

فراماده جاذب جدید پهن باند، سبک وزن با ضخامت ۱/۴ میلی متر به منظور کاهش سطح مقطع راداری اجسام

عبدالله... ملک زاده فرد خانقشلاقی*، مجید رضایت فام^۲

۱- استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۸/۰۷/۱۰، پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۵)

چکیده

در این مقاله ساختاری جاذب مبتنی بر فراماده به منظور کاهش سطح مقطع راداری اجسام معرفی گردیده است که آرایه دوره‌ای آن از هندسه جدید و نسبتاً ساده‌ای برخوردار است و ضخامت آن ۱/۴ میلی متر است. سازه مورد نظر توسط روش تطبیق امپدانس مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار CST نشان می‌دهد که این ساختار در بازه فرکانسی ۸/۱ الی ۱۰ گیگاهرتز در قطبش‌های TE و TM امواج فرودی دارای جذب مناسبی است که باعث می‌شود سطح مقطع راداری حداقل ۲ و حداکثر ۸۰ دسی‌بل کاهش یابد. سازه جاذب پیشنهادی، ضخامت، اندازه و وزن مناسبی را دارا است که استفاده از آن باعث بهبود در کاهش سطح مقطع راداری اجسام خواهد شد و بدنه اجسام را رادار گریز خواهد کرد.

کلیدواژه‌ها: فراماده، جاذب، سطح مقطع راداری، رادار گریز

۱. مقدمه

انجام خواهد شد. سطح مقطع راداری^۲ از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_{\text{Scatter}}|^2}{|E_{\text{Incidence}}|^2} \quad (1)$$

در این رابطه r فاصله هدف تا رادار، E_{Scatter} میدان الکتریکی پراکنده شده از هدف و $E_{\text{Incidence}}$ نیز میدان الکتریکی فرودی به هدف است [۳]. همچنین رابطه (۲) توان بازگشتی از هدف به رادار را تعیین می‌کند:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{(4\pi r^2)^2} \sigma A_{\text{eff}} \quad (2)$$

در این رابطه P_t توان ارسالی از رادار، G_t بهره آنتن فرستنده رادار و A_{eff} سطح مؤثر آنتن گیرنده رادار است. بر اساس این رابطه با کاهش چهار پارامتر P_t ، G_t ، A_{eff} و σ می‌توان توان بازتاب امواج برگشتی به رادار را کاهش داد و جسم را از دید رادارهای دشمن مخفی ساخت. اما از میان این پارامترها تنها σ برای کاهش سطح مقطع راداری در دسترس ما خواهد بود [۴]. مقدار سطح مقطع راداری به سه عامل هندسه سطح مقطع، بازتاب‌دهندگی و جهت‌مندی آن وابسته است. شکل (۱) وابستگی توان برگشتی به رادار را بر حسب فاصله رادار تا هدف نشان

رادارها تجهیزاتی برای کشف و رهگیری اجسام هستند که بر اساس ارسال و دریافت امواج به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند [۱]. در رادارهای فعال دو آنتن فرستنده و گیرنده امواج وجود دارد. در صورتی که آنتن فرستنده و گیرنده یکسان باشد به آن رادار مونواستاتیک و اگر آنتن فرستنده و گیرنده با فاصله‌ای قابل توجه از هم جدا شده باشد به آن رادار بای‌استاتیک گویند. در رادارهای غیرفعال آنتن فرستنده وجود ندارد و این رادارها با دریافت بازتاب‌های ناشی از فرستنده‌های دیگر کار تشخیص اهداف را به انجام می‌رسانند [۲]. هنگامی که جسمی تحت تابش‌های ارسالی از رادار قرار می‌گیرد قسمتی از امواج پراکنده شده از آن به سمت رادار باز می‌گردد که بر اساس توان امواج برگشتی از آن، جسم را تشخیص داده و رهگیری را انجام می‌دهند. هرچه مقدار این توان کوچک‌تر باشد تشخیص و رهگیری اجسام دشوارتر خواهد بود. امروزه تلاش‌ها برای هرچه کوچک‌تر کردن این توان ادامه دارد به گونه‌ای که کشورهای مختلف سرمایه‌گذاری‌های کلانی را برای رادار گریز کردن جنگنده‌ها، ناوها و دیگر ادوات و تجهیزات نظامی خود انجام داده‌اند. رادار گریزی اجسام با کاهش سطح مقطع راداری^۱ آن‌ها

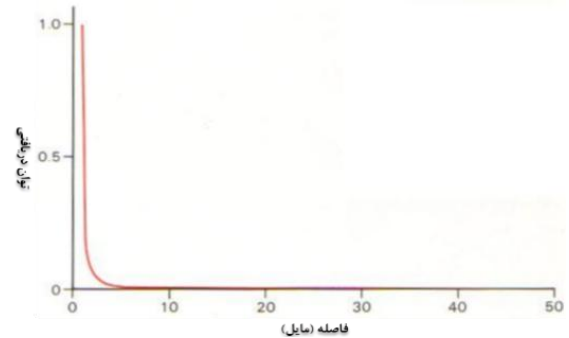
* نویسنده پاسخگو: Afard77@gmail.com

^۱ Radar Cross Section Reduction (RCSR)

^۲ Radar Cross Section (RCS)

