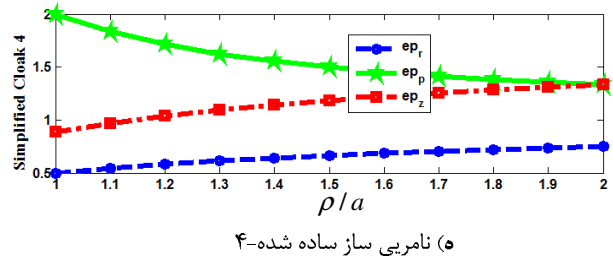
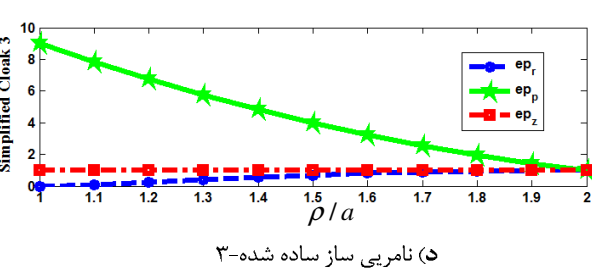
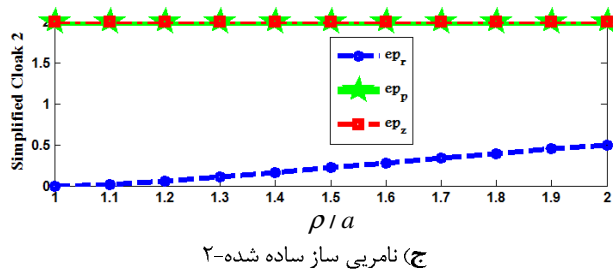
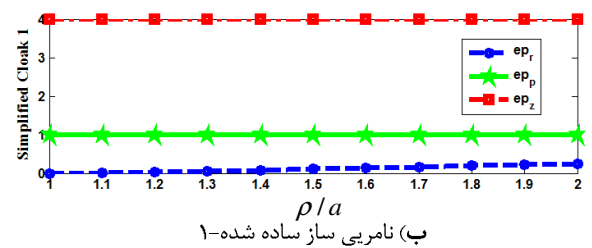
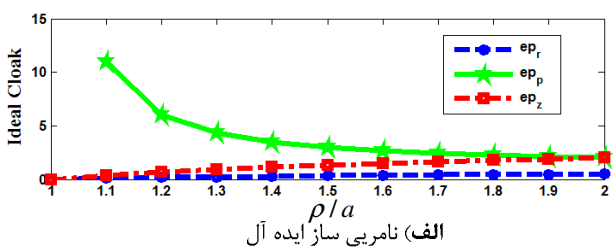
برای مقایسه، سطح مقطع راداری دو هنگامی نرمالیزه شده با طول موج، برای استوانه های هادی تنها و بدون وجود نامریی ساز، به شعاع های $\rho = a$ و $\rho = b$ ، در شکل (۱۰) نشان داده شده است که استوانه هادی به شعاع $\rho = a$ ، از نظر ابعاد فیزیکی مشابه استوانه هادی درون ناحیه نامریی شونده برای ساختار شکل (۳) است و استوانه هادی به شعاع $\rho = b$ ، از نظر اندازه فیزیکی مشابه استوانه های به شعاع بیرونی لایه نامریی ساز استوانه ای برای ساختار شکل (۳) است.

برای شبیه سازی و محاسبه سطح مقطع راداری با حضور نامریی ساز استوانه ای، مسئله را دوبعدی در نظر می گیریم، برای مسئله سه بعدی نیز می توان از توسعه همین روش استفاده کرد. در مسئله دوبعدی سطح مقطع راداری دو هنگامی طبق رابطه زیر تعریف می شود [۱۹]:

