

طراحی ساده و سریع پنهان‌ساز فرش دایروی با استفاده از نکات هم‌مدیس و بهینه‌سازی آن با الگوریتم اجتماع پرندگان

محمد رضا خرمیان^{۱*}، عطاءالله ابراهیم‌زاده^۲، بیژن ذاکری^۳

۱- کارشناس ارشد ۲- دانشیار ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۴/۰۱/۲۵، پذیرش: ۹۴/۰۸/۰۹)

چکیده

استفاده از تبدیلات نوری برای کنترل امواج الکترومغناطیسی موضوعی است که در سال‌های اخیر کاربردهای زیادی پیدا کرده است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این تبدیلات، استفاده از آن‌ها در پنهان‌سازی اهداف از دید امواج راداری، از طریق تغییر مسیر امواج ورودی می‌باشد. پنهان‌سازی زیر فرش، نوع خاصی از پنهان‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان اهداف روی زمین را که زیر یک پوشش فلزی قرار گرفته اند، از نظر پنهان نمود. در این مقاله روشی ساده برای طراحی پنهان‌ساز فرش برای هدف مورد نظر که زیر یک لایه فلزی دایروی قرار گرفته، ارائه شده است. مزیت این روش رسیدن به یک رابطه بسته برای طراحی پنهان‌ساز، ساده بودن مراحل کار و نیاز نداشتن به محاسبات پیچیده می‌باشد. همچنین یک ساختار پیشنهادی برای پنهان‌سازی یک انبار مهمات، با کمک گرفتن از الگوریتم اجتماع پرندگان برای طراحی بهینه ساختار، ارائه شده است. هر دو طرح پیشنهادی در نتیجه شبیه‌سازی‌هایی که در کد تفاضل محدود حوزه زمان انجام گرفت، نتایج قابل قبولی در بازه فرکانسی ۵۰ MHz تا ۲ GHz دارند. همه مراحل طراحی پنهان‌ساز فرش با استفاده از تبدیلات نوری شامل تبدیلات مورد استفاده و محاسبات ماتریسی برای ارزیابی ساختار پیشنهادی و نیز روش شبیه‌سازی آن با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD)، در این مقاله تشریح گردیده است و روش جدیدی برای مقایسه امواج بازتابی از طریق معیار فاصله هاوسدورف اصلاح‌شده معرفی و به‌کار گرفته شده است.

واژگان کلیدی

تبدیلات نوری، پنهان‌ساز فرش، پنهان‌سازی الکترومغناطیسی، الگوریتم اجتماع پرندگان

۱. مقدمه

در نخستین گام جان پندری در سال ۲۰۰۶، برای پنهان‌سازی یک استوانه هادی، ساختار یک پوسته را برای آن تعریف کرد [۱] و آن را پیاده‌سازی نمود [۳]. مشخصه‌های ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی با استفاده از نوعی تبدیلات نوری که محیط دایره را به یک نقطه نگاشت می‌کند، محاسبه شده و با استفاده از متامتریال‌ها پیاده‌سازی شدند. مزیت این روش، پنهان‌سازی^۱ کامل هدف در فضای آزاد بود اما معایب بزرگی هم داشت. نخستین مسئله مقادیر عددی بسیار کوچک ضریب گذردهی الکتریکی در مرز بین پوسته و استوانه هادی است که سازنده را به استفاده از سلول‌های واحد متامتریال در حالت تشدید مجبور می‌کند. این امر، علاوه بر پیچیدگی ساخت، داشتن پهنای باند بسیار کم را به دنبال

تبدیلات نوری این امکان را به ما می‌دهند که مسیر امواج را مطابق خواست خود تغییر دهیم [۱-۳]. این تبدیلات در واقع نوعی نگاشت هم‌مدیس هستند که نقاط را از یک مختصات، به مختصاتی دیگر تبدیل می‌کنند. مشخصه‌های ذاتی محیط با استفاده از تبدیلات نوری محاسبه شده و با متامتریال‌ها پیاده‌سازی می‌شوند [۳-۴]. از سال ۲۰۰۶ که جان پندری از تبدیلات نوری برای پنهان‌سازی اهداف از دید امواج الکترومغناطیسی استفاده نمود [۳]، اقبال زیادی برای پژوهش و مطالعه روی آن‌ها به‌وجود آمد و کاربردها و روش‌های متعددی برای استفاده از آن‌ها تعریف شد.

بهبتری در پنهان‌سازی برای یک زاویه خاص دارد. مشکل اصلی این روش محدودیت زاویه است که کاربرد آن را محدود می‌نماید. در روشی که در سال ۲۰۱۲ ارائه شده، ساختار نهائی به‌وسیله تئوری متوسط مؤثر لایه‌لایه شده و پیشنهادی برای پیاده‌سازی نهائی با ساختارهای توری داده شده است [۱۲]. این تئوری به‌دلیل پیچیدگی‌های پیش‌رو به ساخت منجر نشده است.

از کاربردهای پنهان‌سازی زیر فرش می‌توان به طراحی انبار مهمات، طراحی پوشش برای محل نگهداری وسایل نقلیه، انبار مهمات و ساختمان‌های مهم و استراتژیک نام برد.

در این گزارش، روش‌هایی برای طراحی پوشش پنهان‌ساز زیر فرش بر مبنای نگاشت همدیس ارائه شده که پیچیدگی‌های نمونه‌های قبلی را نداشته و البته به نتایج مشابه نسبت به موارد قبل می‌رسد. در بخش ۲ بحث تئوری و شیوه طراحی پنهان‌ساز فرش توضیح داده شده. در بخش ۳ طرح ارائه شده برای دایره معرفی شده و نتایج آن برای حالت‌های مختلف ارائه شده است. در بخش ۴ نتایج برای طرح بهینه پنهان‌ساز دایره‌ای شکل به‌دست آمده است. در بخش ۵ یک طرح برای یک انبار مهمات، با استفاده از پنهان‌ساز دایروی ارائه شده است.

۲. پنهان‌ساز فرش

۲-۱. شیوه طراحی

پنهان‌سازی زیر فرش و یا پنهان‌سازی صفحه زمین، اهداف را زیر یک سطح هادی، روی سطح زمین پنهان می‌کند. به بیان ساده، رفتار این حجم پنهان‌ساز که به‌صورت پوششی روی یک سطح فلزی با شکل مشخص قرار می‌گیرد، به‌گونه‌ای است که امواج بازتابی کاملاً مانند امواجی که از یک سطح هادی مسطح بازتاب می‌شوند خواهند بود. با توجه به تحلیل‌های صورت‌گرفته در مراجع علمی مرتبط، به‌دلیل پیچیدگی حل مسئله در سه بعد، محاسبات و نتایج در دو بعد تعریف شده که این تحلیل‌ها قابل تعمیم به حالت سه‌بعدی می‌باشد.

نگاشتی که در پنهان‌سازی زیر فرش مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌جای تبدیل به نقطه، تبدیل به خط است [۸-۵]. در حالت تبدیل به نقطه، تمام محیط شکل، از لحاظ ریاضی به یک نقطه فشرده می‌شده که البته یک نقطه اگر خاصیت هادی ایده‌آل را داشته‌باشد، تأثیری در میزان موج بازگشتی نخواهد داشت. در روش جدید، چند نکته مد نظر است. نوع نگاشت، از لحاظ ریاضی به این گونه است که سطح هادی پوشاننده هدف را به یک خط که چسبیده به زمین و جزئی از آن است، تبدیل می‌نماید. در نتیجه این نگاشت، به‌دلیل اینکه نوع فشرده‌گی محیط با حالت قبل تفاوت می‌کند، ضرایب

خواهدداشت. همچنین به‌دلیل ناهمسانگردی محیط، مباحث مربوط به ساخت پیچیده‌تر خواهد شد.