فرودی و قطبش امواج وابسته است. برای کمینه کردن بازتاب باید امپدانس مؤثر ساختار با امپدانس هوا تطابق داشته باشد. یکی دیگر از روش‌های کاهش سطح مقطع راداری استفاده از مواد جاذب راداری^۱ مانند فریت آهن کربونیل است. وقتی امواج با پوشش مواد جاذب اندرکنش می‌کنند میدان مغناطیسی با قطب‌های متناوب در پوشش فلزی تولید می‌شود که انرژی سیگنال فرودی را خواهد کاست و آن را به گرما تبدیل خواهد کرد. استفاده از مواد جاذب راداری روشی مؤثر برای کاهش سطح مقطع راداری اهداف است اما چندین مشکل در استفاده از این فناوری وجود دارد. اول اینکه پوشش RAM ها بسیار سمی است و هزینه تولید و نگهداری از آن‌ها بالا است. دوم اینکه برای استفاده از آن‌ها باید همانند رنگ کاری بدنه جت‌ها را به‌گونه‌ای پوشش دهند که هیچ‌گونه حبابی در آن‌ها وجود نداشته باشد و ضخامت آن در تمام نواحی بدنه به‌گونه‌ای باشد که آیرودینامیک جت را با مشکل روبه‌رو نسازد [۸]. روش حذف فعال نیز یکی دیگر از روش‌های ارائه‌شده برای کاهش سطح مقطع راداری است. در این روش بر روی هواپیما یک گیرنده رادیویی وجود دارد که سیگنال ارسالی از رادار را دریافت و آن را تجزیه و تحلیل می‌کند تا سیگنالی با فاز ۱۸۰ درجه و دامنه یکسان نسبت به سیگنال رادار ارسال کند و آن را از طریق تداخل مخرب حذف کند [۹]. اما آخرین روش برای کاهش سطح مقطع راداری استفاده از ساختارهای جاذب راداری^۲ است. این ساختارها دارای ضریب شکست مختلط هستند که بخش موهومی آن‌ها امواج را میرا می‌کند. این ساختارها متناسب با کاربرد مورد نظر برای یک محدوده فرکانسی مشخص، دارای جذب پهن باند یا باند باریک خواهند بود و می‌توانند به‌گونه‌ای طراحی شوند که مقدار جذب در آن‌ها از قطبش‌های موج فرودی مستقل باشد [۱۰]. مشهورترین ساختارهای جاذب مایکروویو صفحات سالیسبوری، جامان و فرامواد است. صفحات سالیسبوری ساده‌ترین جاذب رزونانسی هستند که در آن‌ها یک دی‌الکتریک با ضخامت $\frac{1}{4}$ طول موج فرودی روی یک صفحه رسانا قرار دارد. این صفحات دارای یک جذب باند باریک اطراف فرکانس رزونانس هستند. اگر از این صفحات به‌صورت لایه‌ای استفاده شود در این صورت جاذبی پهن باند تولید خواهد شد که به آن جاذب‌های جامان گویند. این جاذب‌ها به دلیل ضخامت نامناسب، وزن بالا، مقاومت مکانیکی اندک و دیگر نارسایی‌ها برای کاهش سطح مقطع راداری توسعه اندکی یافتند [۱۱]. در نهایت در این سال‌ها با پیشرفت در تولید ساختارهای میلی‌متری، میکرونی و نانویی دسته‌ای از مواد تحت عنوان فرامواد معرفی شده است که از محدودیت‌های ذاتی

می‌دهد. بر اساس این شکل کاملاً مشخص است که توان بازتابی از هدف به رادار با افزایش فاصله هدف از رادار کاهش خواهد یافت. هر رادار قادر به کشف یک توان کمینه S_{min} در بیشینه فاصله R_{max} است [۵].



شکل (۱): نمودار توان بازتاب یافته به رادار برحسب فاصله هدف [۵]

بیشینه محدوده‌ای که رادار در آنجا قدرت آشکارسازی اهداف را دارد از رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G_t \sigma A_{eff}}{(4\pi)^2 S_{min}} \right)^{1/4} \quad (3)$$

بر اساس این رابطه اگر سطح مقطع راداری یک هدف به ۰/۱ مقدار اولیه آن کاهش یابد در این صورت بیشینه محدوده قابلیت کشف رادار تقریباً ۴۴٪ کاهش خواهد یافت [۵]؛ لذا توان تخریبی هدف به دلیل نزدیکی بیشتر به اهداف مورد نظر بالاتر خواهد رفت. سطح مقطع راداری یک ویژگی است که در آن اندازه اهداف، شکل و موادی که در ساخت اهداف استفاده شده است در تعیین نسبت توان فرودی به توان بازتابی نقش به‌سزایی دارد. فناوری رادار گریزی بر اساس روش‌های کاهش سطح مقطع راداری به چهار دسته شکل‌دهی هدف، حذف فعال، حذف غیرفعال و پوشش هدف با مواد جاذب تقسیم می‌شوند [۶]. در دهه ۱۹۶۰ الی اواسط ۱۹۷۰ از پنل‌های تخت رسانا با صفحات شکسته برای تولید اولین جت‌های جنگنده رادار گریز F117-A و Have Blue استفاده کردند و موفق شدند با استفاده از فناوری شکل‌دهی هدف، امواج پراکنده‌شده را در جهتی غیر از جهت آنتن گیرنده رادار بازتاب دهند. استفاده از این روش برای کاهش سطح مقطع راداری با دو محدودیت مهم روبه‌رو بود. اولاً این‌که جت‌ها آیرودینامیک ضعیفی داشتند و در مانورهای هوایی از چالاک‌ی مناسبی برخوردار نبودند. ثانیاً آن‌ها توسط سامانه‌های راداری بی‌استاتیک آشکارسازی و رهگیری می‌شدند [۷]. لذا محققان برای رفع این محدودیت‌ها از کامپوزیت‌های نارسانا برای رادار گریزی پرنده‌ها استفاده کردند. از این کامپوزیت‌ها در ساخت جت‌های B2 و F22 استفاده شده است. مقدار سیگنالی که از مواد کامپوزیتی بازتاب می‌شود به جنس کامپوزیت، فرکانس کار، زاویه