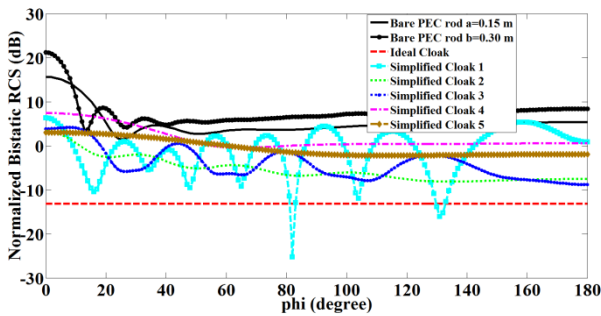
$$\sigma_{2-D} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} \left[2\pi\rho \frac{|E_z^S|^2}{|E_z^i|^2} \right] \quad (29)$$

که E_z^i میدان الکتریکی تابشی و E_z^S میدان الکتریکی پراکنده شده است.

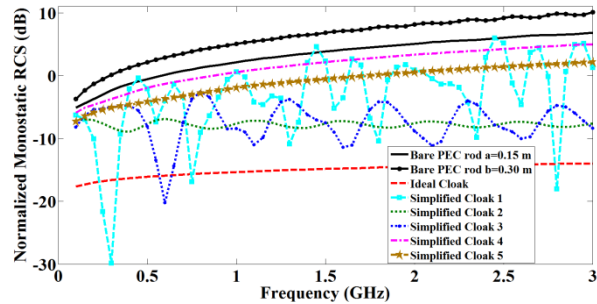
در این بخش با استفاده از بسته نرم افزاری COMSOL Multiphysics عملکرد نامریی سازهای ساده شده جهت کاهش سطح مقطع راداری مطالعه شده است. برای بررسی صحت نتیجه های این نرم افزار، سطح مقطع راداری دو هنگامی یک استوانه هادی به شعاع $a = 0.15 \text{ m}$ از روش فرمول تحلیلی (۲۹) محاسبه شده است و با نتیجه های حاصل از بسته نرم افزاری مذکور در شکل (۹) مقایسه شده است، که تطابق بسیار خوبی بین این دو روش وجود دارد، بنابراین نتیجه های شبیه سازی سطح مقطع راداری با استفاده از بسته نرم افزاری



شکل ۸. تغییرات شعاعی پارامترهای مواد برای نامریی سازهای مختلف: الف) نامریی ساز ایده آل (ب) نامریی ساز ساده شده-۱ (ج) نامریی ساز ساده شده-۲ (د) نامریی ساز ساده شده-۳ (ه) نامریی ساز ساده شده-۴ (و) نامریی ساز ساده شده-۵



شکل ۱۰. سطح مقطع پراکندگی دو هنگامی نرمالیزه شده به طول موج برای استوانه هادی بدون نامریی‌ساز و با وجود انواع نامریی‌سازهای ساده

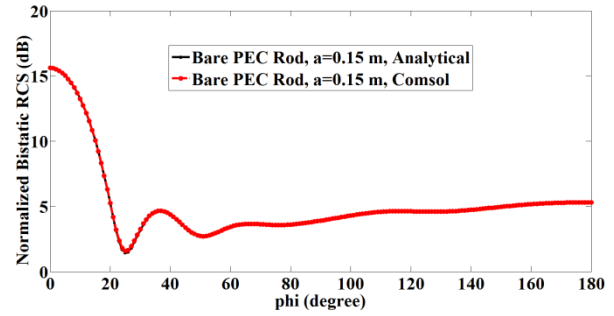


شکل ۱۱. سطح مقطع پراکندگی تک هنگامی نرمالیزه شده به طول موج برای استوانه هادی بدون نامریی‌ساز و با وجود انواع نامریی‌سازهای ساده شده