در سال ۲۰۰۸ شکل دیگری از پنهان‌سازی به‌وسیله تبدیلات نوری، توسط جان پندری ارائه شده که البته مشکلات گذشته را نداشت [۵]. این نوع پنهان‌سازی که به اصطلاح، پنهان‌سازی زیر فرش^۱ و یا پنهان‌سازی صفحه زمین نامیده می‌شود، اهداف را بین یک سطح هادی و سطح زمین پنهان می‌کند. نگاشتی که در پنهان‌سازی زیر فرش مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌جای تبدیل به نقطه، تبدیل به خط است.

در این روش، به‌دلیل این‌که بازه تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی محاسبه‌شده محدود و در ناحیه مقادیر قابل دسترس است، برای پیاده‌سازی نیازی به استفاده از متامتریال‌ها در حالت تشدید نیست؛ در نتیجه، پهنای باند قابل توجه بوده و پیاده‌سازی آن آسان می‌گردد. همچنین از این نوع پنهان‌سازی با انجام یک سری تغییرات، می‌توان برای پنهان‌سازی در فضای آزاد (حذف سطح زمین) استفاده نمود. مزیت دیگر این روش حرکت به سوی کاهش ناهمسانگردی محیط است که این ویژگی نیز باعث سادگی پیاده‌سازی و بهبود کیفیت امواج بازتابی خواهد بود.

از سال ۲۰۰۸ تا کنون چند روش برای طراحی پوشش پنهان‌ساز زیر فرش ارائه شده است. نخستین روش که توسط جان پندری معرفی شده، نگاشت مرزها از محیط مجازی به محیط فیزیکی، مش‌بندی فضا در محیط فیزیکی با تعداد مش برابر با محیط مجازی و بهینه نمودن ساختار مش با استفاده از تابع‌ها برای داشتن مش‌های مربعی متعامد است [۵]. این روش در سال ۲۰۰۹ به‌صورت عملی پیاده‌سازی شده و نتایج قابل قبولی داشته است [۶]. از معایب این روش می‌توان به حجم زیاد پوشش پنهان‌ساز، پیچیدگی در محاسبات و اندکی تغییر در میدان‌های بازتابی راه نزدیک، اشاره نمود که باعث می‌شود توسط برخی گیرنده‌ها تشخیص داده شود [۷]. در سال ۲۰۰۹ روش نیمه پنهان‌سازی ارائه و پیاده‌سازی شده که مشکل حجم زیاد را تا حدودی برطرف کرده اما مسئله پیچیدگی ساخت، همچنان حل نشده باقی مانده است [۹-۸].

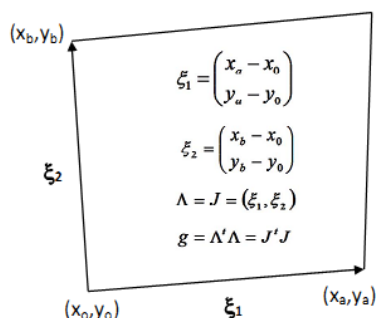
روش دیگر پنهان‌سازی برای یک زاویه خاص است. این روش که بر مبنای یک تحلیل تئوری در سال ۲۰۰۹ و برای ساختارهای مثلثی انجام گرفته است [۱۰]، برای محاسبه مقادیر مشخصه‌های ذاتی محیط، پوشش را لایه لایه کرده و مقادیر را برای هر لایه مشخص می‌نماید. نمونه پنهان‌سازی در فضای آزاد برای یک زاویه خاص در سال ۲۰۱۳ ارائه و پیاده‌سازی شد [۱۱]. نوع تبدیل در این روش کاملاً متفاوت با روش ارائه‌شده توسط جان پندری است اما نتایج

۲-۲. محاسبات ماتریسی برای هر مش^۱

برای محاسبه مقادیر ضریب شکست محیط، ضریب گذردهی الکتریکی، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، میزان ناهمسانگردی و زاویه بین مش‌ها نیازمند استفاده از یک سری پارامترهای طراحی مش هستیم. مش شکل ۲ را به‌عنوان یک مش نمونه در نظر می‌گیریم. نقطه مورد نظر ما x_0 و y_0 است که مش نشان داده شده در شکل ۲، مش متناظر با آن است. بردارهای ξ_1 و ξ_2 بردارهای کوواریانت مربوط به نقطه (x_0, y_0) و مش مورد نظر هستند. با توجه به شکل، دو بردار به صورت زیر می‌باشند:

$$\xi_1 = \begin{pmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \end{pmatrix} \quad \text{و} \quad \xi_2 = \begin{pmatrix} x_b - x_0 \\ y_b - y_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ξ_1 را بردار کوواریانت در راستای x و ξ_2 را بردار کوواریانت در راستای y تعریف می‌کنیم. این دو پارامتر، میزان تغییرات مکانی در راستاهای x و y را تعیین می‌کنند.



شکل ۲. یک مش فرضی و بردارهای کوواریانت

پارامتر بعدی ماتریس ژاکوبین است. (رابطه ۲) بردارهای کوواریانت هر مش ستون‌های ماتریس ژاکوبین آن مش را تشکیل می‌دهند.

$$\Lambda = J = (\xi_1, \xi_2) = \begin{pmatrix} x_a - x_0 & x_b - x_0 \\ y_a - y_0 & y_b - y_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

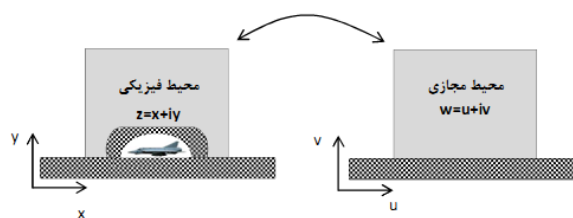
ماتریس ژاکوبین به‌طور معمول برای نمایش میزان تغییرات از یک نگاشت به نگاشت دیگر صورت می‌گیرد، و صورت کلی آن به‌صورت میزان تغییرات ثانویه نسبت به مختصات اولیه نوشته می‌شود، اما به‌دلیل اینکه در مسئله مورد بحث، محیط اولیه کاملاً متعامد و در نتیجه مقادیر درایه‌های بردارهای کوواریانس آن برابر واحد است، از نوشتن آن صرف نظر شده است.

در نهایت ماتریس تانسور g از ضرب ترانپوخته ماتریس ژاکوبین در خود ماتریس ژاکوبین به‌دست می‌آید. (رابطه‌های ۳ و ۴) درایه‌های ماتریس تانسور g تغییرات مکانی در راستاهای x و y را نسبت به هم نشان می‌دهند. در نتیجه برای هر مش از فضا، دو بردار کوواریانت،

گذردهی الکتریکی و مغناطیسی محاسبه شده نیز متفاوت است.

