بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

شبیه‌سازی بلوک‌های ساختاری فراماواد چپگرد

زهرا زارعی و تهمینه جلالی

گروه فیزیک دانشگاه خلیج فارس، بوشهر۷۵۱۶۹

چکیده – فراماواد به‌دلیل پتانسیل گسترده خود در کاربردهای مختلف، یکی از مهم‌ترین موضوعات اخیر در زمینه‌های مختلفی از علم و تکنولوی هستند. این‌ها موادی مصنوعی هستند که گذردهی الکتریکی و/یا تراوایی مغناطیسی منفی را نشان می‌دهند. بلوک‌های ساختاری فراماواد، ساختارهای دوره‌ای مصنوعی ساخته شده با ثابت شبکه کوچکتر از طول موج تابشی هستند. بنابراین خصوصیات فرا-مواد با طراحی بلوک‌های ساختمان آن‌ها کنترل می‌شود. معمول‌ترین بلوک‌های ساختمانی فراماواد، تشدیدگرهای حلقه مجزا هستند. در این مقاله، ساختار تشدیدگر حلقه مجزا، که شامل حلقه‌ای از جنس طلا با یک شکاف در ساختار آن و بر روی زیرلایه‌ای از شیشه سیلیکا می‌باشد، با استفاده از روش المان متناهی و برای رسیدن به تراوایی مغناطیسی منفی که به‌طور معمول در طبیعت یافت نمی‌شود، شبیه-سازی می‌شود.

کلید واژه- تشدیدگر حلقه مجزا، چپگرد، روش المان متناهی، فراماده.

Simulation of Left Handed Materials Building Blocks

Zahra Zarei, Tahmineh Jalali

Persian Gulf University, Bushehr 75169

Abstract- Metamaterials are artificially fabricated materials which exhibit negative permittivity and/or negative permeability. The building blocks of metamaterials are fabricated periodic structures of having lattice constants smaller than the wavelength of the incident radiation. Thus metamaterial properties can be controlled by the design of their building blocks. Most common building blocks of metamaterials are Split Ring Resonators (SRR). In this paper, we simulate a SRR structure that made of a ring of gold with a split in that structure on a substrate of Silica glass using finite element method. The obtained results are shown negative magnetic permeability in design structure which is not available in nature.
Keyword- Finite element method, Left handed, Metamaterials, Split Ring Resonators.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

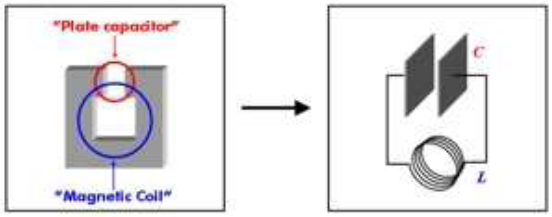
فراموادساختارهایی مصنوعی هستند که با قرار دادن اجزایی خاص مانند ساختارهای دوره‌ای در یک محیط میزبان ساخته می‌شوند. این مواد خصوصیات منحصربفردی نظیر گذردهی الکتریکی منفی و/یا تراوایی مغناطیسی منفی دارند، که در مواد به‌طور طبیعی دیده نمی‌شود و مباحث جدیدی را در فوتونیک باز می‌کند. اگر فراموادهر دو پارامترهای منفی را به‌طور همزمان داشته باشند، ضریب شکست موثر منفی را نشان می‌دهند. این مواد که خصوصیات فیزیکی خود را بیشتر از ساختارشان و کمتر از مواد سازنده خود می‌گیرند، مواد چپگرد یا وسالگو نامیده می‌شوند. علت چپگرد نامیده شدن آن‌ها این است که در این مواد، بردارهای میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و بردار موج یک دستگاه مختصات چپگرد را تشکیل می‌دهند. سرعت فاز و سرعت گروه در این مواد موازی با یکدیگر نیستند، بدین معنا که راستای انتشار با توجه به راستای شارش انرژی معکوس می‌شود. این مفهوم ابتدا به‌صورت تئوری توسط وسالگو در سال ۱۹۶۸ تحلیل شد. وی خواص اپتیکی مختلفی از ساختارهای با ضریب شکست منفی را مورد مطالعه قرار داد. اما این مواد از لحاظ آزمایشگاهی، تنها هنگامی که جان.پندری در سال ۱۹۹۷ یک آرایه از تشدیدگرهای حلقه‌ای مجزا و سیم‌های فلزی نازک دوره‌ای را طراحی کرد، تحقق یافت. فراموادهای ساختاری مصنوعی ساخته شده‌اند. یکی از بلوک‌های ساختاری فراموادها، تشدیدگر حلقه مجزا (SRR) است. این تشدیدگر، حلقه‌ای فلزی با شکافی در ساختار آن می‌باشد[۱]. آرایه‌ای از این تشدیدگرها برای نشان دادن μ_{eff} منفی، در بسامدهای نزدیک به بسامد تشدید مغناطیسی(ω_n) ساختار SRR، به کار می‌روند.