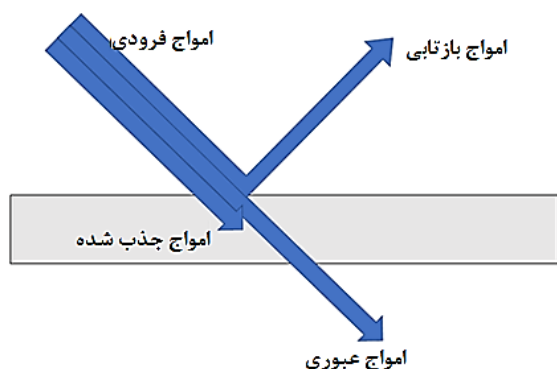
^۱ Radar Absorbing Materials (RAM)

^۲ Radar Absorbing structures (RAS)

فرامواد جاذب ارائه شده است. در تئوری خط انتقال و مدارهای معادل هر قسمت از سازه جاذب با یک مدار معادل می‌شود که به منظور جذب باید امپدانس امواج فرودی با امپدانس مدار تطابق داشته باشد. در این تئوری یکی از چالش‌ها انتخاب مدار میکروالکترونیکی معادل با سلول دوره‌ای فراماده است که بر اساس آن نتایج تئوری و تجربی جذب سازه تقریباً یکسان باشد. همچنین این تئوری در فرکانس‌های بالا به دلیل جفت‌شدگی القایی میان صفحات فلزی ناکارآمد خواهد بود و از آن برای تحلیل جذب در تابش‌های مایل امواج نمی‌توان بهره برد [۱۵]. در تئوری تداخل ارتباط میان صفحات فلزی به کاررفته در سازه فراماده جاذب تنها از طریق بازتاب‌های چندگانه برقرار می‌شود و از اثر الکترومغناطیسی صفحات صرف‌نظر می‌گردد. این تئوری برای تحلیل فرایند جذب باند باریک مناسب‌تر است [۱۶]. بر این اساس تئوری تطبیق امپدانس به‌عنوان روشی مرسوم با محدودیت‌های کمتر و دیدگاه فیزیکی بیشتر در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس شکل (۲) در اندرکنش امواج الکترومغناطیسی با مواد سه حالت بازتاب، عبور و جذب ممکن است رخ بدهد که رابطه (۳) برای آن قابل تصور است:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $A(\omega)$ مقدار جذب، $R(\omega)$ مقدار بازتاب و $T(\omega)$ مقدار عبور است [۱۷]. بیشینه مقدار جذب زمانی حاصل می‌شود که در گام اول مانع از بازتاب امواج از مرز میان دو محیط شویم و در گام دوم مانع از عبور امواج فیلتر شده به خارج از ساختار شویم. برای یافتن شرط کمینه بازتاب باید به سراغ معادلات فرنل رفت.



شکل (۲): اندرکنش امواج الکترومغناطیسی با مواد

شکل (۳) موج فرودی به مرز میان دو محیط با ویژگی‌های الکترومغناطیسی متفاوت را در قطبش TE نشان می‌دهد.