طبق شکل ۱، دو محیط یا مختصات باید در نظر گرفته شوند؛ محیط اول، محیط فیزیکی و واقعی است که در آن هدف روی زمین قرار گرفته و یک سطح فلزی روی آن را می‌پوشاند و در نهایت یک پوشش پنهان‌ساز روی آن دو را می‌پوشاند. پوشش عبارت است از یک محیط ناهمگن که مقادیر ضریب گذردهی الکتریکی در بخش‌های مختلف آن متفاوت است. محیط دوم یک محیط مجازی است که در تمام نقاط آن، مقادیر ضرایب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی یکسان بوده و برابر فضای آزاد می‌باشد. در واقع وظیفه محیط اول این است که امواج را به‌گونه‌ای منحرف کند تا امواج بازتابی کاملاً مشابه حالتی باشند که چیزی روی زمین قرار نگرفته است؛ یعنی شبیه محیط مجازی [۴-۵]. برای انجام محاسبات، محیط فیزیکی و مختصات آن را با $z=x+iy$ و محیط مجازی و مختصات آن را با $w=u+iv$ نمایش می‌دهیم. محدوده x, y, u, v مطابق با طول و عرض پوشش خواهند بود.

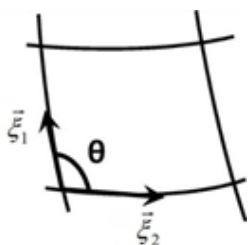
ابتدا در محیط مجازی یک مش‌بندی کاملاً متعامد انجام می‌گیرد. چون همه شرایط در محیط مجازی عادی و معمولی است، این کار به‌سادگی انجام می‌پذیرد. سپس مرزها از محیط مجازی به محیط فیزیکی نگاشته می‌شوند. قسمت قابل توجه نگاشت مرز پایینی است که جسم مورد نظر و پوسته فلزی روی آن را می‌پوشاند. در مرحله بعد فضای داخل ناحیه پنهان‌سازی (فضای درون ۴ مرز انتقال‌یافته) مش‌بندی خواهد شد. نکاتی که باید در این مرحله مد نظر قرار گیرد این است که اولاً تعداد مش‌ها در محیط‌های فیزیکی و مجازی باید با هم برابر باشند؛ در نتیجه در محیط فیزیکی در محدوده‌هایی فشردگی و تغییر اندازه مش‌ها را خواهیم داشت و ثانیاً مش‌بندی باید به‌صورت متعامد صورت گیرد. نکته سوم این است که باید سعی شود با وجود فشردگی، اختلاف میان اندازه مش‌های بزرگ‌تر که معمولاً در حوالی مرزها قرار دارند، با مش‌های ریزتر، از محدوده خاصی بیشتر نباشد و این فشردگی در میان همه مش‌ها تقسیم گردد. این میزان فشردگی به اصطلاح ناهمسانگردی نامیده می‌شود و بهترین مقدار ناهمسانگردی ۱ می‌باشد [۵].



شکل ۱. نگاشت کلی از مختصات فیزیکی به مختصات مجازی.

مش‌ها در فضای فیزیکی بیشتر خواهد شد. در نتیجه، معیار تعامد مش‌ها دیگر پارامتر مهم در مش‌بندی بهینه برای طراحی پنهان‌ساز فرش است. در حالت تحلیل با قطبی‌شدگی میدان الکتریکی (TMz)، هرچه زاویه بین دو بردار کوواریانت به سمت تعامد برود، یعنی مش متعامدتر گردد، تغییرات ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ) کمتر شده و در نتیجه تلفات کمتر شده و همچنین امکان پیاده‌سازی ساده‌تر ساختار نهایی به‌وسیله دی‌الکتریک‌ها را فراهم می‌سازد.

در حالت قطبی‌شدگی میدان مغناطیسی (TEz)، با رفتن به سمت تعامد، تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی (e) کمتر شده و امکان ساخت توسط مواد مغناطیسی فراهم می‌شود [۱۵].



شکل ۳. زاویه بین دو بردار کوواریانت

کسینوس زاویه بین دو بردار کوواریانت، که در شکل ۳ نمایش داده شده است، از رابطه ۸ محاسبه می‌گردد. هرچه این مقدار بیشتر به صفر نزدیک باشد، یعنی زاویه بین دو بردار کوواریانت به ۹۰ درجه نزدیک شده است [۱۵].

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{g_{12} g_{21}}{g_{11} g_{22}}} \quad (8)$$

در طرح ارائه‌شده توسط جان پندری، در نهایت، مقدار بیشینه ناهمسانگردی برای ساختار ارائه شده، تا عدد ۱/۰۴۲ کاهش پیدا نمود [۱۵].

در طرح ارائه‌شده توسط کالوس و همکارانش در سال ۲۰۰۹ که یک نمونه‌ی ساده‌سازی شده است و لایه‌های تطبیق‌کننده حذف شده‌اند، میزان ناهمسانگردی به عدد ۱/۲ رسیده است [۸].

۳. طرح و روش ارائه شده برای نیم‌دایره

۳-۱. پنهان‌سازی نیم‌دایره

در این مقاله برای پنهان‌سازی ساختارهایی با شکل هندسی ساده، با یافتن نگاشت هم‌مدیسی که شکل مورد نظر را تبدیل به یک خط نماید، کار بسیار آسان خواهد شد. با توجه به تئوری‌های مطرح شده در تبدیلات نوری، با در دست داشتن رابطه نگاشت می‌توان

یک ماتریس ژاکوبین و یک ماتریس تانسور تعریف شده و پارامترهای مورد نظر، از این ماتریس‌ها استخراج می‌شوند [۱۴-۱۳].

$$g = \Lambda^t \Lambda = J^t J \quad (3)$$

$$g_{ij} = \xi_i \cdot \xi_j \quad i, j = 1, 2 \quad (4)$$

۳-۲. محاسبه مقادیر مورد نظر

در این مرحله با استفاده از پارامترهای ماتریسی محاسبه‌شده، مقادیر مورد نظر خود را به‌دست می‌آوریم. طبق تئوری‌های مطرح‌شده مقادیر ضرایب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی از روابط ۵ و ۶ به‌دست می‌آیند [۱۵]. در رابطه ۵ مقدار ضریب گذردهی الکتریکی در محیط مجازی است که برابر مقدار فضای آزاد اطراف ساختار ما است.

$$\varepsilon = \varepsilon_{ref} / \sqrt{\det g} \quad (5)$$

$$\mu^{ij} = \Lambda^t \Lambda / \sqrt{\det g} \quad (6)$$

میزان ناهمسانگردی مش‌بندی محیط که تابعی از فاصله است، از رابطه ۷ محاسبه می‌گردد. این پارامتر، معیاری از یکنواختی اندازه مش‌هاست. هرچه فشردگی مش در یک ناحیه خاص بیشتر شود، یعنی هرچه اندازه مش‌ها کوچکتر گردد، میزان ناهمسانگردی بیشتر شده و در نتیجه آن، میزان تغییرات مقادیر ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بیشتر شده و در نتیجه فرآیند پیاده‌سازی داری پیچیدگی بیشتری بوده و پهنای باند فرکانسی که پنهان‌ساز در آن به خوبی عمل می‌کند، کمتر خواهد شد [۱۴].

$$\alpha + \frac{1}{\alpha} = \frac{Tr(g)}{\sqrt{\det g}} \quad (7)$$

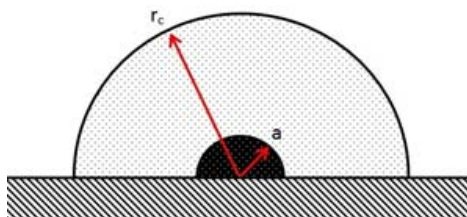
آن‌چه در محاسبه نتایج حائز اهمیت است، بیشینه میزان ناهمسانگردی است که باید تا حد امکان به ۱ نزدیک گردد [۱۵]. پندری برای رساندن ناهمسانگردی به حداقل مقدار خود، از یک تکنیک خاص مش‌بندی با استفاده از روش تغییرات^۱ استفاده نمود. در این روش از یک تابع برای کنترل یکنواختی مش‌بندی استفاده می‌شود که با بهینه کردن این تابع، مش‌بندی انجام‌گرفته تا حدود زیادی یکنواخت خواهد شد. در نتیجه نهائی این تحلیل‌ها مشخص شد که این مقدار بهینه، نگاشت نیمه هم‌مدیس را در تبدیل دو مختصات ایجاد خواهد نمود [۵ و ۱۴].