سیم‌های فلزی نازک دوره‌ای به‌عنوان محیط با ε_{eff} منفی، به‌دلیل منفی بودن گذردهی دی‌الکتریک زیر بسامد پلاسما، به‌کار می‌روند. داشتن گذردهی الکتریکی منفی یک چالش نیست، به این دلیل که در برخی مواد مانند فلزات یافت می‌شود. اما μ_{eff} منفی را با SRRها ایجاد می‌کنیم. بنابراین فراموادمبتنی بر فلزات، می‌توانند در رسیدن به ضریب شکت منفی به ما کمک کنند. مواد چپگرد برای ساخت لنزهای کامل مورد استفاده قرار می‌گیرند[۲]. علاوه بر آن برای بسیاری از کاربردهای میکروموجی و اپتیکی مانند پوشانه‌های آنتنی، تعدیل کننده‌ها و ... استفاده می‌شوند.

در این مقاله ساختاری SRR را برای به‌دست آوردن تراوایی منفی شبیه‌سازی کرده‌ایم. ابتدا تئوری ساختار را با توجه به پارامترهای هندسی و فیزیکی آن بررسی نموده‌ایم. سپس به بحث در مورد روش المان متناهی پرداخته‌ایم. در ادامه چیدمان شبیه‌سازی و بحث و بررسی نتایج آمده است.

۲- فیزیک SRR ها

همان‌طور که گفته شد، SRRها حلقه‌های فلزی ساخته از فلز با یک شکاف ایجاد شده در ساختارشان هستند. هر گاه جریان در سیم‌پیچ به گردش در آید، یک ممان دوقطبی مغناطیسی خواهیم داشت، که بردار ممان دوقطبی مغناطیسی، عمود بر صفحه سیم‌پیچ است. ترکیب سیم‌پیچ با خازن تخت به ما مدار LC، و بنابراین ممان دوقطبی افزایشی در تشدید آن، می‌دهد. SRRها با توجه به شکل (۱)، شبیه به مدار LC ذکر شده رفتار می‌کنند. حلقه فلزی مانند یک سیم‌پیچ (خودالقای L) و شکاف درون حلقه مانند یک خازن با صفحات موازی (ظرفیت C) عمل می‌کنند.



شکل ۱: تناظر مدار LC و ساختار SRR.

می‌توان به بسامد تشدید LC در SRR رسید، که موقعیت این بسامد تشدید می‌تواند با استفاده از فرمول اساسی ظرفیت C و خودالقای L و جایگزین کردن آن با پارامترهای هندسی SRR محاسبه شود.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{D} \qquad L = \mu_0 \frac{coil.area}{length} \qquad (۱)$$

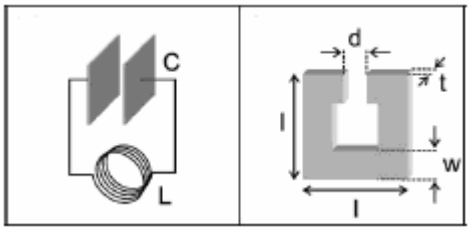
که A مساحت خازن، D فاصله بین صفحات و ε_r گذردهی نسبی دی‌الکتریک موجود بین صفحات است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

حال ظرفیت C و خودالقای L بر اساس پارامترهای هندسی SRR به‌صورت زیر است:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{wt}{d} \qquad L = \mu_0 \frac{l^2}{t} \qquad (۲)$$

پارامترهای هندسی با شکل زیر مشخص می‌شوند:



شکل ۲: پارامترهای هندسی SRR.

بسامد تشدید LC به‌صورت زیر داده می‌شود:

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{l}\frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_r}}\sqrt{\frac{d}{w}} \qquad (۳)$$

معادله ۵ نشان می‌دهد که بسامد تشدید به‌طور معکوس با ابعاد SRR متناسب است. اگر در حلقه شکافی نباشد، یعنی d=0، ظرفیت بی‌نهایت خواهد شد و هیچ تشدیدی نخواهیم داشت. بنابراین ایجاد شکاف برای داشتن یک اثر خازنی ضروری است. به اضافه شرط بالا، دو شرط دیگر نیز وجود دارد: ۱)مولفه‌ای از میدان الکتریکی نور عمود بر صفحات خازن(سطوح شکاف) باشد. ۲)بردار میدان مغناطیسی عمود بر صفحه SRR باشد. هرگاه شرط دوم برآورده شود، جریانی در سیم‌پیچ بوجود می‌آید، که میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند که با میدان مغناطیسی خارجی مقابله کرده و منجر به تراوایی مغناطیسی منفی می‌شود.