مواد طبیعی خواهند کاست. این مواد را فرامواد^۱ نام‌گذاری کرده‌اند. فرامواد موادی مصنوعی است که هدف از ساخت آن‌ها ایجاد ویژگی‌ای است که در مواد طبیعی وجود ندارد. فراماده‌ها به سه دسته فرامواد مکانیکی، آکوستیکی و الکترومغناطیسی دسته‌بندی می‌شوند. در این مقاله بر روی فرامواد الکترومغناطیسی متمرکز خواهیم بود. فرامواد الکترومغناطیسی موادی مصنوعی هستند که برای مهندسی امواج الکترومغناطیسی در اندازه کوچک‌تر از طول موج فرودی ساخته می‌شوند و هدف از ساخت آن‌ها ایجاد ویژگی‌ای معین است که در مواد طبیعی وجود ندارد. از آن‌ها در ساخت عدسی‌های کامل، فیلترها، جاذب‌ها، آنتن‌ها، دوربین‌های حرارتی و غیره استفاده می‌شود. اولین بار در سال ۱۹۶۸ ویکتور وسلایگو فیزیکدان روسی با فرض منفی بودن گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی به بازنویسی معادلات فرنل پرداخت و به موادی با ضریب شکست منفی دست یافت. سپس در سال ۱۹۹۶ ژان پندری با ساختارهای سیمی جدا^۲ موفق به تولید محیط با گذردهی الکتریکی منفی شد و در سال ۲۰۰۴ دیوید اسمیت با معرفی ساختار شکاف-حلقه^۳ گام نهایی را در تولید ساختاری با ضریب شکست منفی برداشت [۱۲]. فرامواد الکترومغناطیسی بنا به کاربرد دارای ویژگی‌های ضریب شکست منفی، پیروی از قاعده دست چپ در انتشار امواج، تابش چرنکوف معکوس و اثر داپلر معکوس هستند [۱۳]. اولین فراماده جاذب در سال ۲۰۰۸ توسط لندی و همکارانش برای ناحیه فرکانسی باند x (۸ الی ۱۲ گیگاهرتز) طراحی و تولید گشت که در فرکانس ۱۱/۶۵ گیگاهرتز جذب تئوری و تجربی ۹۹ و ۸۸ درصد را دارا بود. این سازه جاذب از سه قسمت تشکیل شده بود. قسمت اول آن یک الگوی فلزی با هندسه مشخص بود که روی یک لایه دی‌الکتریک قرار گرفته بود و این دو روی یک نوار فلزی زمینه قرار گرفته بودند [۱۴]. مقدار جذب این جاذب به قطبش و زاویه فرودی امواج وابسته بود که در کاربردهای عملیاتی محدودیتی مهم به شمار می‌رفت؛ لذا در این مقاله ساختاری جدید با پهنای جذبی مناسب طراحی و شبیه‌سازی می‌گردد که علاوه بر نازک و سبک بودن، مقدار جذب آن تقریباً مستقل از قطبش موج فرودی است و جذب حداقلی ۰/۵۵ و حداکثر ۰/۹۹۹ را دارا است که استفاده از آن منجر به کاهش سطح مقطع راداری اجسام می‌شود.

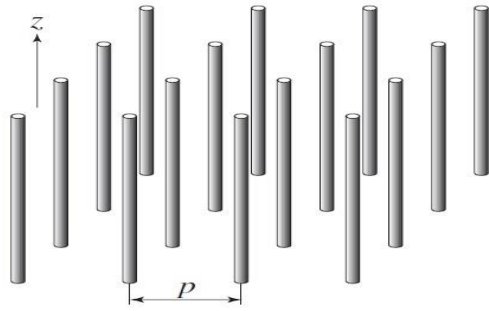
۲. تحلیل فرایند جذب در فرامواد جاذب

تاکنون سه روش تئوری تطبیق امپدانس، تئوری خط انتقال و مدارهای معادل و تئوری تداخل برای تحلیل فرایند جذب در

¹ Metamaterials

² Cut Wire Structure

³ Split Ring Resonator



شکل (۴): ساختار سیمی پندری [۲۱ و ۲۲]

بر اساس مدل درود رابطه گذردهی الکتریکی برای این ساختار به صورت رابطه (۷) است [۲۳ و ۲۴]:

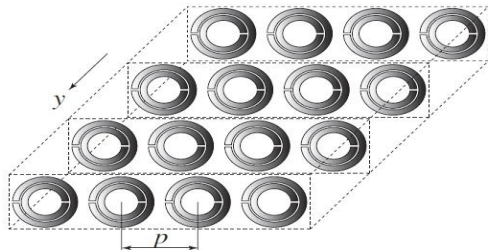
$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \gamma^2} + i \frac{\gamma \omega_{pe}^2}{(\omega^2 + \gamma^2) \omega} \quad (7)$$

در این رابطه فرکانس پلاسمای $\omega_{pe} = \sqrt{\frac{2\pi c^2}{p^2 \ln(p/a)}}$

الکترونی است که c سرعت موج در خلأ، p فاصله سیم‌ها از یکدیگر، a شعاع سیم‌ها و γ عامل اتلاف است که از رابطه

$$\gamma = \frac{\epsilon_0 \left(\frac{p\omega_{pe}}{a}\right)^2}{\pi \sigma}$$

در این رابطه σ رسانایی الکتریکی فلز است. نوسانگرهای شکاف- حلقه اسمیت در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): نوسانگرهای شکاف- حلقه اسمیت [۲۱ و ۲۲]

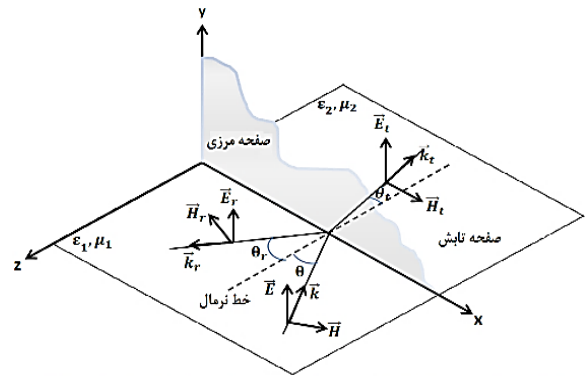
برای این ساختار با استفاده از مدل لورنتز تراوایی مغناطیسی به صورت رابطه (۸) خواهد بود [۲۱ و ۲۵]:

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_{om}^2 + i\omega\gamma} \quad (8)$$

در این رابطه $F = \pi \left(\frac{a}{p}\right)^2$

$$\omega_{om} = c \left(\frac{3p}{\pi \ln\left(\frac{2wa^3}{\delta}\right)} \right)^{0.5}$$

و عامل اتلاف به صورت $\gamma = \frac{2pR}{a\mu_0}$ است که در آن p ثابت شبکه a شعاع داخلی ساختارهای سیمی پندری نشان داده شده است.