از سوی دیگر، از آن‌جایی که طی نگاشت هم‌مدیس، علاوه بر تغییر اندازه کلی شکل، زوایا ثابت می‌مانند، هرچه نگاشت صورت‌گرفته بین دو فضا بیشتر به سمت نگاشت هم‌مدیس میل کند، میزان تعامد

شکست محیط فیزیکی به دست می‌آید. همچنین با توجه به این رابطه و رابطه (۱۲)، مقدار ضریب گذردهی الکتریکی در محیط فیزیکی محاسبه می‌شود.

$$n = \left| 1 - \frac{a^2}{z^2} \right| \quad (15)$$

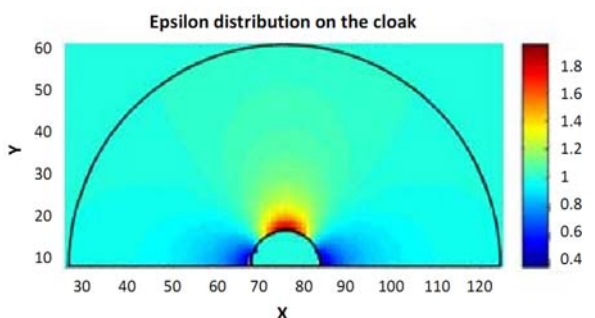
حجم پنهان‌ساز، بین شعاع دایره مورد نظر و یک شعاع خارجی تعریف می‌شود. با توجه تئوری‌های مطرح‌شده، مقدار شعاع خارجی (r_c) باید تا اندازه‌ای بزرگ باشد که تقریباً به صورت بی‌نهایت عمل کند. مقدار $r_c = 10a$ به‌عنوان مقداری مناسب معرفی شده است. نمای کلی ناحیه پنهان‌ساز در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵. نمای کلی دایره هادی و پوشش پنهان‌ساز

معادلات تبدیل برای فضای بین دایره به شعاع a و دایره خارجی به شعاع $10a$ نوشته می‌شود. باید دقت گردد که توجه به این نکته که مقدار مشتق نگاشت در نقاطی که $a=z$ است، برابر صفر می‌شود و در نتیجه، نگاشت، در این نقاط همدیس نخواهد بود، تغییر کوچکی باید در کار صورت گیرد. برای رفع این مشکل، مرز پایین محدوده‌ای که تبدیل در آن صورت می‌گیرد، از a به $a+v_0$ تغییر می‌کند.

در تحلیل‌های انجام گرفته، $a=5\text{ cm}$ ، $r_c=10a=50\text{ cm}$ و $v_0=2\text{ cm}$ فرض شده است. الگوی تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی پوشش پنهان‌ساز، در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶. توزیع ضریب گذردهی الکتریکی روی پوشش دایروی

۲-۳. تحلیل و شبیه‌سازی

شبیه‌سازی برای بررسی عملکرد طرح ارائه‌شده، در یک محیط دو بعدی با طول و عرض 150 cm ، با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه زمان^۲ (FDTD) انجام گرفته است [۱۶]. برای تحریک از یک پالس گوسی در حوزه زمان که در همه جهات منتشر می‌شود استفاده شده است.

2- Finite Difference Time Domain (FDTD)

مقدار ضریب شکست مورد نظر را محاسبه نمود [۲].

اگر فرض کنیم طی نگاشت، مختصات $z=x+iy$ به مختصات $w=u+iv$ تبدیل می‌شود، طبق رابطه ۹ نسبت ضریب شکست دو محیط محاسبه می‌گردد. در این رابطه n ضریب شکست مورد نظر در محیط فیزیکی و n' ضریب شکست مورد نظر در محیط مجازی است. با توجه به این که مقادیر ϵ_r و μ_r در محیط مجازی، برابر فضای آزاد (برابر با ۱) هستند و با در نظر داشتن رابطه (۱۰) مقدار n' نیز برابر با ۱ بوده و رابطه (۹) به رابطه (۱۱) اصلاح می‌گردد.

با در نظر گرفتن مقدار ۱ برای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (با توجه به همدیس بودن نگاشت و تعامد مش‌ها، این فرض ایرادی به کلیت کار وارد نمی‌کند). مقدار ضریب گذردهی الکتریکی از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

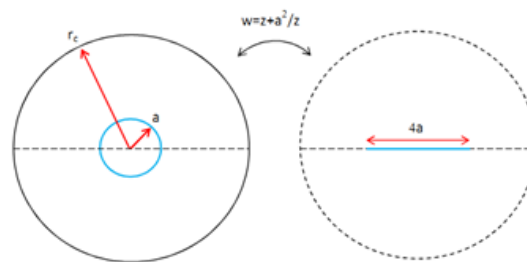
$$n = n' \left| \frac{dw}{dz} \right| \quad (9)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (10)$$

$$n = \left| \frac{dw}{dz} \right| \quad (11)$$

$$\mu_r = 1, \quad \epsilon_r = n^2 / \mu_r \quad (12)$$

برای سادگی کار، برای انجام تبدیل، از نگاشت یاکوفسکی^۱ استفاده می‌کنیم؛ این نگاشت، تبدیلی مختلط است که طی آن، با توجه به شکل ۴ یک دایره به شعاع a ، به خطی با طول $4a$ و یا بالعکس تبدیل می‌شود [۲] (روابط ۱۳ و ۱۴).



شکل ۴. تبدیل دایره به خط با نگاشت یاکوفسکی

$$w = z + \frac{a^2}{z} \quad (13)$$

$$z = \frac{1}{2}(w \pm \sqrt{w^2 - 4a^2}) \quad (14)$$

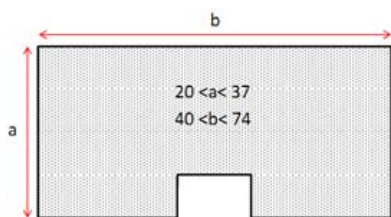
در فرآیند پنهان‌سازی فرش، هدف این است که دایره هادی در محیط فیزیکی به یک خط هادی- که مماس با زمین است- تبدیل شود. در نتیجه، با توجه به رابطه (۱۱)، رابطه (۱۵) برای ضریب

1- Joukowski transform

اولیه که برای آن‌ها در نظر گرفته شده، در شکل ۸ نشان داده شده است. با اجرای برنامه در نقاط صحیح از بازه‌های در نظر گرفته شده برای این دو پارامتر و انجام یک جستجوی ساده، مقادیر بهینه زیر برای مستطیل مورد نظر به دست می‌آید:

$$a = 24 \text{ cm}, b = 72 \text{ cm}$$

در این مقاله، جهت مقایسه نتایج برای انتخاب بهترین ساختار که موج بازتابی از آن، بیشترین شباهت را با موج بازتابیده شده از سطح زمین دارد، روش سنجش شباهت "فاصله هاوسدورف اصلاح شده" معرفی و استفاده شده است [۱۸-۱۹]. شرح بیشتر این روش و نحوه استفاده از آن در بخش ۵-۲ آمده است.