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که همواره سطح مقطع راداری ساختار شامل نامریی‌ساز ساده شده-۵ (که برای آن $\rho_2 = 1/0.5 m$ است) به مراتب کمتر از ساختار شامل نامریی‌ساز ساده شده-۴ (که برای آن $\rho_1 = 0/1 m$ است) است، بنابراین هرچند با استفاده از انتقال مختصات خطی در حالت نامریی‌سازهای ساده شده ۴ و ۵ و با کوچک‌تر کردن شعاع مرزهای دایروی ρ_1 و ρ_2 می‌توان نامریی‌ساز ساده شده را به نامریی‌ساز ایده‌آل نزدیک کرد و از خواص آن بهره برد، ولی از مقایسه شکل‌های (۸-ه) و (۸-و) ملاحظه می‌شود که هر چه شعاع مرزهای مذکور کوچک‌تر شود، تحقق و پیاده‌سازی پارامترهای ماده مربوطه ناممکن‌تر می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مشخصات پراکندگی نامریی‌ساز الکترومغناطیسی ایده‌آل استوانه‌ای با تمام جزئیات مطالعه شده و معادله دقیق موج برای آن استخراج شده است. براساس روابط تحلیلی و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB میدان‌های الکترومغناطیسی در کلیه نواحی برای حالت‌های میدان نزدیک و میدان دور، محاسبه شده است و نتیجه‌های آن با نتیجه‌های شبیه‌سازی تمام موج مبتنی بر روش المان محدود (FEM) و با استفاده از بسته نرم‌افزاری COMSOL Multiphysics بررسی شده و درستی آن تأیید شده است. برای میدان نزدیک و دور، موج الکترومغناطیسی تابشی به



شکل ۹. مقایسه سطح مقطع پراکندگی دو هنگامی نرمالیزه شده به طول موج برای یک استوانه هادی بدون نامریی‌ساز در دو حالت شبیه‌سازی با نرم‌افزار COMSOL و روش محاسبه تحلیلی

سطح مقطع راداری دو هنگامی نرمالیزه شده به طول موج برای ساختار شکل (۳) با وجود نامریی‌ساز ایده‌آل و نیز انواع نامریی‌سازهای ساده شده موجود در جدول (۱)، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل، کاهش شدید سطح مقطع راداری در حالت وجود نامریی‌ساز ایده‌آل مشاهده می‌شود، به طوری که در زاویه صفر درجه، با حضور نامریی‌ساز ایده‌آل، سطح مقطع راداری نسبت به استوانه‌ای هادی تنها با شعاع $\rho=b$ (برابر شعاع بیرونی نامریی‌ساز) $34/38$ dB و نسبت به استوانه‌ای هادی تنها با شعاع $\rho=a$ بیش از 29 dB کاهش می‌یابد. در حالت‌های وجود انواع نامریی‌سازهای ساده شده هر چند میزان کاهش سطح مقطع راداری به خوبی نامریی‌ساز ایده‌آل نیست ولی کاهش سطح مقطع راداری برای این نوع نامریی‌سازها نیز نسبت به حالت استوانه هادی بدون وجود نامریی‌ساز آشکار است، به طوری که میزان کاهش سطح مقطع راداری دو هنگامی برای نامریی‌سازهای ساده شده-۲ نسبت به استوانه هادی تنها با شعاع $\rho=b$ بیش از 18 dB است. سطح مقطع راداری نامریی‌سازهای ساده شده-۱ و ۳ تغییرات زیادی نسبت به زاویه دارند، ولی بیشترین میزان کاهش سطح مقطع راداری در بین انواع نامریی‌سازهای ساده شده را نامریی‌ساز ساده شده-۲ ایجاد می‌کند، در ضمن دامنه تغییرات شعاعی پارامترهای ماده این نوع نامریی‌ساز نیز زیاد نیست و با بررسی شکل (۸-ب)، می‌توان دریافت که پارامترهای ماده مربوط به این نوع نامریی‌ساز قابل مقایسه با پارامترهای نامریی‌ساز ساده شده-۱ است که پیاده‌سازی و آزمایش شده است [۲]. به نظر می‌رسد با توجه به انطباق امیدانسی بهتر نامریی‌ساز ساده شده-۲ با فضای آزاد در بیرون از نامریی‌ساز، کاهش پراکندگی و نیز سطح مقطع راداری را به همراه دارد.