شکل (۳): موج فرودی به مرز میان دو محیط در قطبش TE [۱۸]

مقدار بازتاب برای این قطبش از رابطه (۴) به دست می‌آید [۱۹]:

$$R_s = \left| \frac{\mu_2 K_{1z} - \mu_1 K_{2z}}{\mu_2 K_{1z} + \mu_1 K_{2z}} \right|^2 \quad (4)$$

در این رابطه μ_1 و μ_2 تراوایی مغناطیسی محیط اول و دوم است. همچنین $K_{2z} = K_2 \cos \theta_t$ و $K_{1z} = K_1 \cos \theta_i$ انتشار موج در راستای محور Z ها در محیط اول و دوم است. مقدار بازتاب برای قطبش TM از رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۹]:

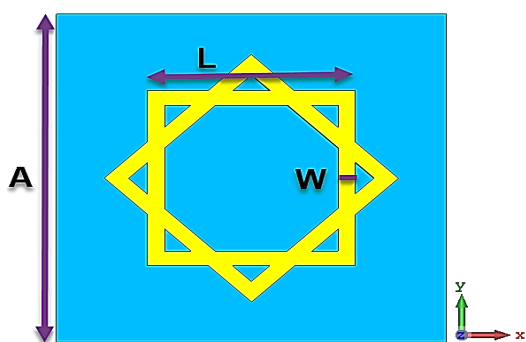
$$R_p = \left| \frac{\epsilon_1 K_{2z} - \epsilon_2 K_{1z}}{\epsilon_1 K_{2z} + \epsilon_2 K_{1z}} \right|^2 \quad (5)$$

در این رابطه ϵ_1 و ϵ_2 گذردهی الکتریکی محیط اول و دوم است. با اندکی محاسبه شرط کمینه بازتاب با فرض اینکه زاویه فرودی امواج $\theta = 0^\circ$ باشد از روابط (۴) و (۵) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$(6)$$

$$\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}}$$

این رابطه بیان می‌کند که کمینه بازتاب از مرز میان دو محیط با ویژگی الکترومغناطیسی متفاوت زمانی حاصل می‌شود که امپدانس محیط اول با امپدانس محیط دوم برابر باشد که به آن شرط تئوری کمینه بازتاب گویند [۱۹]. برای کمینه کردن بازتاب از سازه فراماده جاذب باید امپدانس سازه جاذب با امپدانس فضای آزاد که ۳۷۷ اهم است برابر باشد [۲۰]. برای برقراری این شرط به صورت تجربی باید به اندرکنش امواج با مواد رسانا بر اساس مدل درود- لورنتز پردازیم. در شکل (۴) ساختارهای سیمی پندری نشان داده شده است.



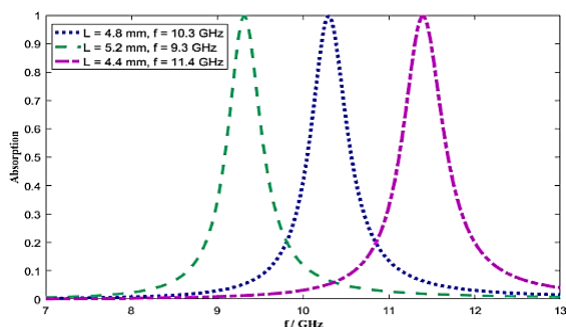
شکل (۶): سازه جاذب پیشنهادی

ابعاد این سازه در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): ابعاد سازه جاذب پیشنهادی

A	L	W	X
۹ mm	۴/۸ mm	۴۰۰ μm	۵۰۰ μm

در این جدول، A ابعاد سلول واحد، L و W اندازه و پهنای ستاره هشت‌پر و X ضخامت لایه دی‌الکتریک است. مقدار جذب این سازه در فرکانس ۱۰/۳ گیگاهرتز ۱۰۰ درصد با تمام پهنای نیمه بیشینه ۰/۳ گیگاهرتز است. با تغییر اندازه ستاره هشت‌پر بیشینه فرکانس جذب به دیگر فرکانس‌ها انتقال می‌یابد. شکل (۷) این موضوع را نشان می‌دهد. با اعمال این تغییرات ستاره هشت‌پر با اندازه ۴/۴ و ۵/۲ میلی‌متر به ترتیب در فرکانس‌های ۱۱/۴ و ۹/۳ گیگاهرتز دارای جذب کامل هستند. برای رسیدن به جذب پهن باند باید ستاره‌های هشت‌پر با ابعاد متفاوت را کنار و پشت سر هم قرار داد. به دلیل اینکه استفاده پشت سر هم از این سازه‌ها ضخامت نهایی سازه جاذب با جذب پهن‌باند را نامناسب می‌کند در این مقاله ۱۵ سازه با مقیاس متفاوت ستاره هشت‌پر در ۳ ردیف و ۵ سطر کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و ساختار جاذب ما را به وجود آورده‌اند. شکل (۸) این جاذب پهن‌باند را نشان می‌دهد. مقیاس‌های به کاررفته در طراحی جاذب پیشنهادی در جدول (۲) آمده است.