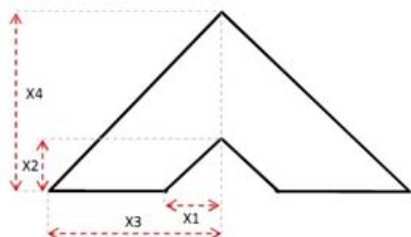
شکل ۸. ساختار کلی و محدوده تغییرات پارامترها برای طراحی ساختار مستطیلی پنهان‌ساز.

۴. طراحی انبار پنهان‌سازی شده

۴-۱. طرح بهینه انبار

از کاربردهای روش پنهان‌سازی زیر فرش، طراحی سازه‌هایی برای پنهان‌سازی تجهیزات نظامی مانند انبار مهمات و آشیانه هواپیما است. در این بخش، با استفاده از روش پنهان‌سازی ارائه شده، یک طرح یک انبار مهمات به شکل مثلث ارائه شده است. انتخاب طرح مثلث به دلیل پنهان ماندن بیشتر از چشم انسان، نسبت به ساختار مستطیلی می‌باشد.

در این طرح، نداشت مورد استفاده، تغییری نکرده و تنها شکل کلی انبار مورد نظر، با کمک گرفتن از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان^۲ طراحی شده است. روش اجتماع پرندگان یک روش سراسری کمینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان با مسائلی که جواب آنها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می‌باشد، برخورد نمود. ساختار پیشنهادی برای انبار و پارامترهای تعیین شده جهت بهینه‌سازی، در شکل ۹ نمایش داده شده اند.

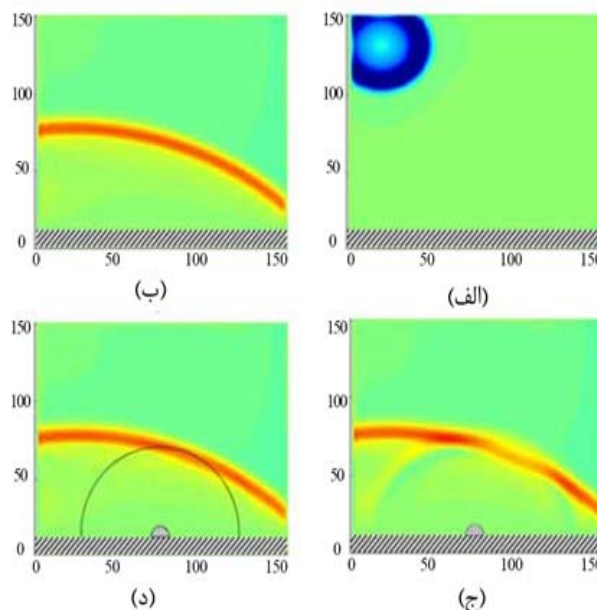


شکل ۹. ساختار مثلثی پیشنهادی برای طرح انبار پنهان‌سازی شده.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، یک لایه هادی به قطر ۱۰ سلول (۱۰ cm) برای مدل‌سازی سطح زمین گرفته است. همچنین به دلیل این‌که بازتاب‌های ناخواسته خللی در نتایج ایجاد نکند، حاشیه‌های محیط با لایه تطبیق‌شده ایده‌آل (PML) با ضخامت ۵ سلول پوشانده شده است [۱۶-۱۷].

فرآیند شبیه‌سازی در سه حالت زمین مسطح (چیزی روی زمین قرار نگرفته)، نیم‌دایره هادی روی سطح زمین، و نیم‌دایره پنهان‌سازی شده روی سطح زمین صورت می‌گیرد.

موج بازتاب‌شده در سه حالت فوق را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود. در شکل (الف-۷) پالس گوسی ایجادشده مشاهده می‌گردد. در شکل (ب-۷) بازتاب ایجاد شده توسط سطح زمین، در شکل (ج-۷) بازتاب ایجاد شده از دایره هادی و در شکل (د-۷) بازتاب ایجاد شده از دایره هادی پنهان‌سازی شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بازتاب ایجادشده از دایره هادی به همراه پوشش پنهان‌ساز، کاملاً مشابه بازتاب ایجاد شده از سطح زمین است.



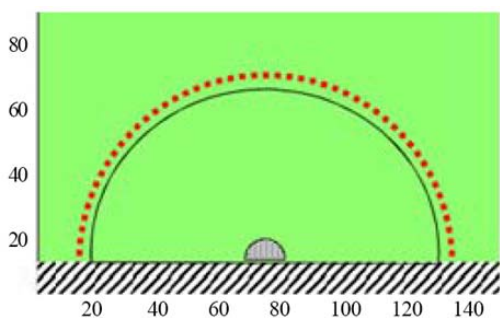
شکل ۷. (الف) موج ورودی، بازتاب امواج ورودی از (ب) زمین، (ج) دایره هادی (د) دایره پنهان‌سازی شده. ابعاد فضا ۱۵۰*۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد.

۳-۳. بهینه‌سازی پنهان‌ساز

با توجه به این‌که پنهان‌ساز طراحی شده در بخش قبل، حجم زیادی را اشغال می‌نماید و نیز شکل مدور پنهان‌ساز، فرآیند ساخت و پیاده‌سازی را تا اندازه‌ای دشوار خواهد نمود، انتخاب یک ساختار مستطیلی کوچکتر، مناسب به نظر می‌رسد. باید در نظر داشت که اولاً نداشت هم‌مدیسی معرفی شده و ثانیاً کیفیت پنهان‌سازی همچنان حفظ گردد.

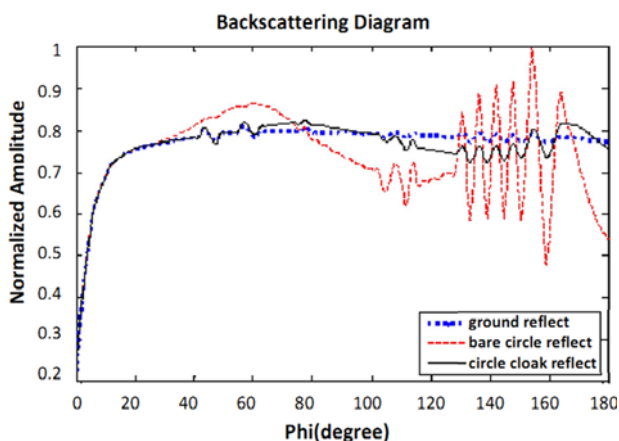
برای انتخاب ساختار بهینه، دو پارامتر طول و عرض برای ساختار مستطیلی در نظر گرفته شده است. ساختار کلی، پارامترها و بازه

1- Variational Method
2- Particle Swarm Optimization (PSO)



شکل ۱۱. نقاط مورد نظر برای مقایسه موج بازتابی

چه دو نمودار بیشتر به هم شباهت داشته باشند، عدد خروجی به صفر نزدیک‌تر بوده و تشابه کمتر اعداد بزرگتر را نتیجه خواهد داد. نتایج به‌دست‌آمده از میزان تشابه دیاگرام‌های بازتاب با دیاگرام بازتاب سطح زمین مسطح، با استفاده از روش سنجش شباهت فاصله هاوسدورف اصلاح شده " برای حالت‌های بازتاب از سطح زمین، دایره هادی، پنهان‌ساز دایروی و پنهان‌ساز مستطیلی در جدول ۱ نمایش داده شده است. همچنین مقایسه کلی دیاگرام بازتاب برای این حالت‌ها که در شکل ۱۳ نمایش داده شده، تشابه بیشتر با حالت بازتاب از سطح زمین و در نتیجه، برتری ساختار مستطیلی نسبت به ساختار دایروی را نشان می‌دهد. در این شکل بازه زاویه‌ای ۹۰ تا ۱۸۰ درجه که بیشترین تفاوت در امواج بازتابی در آن اتفاق می‌افتد، نمایش داده شده. همه مقادیر به‌دست آمده نسبت به مقدار مربوط به دایره هادی، نرمالیزه شده است.