شکل (۱۱) سطح مقطع راداری تک هنگامی نرمالیزه شده به طول موج را برحسب فرکانس نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش فرکانس، سطح مقطع راداری نیز زیاد می‌شود. در این شکل نیز پس از نامریی‌ساز ایده‌آل، بیشترین کاهش سطح مقطع راداری مربوط به نامریی‌ساز ساده شده-۲ است که میزان تغییرات آن برحسب فرکانس نیز از نامریی‌ساز ساده شده-۳ کمتر است.

- [7] Alu, A.; Engheta, N. "Achieving Transparency with Plasmonic and Metamaterial Coatings"; *Phys. Rev. E* 2005, 72, 016623/1-9.
- [8] Sihvola, A. H. "Peculiarities in the Dielectric Response of Negative-Permittivity Scatterers"; *Progress in Electromagnetic Res.*, PIER 2006, 66, 191-198.
- [9] Vafi, K.; Javan Maleki, A. R.; Abrishamian, M. S.; Granpayeh, N. "Dispersive Behavior of Plasmonic and Metamaterial Coating on Achieving Transparency"; *J. Electromagnetic Waves and Appl.* 2008, 22, 941-952.
- [10] Chen, H.; Wu, B. I.; Zhang, B.; Kong, J. A. "Electromagnetic Wave Interactions with a Metamaterial Cloak"; *Phys. Rev. Lett.* 2007, 99, 063903/1-4.
- [11] Zhang, B.; Chen, H.; Wu, B. I.; Luo, Y.; Ran, L. X.; Kong, J. A. "Response of a Cylindrical Invisibility Cloak to Electromagnetic Waves"; *Phys. Rev. B* 2007, 76, 121101/1-4.
- [12] Zhang, B.; Chen, H.; Wu, B. I.; Kong, J. A. "Extraordinary Surface Voltage Effect in the Invisibility Cloak with an Active Device Inside"; *Phys. Rev. Lett.* 2008, 100, 063904/1-6.
- [13] Ruan, Z.; Neff, M. C. W.; Qiu, M. "Ideal Cylindrical Cloak: Perfect but Sensitive to Tiny Perturbations"; *Phys. Rev. Lett.* 2007, 99, 113903/1-4.
- [14] Yan, M.; Ruan, Z.; Qiu, M. "Cylindrical Invisibility Cloak with Simplified Material Parameters is Inherently Visible"; *Phys. Rev. Lett.* 2007, 99, 233901/1-4.
- [15] Argyropoulos, C.; Zhao, Y.; Hao, Y. "A Radially-Dependent Dispersive Finite-Difference Time-Domain Method for the Evaluation of Electromagnetic Cloaks"; *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2009, 57, 5, 1432-1441.
- [16] Cummer, S. A.; Popa, B. I.; Schurig, D.; Smith, D. R.; Pendry, J. "Full-Wave Simulations of Electromagnetic Cloaking Structures"; *Phys. Rev. E* 2006, 74, 036621/1-5.
- [17] Kwon, D. H.; Werner, D. H. "Two-Dimensional Eccentric Elliptical Electromagnetic Cloaks"; *Appl. Phys. Lett.* 2008, 92, 013505/1-3.
- [18] Wu, Q.; Zhang, K.; Meng, F. Y.; Li, L. W. "Electromagnetic Characteristics of Metamaterial Cloak Covered Dielectric Cylinder Illuminated by Electric Line Source"; *IET Microw. Antennas Propag.* 2010, 4, 10, 1680-1688.
- [19] Balanis, C. A. "Advanced Engineering Electromagnetic"; John Wiley, New York, 1989.
- [20] Chew, W. C. "Waves and Fields in Inhomogeneous Media"; IEEE Press, New York, 1995.
- [21] Arslanagic, S.; Breinbjerg, O. "Electric-Line-Source Illumination of a Circular Cylinder of Lossless Double Negative Material: An Investigation of Near Field, Directivity, and Radiation Resistance"; *IEEE Antennas Propagat. Mag.* 2006, 48, 38-54.
- [22] Yan, M.; Ruan, Z.; Qiu, M. "Scattering Characteristics of Simplified Cylindrical Invisibility Cloaks"; *Opt. Exp.* 2007, 15, 17772-17782.
- [23] Yan, W.; Yan, M.; Qiu, M. "Non-Magnetic Simplified Cylindrical Cloak with Suppressed Zeroth Order Scattering"; *Appl. Phys. Lett.* 2008, 93, 021909/1-3.
- [24] Isić, G.; Gajić, R.; Novaković, B.; Popović, Z. V.; Hingerl, K. "Radiation and Scattering from Imperfect Cylindrical Electromagnetic Cloaks"; *Opt. Exp.* 2008, 16, 1413-1422.