شکل (۷): نمودار جذب سازه در ابعاد متفاوت ستاره هشت‌پر

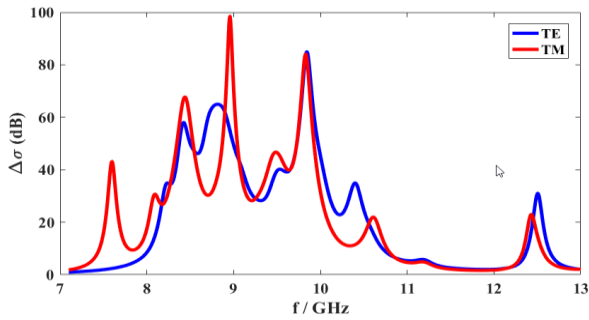
حلقه کوچک‌تر، w پهنای حلقه‌ها، d فاصله میان حلقه‌ها و R مقاومت واحد طول و δ فاصله شعاعی میان حلقه‌ها است [۲۱]. بر اساس روابط ۷ و ۸ می‌توان دریافت که با تغییر پارامترهای هندسی ساختار سیمی و شکاف حلقه می‌توان گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی سازه را به‌گونه‌ای مهندسی کرد که تطبیق امپدانس به صورت تجربی برقرار شود و کمینه بازتاب حاصل شود. حال که بازتاب کمینه گردید باید عبور امواج را نیز کمینه کنیم تا از این طریق بیشینه جذب حاصل شود. برای کمینه کردن عبور از یک دی‌الکتریک استفاده می‌کنیم که ثابت انتشار امواج در آن به صورت $K = K_R + iK_I$ است. بخش الکتریکی موج فرودی در این دی‌الکتریک به صورت $E = E_0 e^{i(Kz - \omega t)}$ است که با ساده‌سازی آن به رابطه (۹) خواهیم رسید:

$$E = E_0 e^{i(K_R z - \omega t)} e^{-K_I z} \quad (9)$$

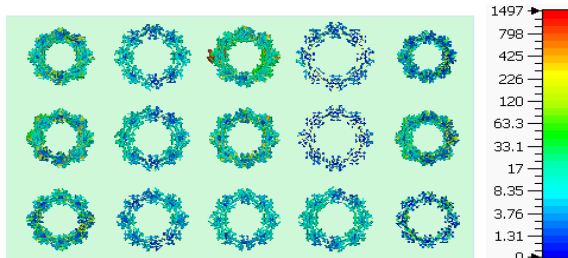
جزء اول این رابطه یک تابع نمایی است که انتشار امواج تخت را با عدد موج K_R در راستای محور z ها نشان می‌دهد و جزء دوم آن یک تابع نمایی است که نشان می‌دهد موج الکتریکی همراه با انتشار در محیط به سمت میرایی می‌رود. لذا اگر در سازه فراماده جاذب از یک دی‌الکتریک با ضریب شکست مختلط استفاده گردد امواج فیلتر شده میرا خواهند شد و از ساختار خارج نمی‌شوند. همچنین در پشت لایه دی‌الکتریک از یک صفحه فلزی زمینه به‌عنوان آینه امواج مایکروویو استفاده می‌شود تا در صورت لزوم امواج عبور کرده از دی‌الکتریک مجدداً به درون سازه بازتاب و جذب شوند [۲۶].

۳. طراحی و شبیه‌سازی سازه جاذب

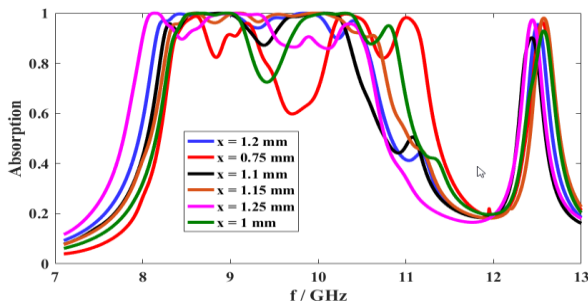
در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار CST ساختاری جاذب طراحی و شبیه‌سازی می‌شود که از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول آن الگوی دوره‌ای با هندسه ستاره هشت‌پر از جنس مس با رسانندگی $\frac{S}{m} = 5.8 \times 10^7$ و ضخامت $T = 100$ میکرون پیشنهاد شده است. قسمت دوم آن از دی‌الکتریک FR-4 با گذردهی الکتریکی ۴/۳ F/m، تراوایی مغناطیسی ۱ H/m و تانژانت اتلاف ۰/۰۲۵ تشکیل شده که روی صفحه یکپارچه مسی به‌عنوان جزء سوم سازه جاذب قرار گرفته است. شکل (۶) این ساختار را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): کاهش سطح مقطع راداری در قطبش TE و TM