شکل ۱۲. مقایسه دیاگرام بازتاب برای حالت‌های بازتاب از زمین، بازتاب از دایره هادی و بازتاب از دایره هادی پنهان‌سازی‌شده.

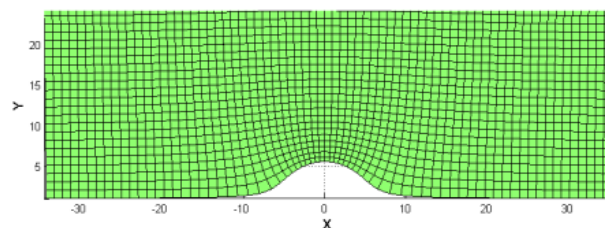
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده امواج بازتابیده شده از پنهان‌ساز مستطیلی با مقادیر $a=24\text{cm}$ و $b=72\text{cm}$ ، بیشترین شباهت را با موج بازتابیده از سطح زمین داشته و به‌عنوان طرح نهائی در این مرحله انتخاب می‌گردد.

۵. نتایج

۵-۱. مش‌بندی و محاسبات ماتریسی

از آنجایی که می‌بایست ساختار ارائه‌شده قابل مقایسه با ساختارهای مشابه باشد، محاسبات ماتریسی روی نگاشت مورد استفاده صورت‌گرفته و نتایج قابل قبولی به‌دست آمده است.

بر این اساس، با در نظر گرفتن دو فضای مجازی (w) و فیزیکی (z) و نوشتن تبدیل از فضای مجازی به فضای فیزیکی، فضای فشرده شده فیزیکی به‌دست می‌آید. برای این فضا که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، محاسبات ماتریسی مربوط به مش‌بندی انجام گرفته و بیشترین ناهمسانگردی در این فضا برابر $1/2$ به‌دست آمده است. همچنین نامتعامدترین زاویه بین بردارهای کوواریانت $79/7306$ درجه بوده است که این مقادیر کاملاً قابل مقایسه با طرح‌های دیگر ارائه شده است.



شکل ۱۰. ساختار مش‌بندی‌شده پنهان‌ساز که توسط نگاشت یاکوفسکی فشرده شده است.

۵-۲. مقایسه نتایج شبیه‌سازی

برای مقایسه دقیق نتایج، اطلاعات امواج بازگشتی در فاصله ۶۰ سانتیمتری از مرکز دایره هادی (بیرون ناحیه پنهان‌سازی‌شده) ذخیره و دامنه بیشینه امواج بازتابی در هر نقطه به‌عنوان بازتاب معیار در آن نقطه در نظر گرفته‌شده و مجموعه این نقاط، دیاگرام بازتاب را برای هدف تشکیل می‌دهند. مقایسه دیاگرام بازتاب برای سه حالت مطرح شده، اطلاعات دقیق‌تری در مورد میزان شباهت سیگنال‌ها به دست خواهد داد. محل نقاط مورد نظر در شکل ۱۱ و مقایسه این مقادیر برای حالت‌های زمین مسطح، استوانه بدون پوشش و استوانه پنهان‌سازی‌شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. تغییرات زاویه‌ای در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، از $\phi=0^\circ$ در سمت چپ نیم‌دایره شکل ۱۱ تا $\phi=180^\circ$ در سمت راست نیم‌دایره است.

برای مقایسه دیاگرام‌های بازتاب و سنجش میزان شباهت آن‌ها با دیاگرام بازتاب زمین روش سنجش شباهت فاصله هاوسدورف اصلاح‌شده معرفی و به‌کارگیری شده است. در این روش، اختلاف طولی و عرضی دو منحنی دوبعدی با استفاده از روابط ریاضی تحلیل و میزان تشابه دو منحنی به‌صورت یک عدد مثبت بیان می‌شود. هر

۳-۵. پهنای باند کاری طرح مستطیلی ارائه شده

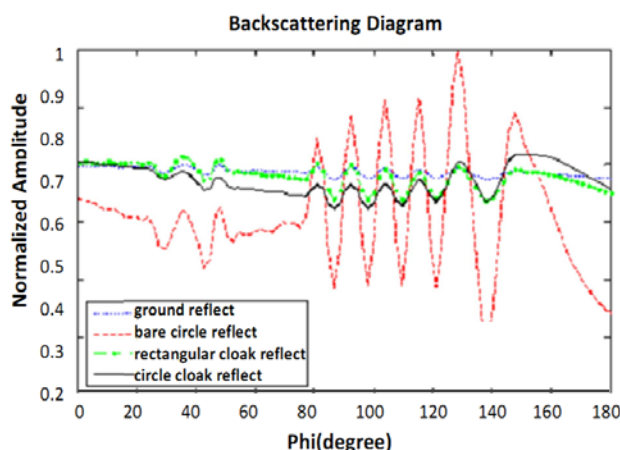
در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده تا اینجا موج ورودی یک پالس گاوسی بوده که نتایج مورد نظر را بدون توجه به فرکانس موج حاصل کرده است. برای به‌دست آوردن پهنای باندی که پنهان‌ساز، عمل پنهان‌سازی را انجام می‌دهد، باید شبیه‌سازی را با امواج ورودی در فرکانس‌های مختلف انجام داد. با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته، طرح ارائه شده در بازه ای از فرکانس‌های پایین تا فرکانس ۲ GHz، عمل پنهان‌سازی را به خوبی انجام داده و برای فرکانس‌های بالاتر از ۲ GHz، بازتاب‌های ناخواسته شروع به ظاهر شدن می‌کنند. تصویری از امواج بازتابی در فرکانس‌های ۵۰ MHz، ۵۰۰ MHz، ۱ GHz، ۱/۵ GHz و ۲ GHz، در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. به‌طور کلی پهنای باند ساختارهایی که به‌وسیله متامتریال‌ها پیاده‌سازی می‌گردند، بستگی به‌اندازه سلول‌های واحد تعریف شده برای پیاده‌سازی ساختار دارد [۱،۴] که اندازه این سلول‌های واحد برابر اندازه هر واحد در نظر گرفته شده در کد FDTD در شبیه‌سازی می‌باشد.