نامریی‌ساز ایده‌آل، به نرمی خم می‌شود و از پیرامون ناحیه نامریی‌شونده منتشر می‌شود. در بیرون از نامریی‌ساز جبهه موج الکترومغناطیسی تابشی تغییر نمی‌کند، یعنی با وجود نامریی‌ساز ایده‌آل، ناحیه نامریی‌شونده حاوی یک استوانه هادی هیچ نوع میدان پراکندگی ایجاد نمی‌کند و وجود استوانه هادی به‌وسیله موج تابشی حس نمی‌شود.

کاربرد نامریی‌ساز برای کاهش سطح مقطع راداری و استتار مطالعه شده است و از نظر تحقق و پیاده‌سازی نیز عملکرد و حساسیت نامریی‌ساز استوانه‌ای با وجود برخی ملاحظات عملی مانند اثر ساده‌سازی پارامترها، بررسی شده است. با استفاده از لایه استوانه‌ای نامریی‌ساز ایده‌آل می‌توان سطح مقطع راداری را به میزان $34/38$ dB کاهش داد و با استفاده از نامریی‌سازهای ساده شده کاهش سطح مقطع راداری تا سطح بیش از 18 dB قابل دستیابی است. پس هرچند میزان کاهش سطح مقطع راداری در این نوع نامریی‌سازها در مقایسه با نامریی‌ساز ایده‌آل کمتر است، با وجود این، ضمن قابل تحقق بودن، میزان کاهش سطح مقطع راداری و استتارشان در حد قابل قبولی است.

۶. تقدیر و تشکر

به پاس زحمات و راهنمایی‌های شروع تحقیق، این مقاله به روح مرحوم دکتر محمد حکاک تقدیم می‌شود. این تحقیق طبق قرارداد شماره (۵۰۰/۴۲۸۴/ت) از حمایت مالی مؤسسه تحقیقات ارتباطات و فناوری اطلاعات (ITRC) برخوردار بوده است، بدین وسیله از این مؤسسه تشکر و قدردانی می‌شود.

۷. مراجع

- [1] Pendry, J.B.; Schurig, D.; Smith, D.R. "Controlling Electromagnetic Fields"; *J. Sci.* 2006, 312, 1780-1782.
- [2] Schurig, D.; Mock, J.J.; Justice, B.J.; Cummer, S. A.; Pendry, J. B.; Starr, A.F.; Smith, D.R. "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies"; *J. Sci.* 2006, 314, 977-980.
- [3] Leonhardt, U. "Optical Conformal Mapping"; *J. Sci.* 2006, 312, 1777-1780.
- [4] Xi, S.; Chen, H.; Wu, B.I.; Zhang, B.; Huangfu, J.; Wang, D.; Kong, J.A. "Effects of Different Transformations on the Performance of Cylindrical Cloaks"; *J. Electromagnetic Waves and Appl.* 2008, 22, 11, 1489-1497.
- [5] Cheng, X.; Chen, H.; Wu, B.I.; Kong, J.A. "Cloak for Bianisotropic and Moving Media"; *Progress In Electromagnetic Res.*, PIER 2009, 89, 199-212.
- [6] Schurig, D.; Pendry, J.B.; Smith, D.R. "Calculation of Material Properties and Ray Tracing in Transformation Media"; *Optics Express* 2006, 14, 21, 9794-9804.