شکل (۱۱): چگالی جریان در ستاره هشت‌پر

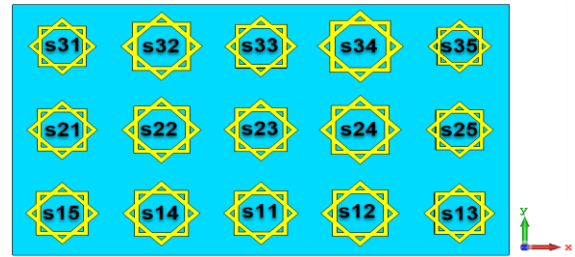


شکل (۱۲): جذب سازه در ضخامت‌های متفاوت دی‌الکتریک

از میان ضخامت‌های متفاوت، سازه با ضخامت دی‌الکتریک ۱/۲ میلی‌متر دارای جذب مؤثرتری است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش تطبیق امپدانس برای تحلیل فرایند جذب در فرامواد جذب استفاده شده است. بر اساس این روش جذب بیشینه در یک فرکانس یا در یک بازه فرکانسی زمانی رخ خواهد داد که امپدانس الگوی دوره‌ای با امپدانس فضای آزاد یکسان شود. در این صورت امواج معین وارد ساختار می‌شوند و توسط لایه دی‌الکتریک اتلاف‌گر به گرما تبدیل می‌شوند و به دام خواهند افتاد. با تغییر هندسه الگوی دوره‌ای، اندازه آن و ضخامت لایه دی‌الکتریک بیشینه فرکانس جذب به دیگر فرکانس‌ها انتقال می‌یابد. در این مقاله سازه‌ای جذب طراحی شد که از هندسه ساده و جدیدی برخوردار است که در بازه فرکانسی ۸/۱ تا ۱۰ گیگاهرتز دارای جذب حداقلی ۰/۵۵ و حداکثر ۰/۹۹۹ است و مقدار جذب آن در قطبش‌های TE و TM امواج فرودی مناسب بود. همچنین این سازه در بازه مذکور حداقل ۲ و حداکثر ۸۰



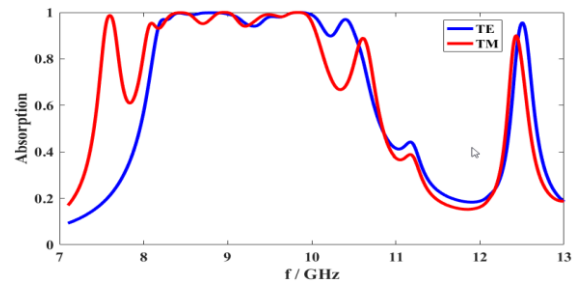
شکل (۱۸): آرایه ۳ × ۵ فراماده جذب پهن‌بند

جدول (۲): مقیاس آرایه‌های جذب پهن‌بند

$S_{11} = 1$	$S_{12} = 1/0.5$	$S_{13} = 0.95$	$S_{14} = 1/0.3$	$S_{15} = 0.98$
$S_{21} = 0.94$	$S_{22} = 1/0.6$	$S_{23} = 0.99$	$S_{24} = 1/1$	$S_{25} = 0.90$
$S_{31} = 0.91$	$S_{32} = 1/0.9$	$S_{33} = 0.97$	$S_{34} = 1/1.5$	$S_{35} = 0.85$

نمودار جذب سازه در قطبش TE و TM با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر لایه دی‌الکتریک در شکل (۹) نشان داده شده است. بر اساس این نمودار مشخص است که سازه پیشنهادی در بازه فرکانس ۸/۱ تا ۱۰ گیگاهرتز دارای حداقل مقدار جذب ۰/۵۵ و حداکثر ۰/۹۹۹ است. از رابطه زیر می‌توان مقدار کاهش سطح مقطع راداری بر حسب دسی‌بل ($\Delta\sigma$) را برای این جذب به‌دست آورد [۲۷].

$$\Delta\sigma = -10 \log(1 - A) \text{ dB} \quad (10)$$



شکل (۹): نمودار جذب سازه در قطبش‌های TE و TM

به‌عنوان مثال اگر جسم هدف با ماده‌ای جذب با جذب ۵۰ درصد پوشانده شده باشد در این صورت مقدار کاهش سطح مقطع راداری تنها ۳ دسی‌بل و در صورتی که ضریب جذب ۹۰ درصد باشد مقدار کاهش سطح مقطع راداری، ۱۰ دسی‌بل خواهد بود. شکل (۱۰) نمودار کاهش سطح مقطع راداری را برای جذب پیشنهادی نشان می‌دهد. شکل (۱۱) نمودار چگالی جریان را در ستاره هشت‌پر در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که کدام قسمت از آرایه فلزی بیشترین جفت‌شدگی را با امواج فرودی داشته است و از آن می‌توان دریافت که کدام قسمت در میزان جذب سازه مؤثر است. جذب سازه در ضخامت‌های متفاوت لایه دی‌الکتریک در شکل (۱۲) آمده است.