۴-۵. بهینه‌سازی ساختار انبار

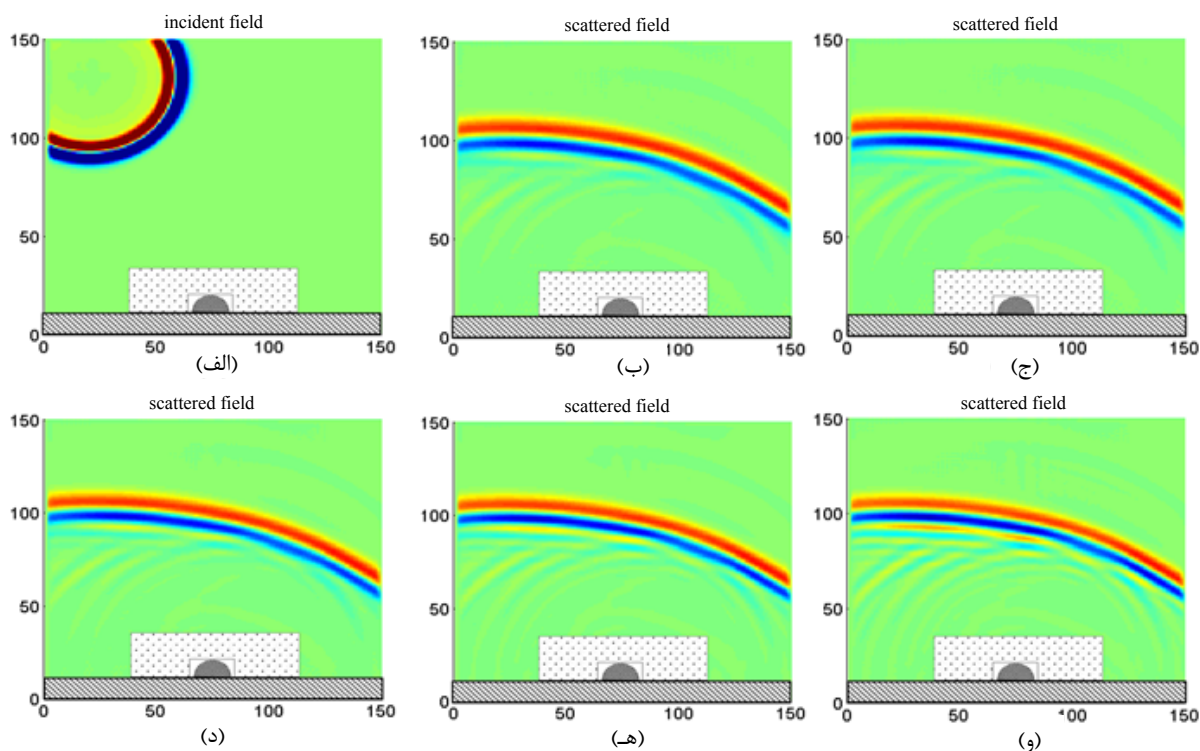
تابع هزینه در الگوریتم مورد استفاده میزان تشابه موج بازتابی (عدد خروجی روش سنجش شباهت فاصله هاوسدورف اصلاح شده) است که می‌بایست کمینه گردد. مفروضات الگوریتم اجتماع پرندهگان مورد استفاده در جدول ۲ آمده‌است.

جدول ۱. مقایسه نتایج میزان شباهت امواج بازتاب در ۴ حالت.

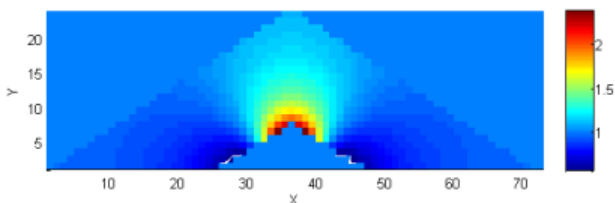
| نتیجه مقایسه | شکل پنهان‌ساز |
|--------------|---------------------------|
| ۱ | دایره هادی بدون پنهان‌ساز |
| ۰/۰۹۶۲ | دایره به شعاع ۵۰ cm |
| ۰/۰۷۲۰ | دایره به شعاع ۳۰ cm |
| ۰/۰۵۵۶ | مستطیل بهینه |



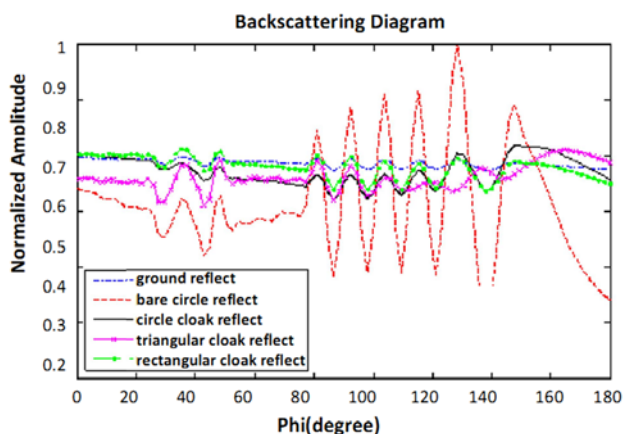
شکل ۱۳. مقایسه دیاگرام بازتاب برای ۴ حالت



شکل ۱۴. شبیه‌سازی با کد FDTD برای ساختار مستطیلی در فرکانس‌های مختلف. (الف) موج ورودی، (ب) بازتاب در فرکانس ۵۰ MHz، (ج) بازتاب در فرکانس ۵۰۰ MHz، (د) بازتاب در فرکانس ۱ GHz، (ه) بازتاب در فرکانس ۱/۵ GHz، (و) بازتاب در فرکانس ۲ GHz



شکل ۱۵. توزیع ضریب گذردهی الکتریکی روی ساختار پیشنهادی برای طرح انبار پنهان‌سازی شده



شکل ۱۶. مقایسه دیاگرام بازتاب برای ۵ حالت.

۶. نتیجه گیری

طرح ارائه شده در این مقاله پنهان‌سازی فرش را برای یک ساختار دایروی با روشی ساده انجام می‌دهد. از لحاظ تئوری و با توجه به محاسبات ماتریسی مش‌های ایجاد شده در طرح، از لحاظ میزان تعامد تا حدود زیادی به تبدیل همدیس نزدیک بوده و همچنین میزان ناهمسانگردی به دست آمده، قابل مقایسه با طرح‌های ارائه شده با فرآیند محاسباتی پیچیده‌تر می‌باشد. همچنین با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام گرفته با روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD)، مشاهده می‌گردد که طرح‌های ارائه شده مستطیلی و مثلثی (طرح انبار مهمات) برای پنهان‌سازی دایره هادی، پنهان‌سازی را در پهنای باند وسیعی انجام می‌دهند. الگوریتم اجتماع پرندهگان با تحلیل ابعاد کلی ساختار مثلثی و فاصله لایه پنهان‌ساز از نیم‌دایره هادی، ضمن انجام محاسبات در زمانی کوتاه‌تر، مقادیر دقیق پارامترهای مورد نظر برای بهینه‌سازی نتایج را محاسبه می‌نماید که کاربرد آن برای طراحی ساختارهای دیگر مفید و مؤثر به نظر می‌رسد. طرح ارائه شده برای استفاده در کاربردهای مختلف پنهان‌سازی روی سطح زمین قابل پیاده‌سازی و انجام است.