- [13] Liu, Y. and X. Zhang, "Metamaterials: a new frontier of science and technology", *Chemical Society Reviews*, vol. 40, no. 5, pp. 2494-2507, 2011.
- [14] Landy, N.I., et al., "Perfect metamaterial absorber", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 20, pp. 207402-5, 2008.
- [15] Wen, Q.-Y., et al., "Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band", *Opt. Exp.*, vol. 17, no. 22, pp. 20256-20265, 2009
- [16] Chen, H.-T., "Interference theory of metamaterial perfect absorbers", *Opt. Exp.*, vol. 20, no. 7, pp. 7165-7172, 2012.
- [17] Sabah, C., et al., "Polarization-insensitive FSS-based perfect metamaterial absorbers for GHz and THz frequencies", *Radio Science*, 2014. 49(4): p. 306-314.
- [18] Lvovsky, A.I., "Fresnel equations, in *Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering*", Five Volume, CRC Press, 2015.
- [19] Watts, C.M., X. Liu, and W.J. Padilla, "Metamaterial electromagnetic wave absorbers", *Advanced materials*, vol. 24, no. 23, pp. 98-120, 2012.
- [20] Sun, L., et al., "Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface", *Opt. Exp.*, vol. 20, no. 4, pp. 4675-4680, 2012.
- [21] Tedeschi, N. "Brief introduction to metamaterials", <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/509220>, 2014.
- [22] Christophe Caloz, T.I., "Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications: The Engineering Approach", John Wiley, 2005.
- [23] Pendry, J.B., et al., "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 25, pp. 4773, 1996.
- [24] Pendry, J.B., et al., "Low frequency plasmons in thin-wire structures", *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 10, no. 22, pp. 4785, 1998.
- [25] Pendry, J.B., et al., "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-208, 1999.
- [26] *Advanced Electromagnetism; Electromagnetic Waves in Dielectric Medium*, University of Liverpool.
- [27] Yang, H., et al., "Low RCS metamaterial absorber and extending bandwidth based on electromagnetic resonances", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 33, pp. 31-44, 2013.

دسی‌بل سطح مقطع راداری را کاهش خواهد داد که قابلیت کشف و رهگیری اهداف در فاصله کمتری از سامانه‌های راداری امکان‌پذیر است. این سازه دارای ابعاد $۱/۴ \times ۲۷ \times ۴۵$ میلی‌متر مکعب است که مناسب و سبک‌وزن است و استفاده از آن محدودیت‌های کمتری را در آپرودینامیک، چالاکتی، تعمیر و نگهداری و ... اجسام پرنده ایجاد خواهد کرد.

۴. مراجع

- [1] Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung, " *Microwave remote sensing: Active and passive*", Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1981.
- [2] Burkholder, R., L. Gupta, and J. Johnson, "Comparison of monostatic and bistatic radar images", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, 3, pp. 41-50, 2003.
- [3] Skolnik, M.I., *Radar handbook* (2nd ed.). Mc Graw Hill, ed. n. ed.), New York, USA, 1990.
- [4] Jenn, D.C., "Radar and laser cross section engineering", AIAA Education Series, Washington, DC, USA, 1995.
- [5] Jeff Scott, R.C.S., "Reference for Aviation, Space, Design", <http://www.aerospaceweb.org>.
- [6] Hema Singh, R.M.J., "Active Radar Cross Section Reduction, Theory and Applications", Cambridge University Press, 1st Edition, 2015.
- [7] Piccirillo, A.C., "The Have Blue Technology Demonstrator and Radar Cross Section Reduction", *SAE Technical Paper 965538*, pp. 1-15, 1996.
- [8] Ahmad, H., et al., "Stealth technology: Methods and composite materials, a review", *Polymer Composites*, pp. 1-16, 2019.
- [9] Osman, I.A. and A.A.J. Alzebaidi, "Active cancellation system for radar cross section reduction", *International Journal of Education and Research*, vol. 1, no. 7, pp. 1-6, 2013.
- [10] Singh, H., H.S. Rawat, and R. George, "Design of Radar Absorbing Structure, in *Fundamentals of EM Design of Radar Absorbing Structures (RAS)*", Springer, 2018.
- [11] Fang, X., C. Zhao, and H. Bao, "Design and analysis of Salisbury screens and Jaumann absorbers for solar radiation absorption", *Frontiers in Energy*, vol. 12, pp. 158-168, 2018.
- [12] D. Zarifi, A.F., M. Soleymani, "Extraction of Electromagnetic Parameters of Metamaterials Based on the State Space Approach" *Applied Electromagnetics (In Persian)*, Vol. 2. No. 2, pp. 1-9, 2015.

A New Light and Broadband Metamaterial Absorber with 1.4 mm Thickness for Reducing the Radar Cross Section of Objects

A. Malakzadeh Fard Khangheshlaghi^{1*}, M. Rezayatfam²

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 02/10/2019; Accepted: 14/06/2020)

Abstract

We have introduced an absorber structure based on metamaterials to reduce the radar cross section of objects. The absorber is a periodic array with a new and relatively simple design which has a thickness of 1.4 mm. The desired structure is analyzed by the impedance matching method. Simulation results using CST software show that this structure has a good absorption in the frequency range of 8.1 to 10 GHz in TE and TM polarizations of the incident waves; which reduces the radar cross-section from a minimum value of 2dB to a maximum value of 80dB. The proposed absorber structure has the appropriate thickness, size and weight and so using it will improve the radar cross-section reduction of objects, making them stealth.

Keywords: Metamaterial, Absorber, Radar Cross Section, Stealth

* Corresponding author E-mail: afard77@gmail.com