جدول ۲. مفروضات الگوریتم اجتماع پرندهگان برای طرح انبار پنهان‌سازی شده

| مقدار | پارامترهای الگوریتم PSO |
|---|-------------------------|
| ۴ | تعداد پارامترها |
| ۱۲ | تعداد ذرات |
| $5 < X_1, X_1 < 15$ $25 < X_3 < 36$ $20 < X_4 < 40$ | محدوده ذرات |
| ۱۰۰ | تعداد تکرارها |
| ۰/۴ | Wmin |
| 0/9 | Wmax |
| ۲ | C1 |
| ۲ | C2 |

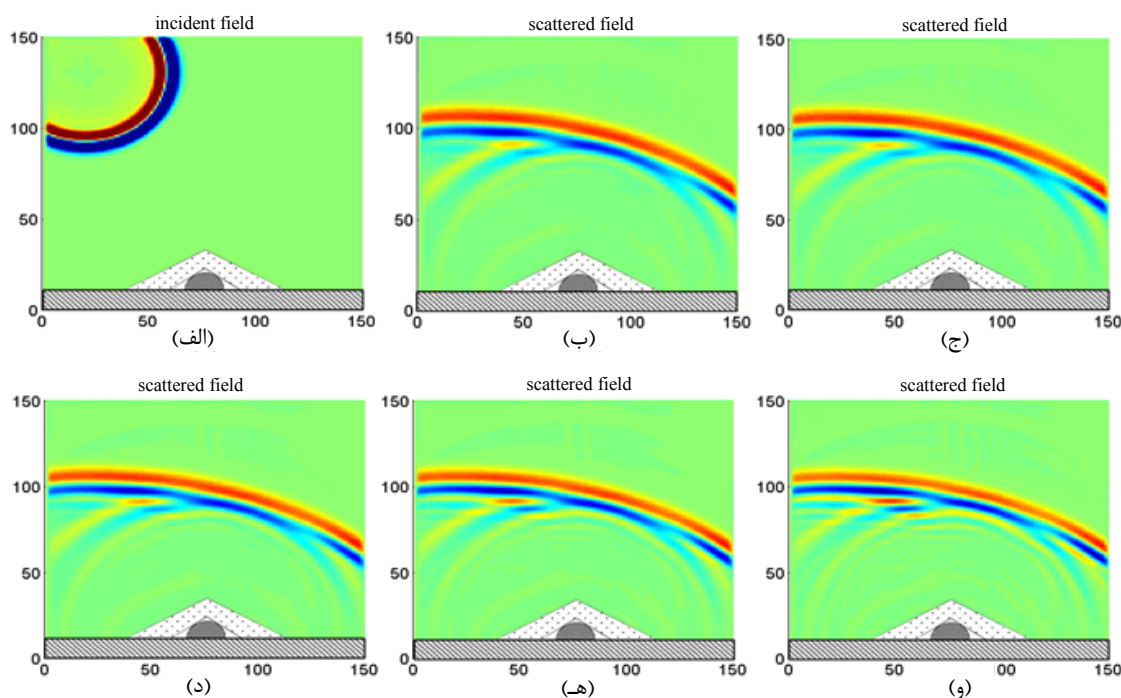
جدول ۳. نتایج الگوریتم اجتماع پرندهگان برای طرح انبار پنهان‌سازی شده

| مقدار | پارامتر |
|-------|--------------------------|
| ۱۰ | X1 |
| ۶ | X2 |
| ۳۷ | X3 |
| ۲۶ | X4 |
| ۰/۰۳۲ | نتیجه مقایسه میزان شباهت |

ساختار نتایج نهائی انبار پنهان‌سازی شده، پس از ۱۰۰ تکرار الگوریتم، مطابق جدول ۳ به دست آمده و در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد، مقایسه دیاگرام بازتاب برای طرح ارائه شده برای انبار، طرح پنهان‌ساز مستطیلی، پنهان‌ساز دایروی و حالت‌های نیم‌دایره هادی و زمین مسطح در بازه زاویه‌ای ۹۰ الی ۱۸۰ نشان می‌دهد که طرح ارائه شده، عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهد.

۵-۵. پهنای باند کاری طرح انبار

طرح ارائه شده برای انبار، نیز در بازه ۵۰ MHz تا ۱/۵ GHz، عملکرد مناسبی داشته و امواج بازتابی تا حدود بسیار زیادی مشابه امواج ورودی به ساختار هستند. با توجه به شکل ۱۷، این طرح در فرکانس‌های ۵۰ MHz، ۵۰۰ MHz، ۱ GHz و ۱/۵ GHz عملکرد مناسبی داشته و از فرکانس ۲ GHz امواج بازتابی تا حدودی تغییر می‌کنند.



شکل ۱۷. شبیه‌سازی با کد FDTD برای ساختار مثلثی در فرکانس‌های مختلف. (الف) موج ورودی، (ب) بازتاب در فرکانس ۵۰ MHz، (ج) بازتاب در فرکانس ۱ GHz، (د) بازتاب در فرکانس ۱ GHz، (ه) بازتاب در فرکانس ۱.۵ GHz، (و) بازتاب در فرکانس ۲ GHz

free-space cloak,” Optics Express, vol. 17, Issue 22, pp. 19947-19959, 2009.

[10] S. Xi, H. Chen, B-I. Wu, and J. A. Kong, “One-directional perfect cloak created with homogeneous material,” IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., vol. 19, p. 131, 2009.

[11] N. Landy and D. R. Smith, “A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves,” Nature Materials, vol. 12, pp. 25–28, 2013.

[12] S.-Y. Wang, S.-B. Liu, G.-L. Dai, X.-A. Li, and J.-P. Yang, “Simplified N-Sided Irregular Polygonal Ground Plane Cloak Created with Oblique Layered Isotropic Dielectrics,” J. of Electromagn. Waves and Appl., vol. 26, pp. 75–88, 2012.

[13] S. K. Khattri, “Grid generation and adaptation by functionals,” Comput. Appl. Math., vol. 26, no. 2, pp. 235–249, 2007.

[14] J. F. Thompson, B. K. Soni, and N. P. Weatherill, “Hand book of Grid Generation,” CRC Press, 1998.

[15] W. Tang, C. Argyropoulos, E. Kallos, W. Song, and Yang Hao, “Discrete Coordinate Transformation for Designing All-Dielectric Flat Antennas,” IEEE Transactions On Antennas And Propagation, vol. 58, no. 12, Dec. 2010.

[16] A. Taflove and S. C. Hagness, “Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed. Boston,” MA: Artech House, 2005.

[17] J.-P. Bérenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” J. Comp. Phys., vol. 114, pp. 185–200, 1994.

۷. مراجع

[1] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, “Controlling electromagnetic fields,” Science 312, p. 1780, 2006.

[2] U. Leonhardt, “Optical Conformal Mapping,” Science 312, pp. 1777-1780, 2006.

[3] D. Schurig, et al, “Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies,” Science 314, pp. 977-980, 2006.

[4] T. J. Cui, D. R. Smith, and R. Liu, “Metamaterials Theory Design, and Applications,” Springer Inc., 1st edition, 2010.

[5] J. Li and J. B. Pendry, “Phys. Rev. Lett. 101,” pp. 203-901, 2008.

[6] R. Liu, et al, “Broadband ground-plane cloak,” Science 323, pp. 366-369, 2009.

[7] B. Zhang, T. Chan, and B.-I. Wu, “Lateral shift makes a ground-plane cloak detectable,” Phys. Rev. Lett. 104, pp. 233-903, 2010.

[8] E. Kallos, C. Argyropoulos, and Y. Hao, “Ground-Plane Quasi-Cloaking for Free Space,” Physical Review A, vol. 79, no. 6, 2009.

[9] H. Feng Ma, W. X. Jiang, X. M. Yang, X. Y. Zhou, and T. J. Cui, “Compact-sized and broadband carpet cloak and

- [18] A. B. Gorji, R. C. Janalizadeh, and B. Zakeri, "RCS Computation of a Relatively Small Complex Structure by Asymptotic Analysis," Copyright 2013 IEICE Proceedings of the "2013 International Symposium on Electromagnetic Theory", 2013.
- [19] N. Gregoire and M. Bouillot, "Hausdorff Distance between Convex Polygons," [Online], Available: <http://cgm.cs.mcgill.ca/~godfried/teaching/cg-projects/98/normand/main.html>