۳- روش المان متناهی

بدلیل سروکار داشتن کامپیوترها با اعداد گسسته، حل معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی به روش مستقیم غیرممکن است. زیرا کامپیوترها نمی‌توانند با متغیرهای پیوسته کار کنند. باید فضای موردنظر را به المان‌های زیادی تقسیم کنیم. به‌دلیل محدود بودن حجم این المان-ها این روش را روش المان متناهی می‌نامند. این روش، روشی عددی است برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل و نیز حل انتگرال‌ها. اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی است، تا بتوان معادلات را با روش‌های عددی ساده‌تر نظیر روش اویلر حل کرد. مهم‌ترین برتری روش FEM بر دیگر روش‌ها مانند FDTD انعطاف‌پذیری هندسی آن است.

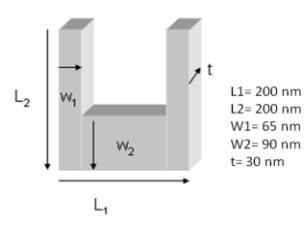
این روش نخستین بار در اوایل قرن بیستم توسط گروهی از محققین بکار گرفته شد و در سال۱۳۲۹/ ۱۹۵۰ برای حل مساله‌ی پیچیده الاستیسیته و مسائل تحلیلی ساختاری در مهندسی عمران توسعه داده شد. به-کار بردن این روش مستلزم سه مرحله اساسی است : ۱) حجم مساله باید به‌صورت بهینه به المان‌هایی تقسیم شود. ۲) معادلات خطی الکتروستاتیکی در محدوده‌های این حجم‌های کوچک بدست آورده شود. ۳) مجموعه بزرگی از معادلات خطی حل شود. تحلیل به روش FEM در ۲،۱ یا ۳ بعد صورت می‌گیرد و فیزیک مساله این را تعیین می‌کند که باید در چند بعد کار کرد. این روش را می‌توان برای اثرات فیزیکی غیر خطی و نیز ساختارهای تشکیل شده از مواد ناهمسانگرد به‌کار برد. معادله‌ای که با استفاده از روش FEM و به‌صورت ویژه مقداری در این مقاله حل می‌شود، بصورت زیر است:

$$\vec{n}\times(\nabla\times\vec{E}) - jk\vec{n}\times(\vec{E}\times\vec{n}) = -\vec{n}\times(\vec{E}_0\times(jk(\vec{n}-\vec{k}_{dir|})))e^{-j\vec{k}_{dir}.\vec{r}} \qquad (۴)$$

۴- چیدمان شبیه‌سازی و بررسی نتایج

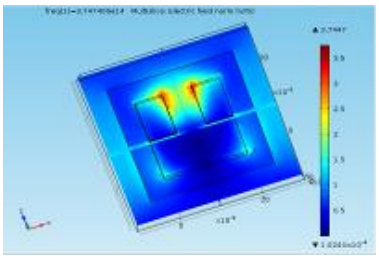
در این مقاله ساختار نوعی از تشدیدگرهای حلقه مجزا (SRR) در سه‌بعد شبیه‌سازی می‌شود. این تشدیدگر شامل حلقه‌ای از جنس طلا است، که در آن یک شکاف ایجاد شده است و بر روی زیرلایه‌ای از شیشه سیلیکا قرار گرفته است. همه مجموعه درون یک جعبه از هوا قرار گرفته است. گذردهی الکتریکی طلا منفی و موهومی برابر ۳۳۶۹/۶+۱۵/۳۹۳i- و گذردهی الکتریکی شیشه سیلیکا ۲/۰۹ می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده در اطراف بسامد تشدید، ما به تراوایی مغناطیسی منفی دست می‌یابیم. پارامترهای هندسی SRR در موقعیت این بسامد تشدید موثر هستند. ابعاد SRR در این شبیه‌سازی بصورت زیر است:

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]



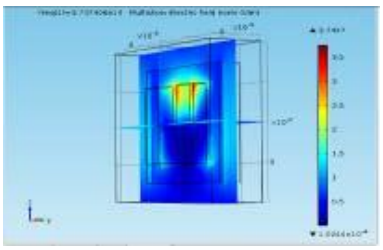
شکل ۳: چیدمان فضای محاسباتی.

شرایط مرزی برای حل مساله، شرط مرزی پراکندگی است. ابتدا هندسه ساختار را مشخص کرده و بعد از آن نوع مواد هر قسمت را تعیین می‌کنیم. بعد از تعیین شرایط مرزی، فضای مساله را مش بندی کرده، یعنی به المان‌هایی مثلثی شکل با اندازه مشخص تقسیم می‌کنیم، و بعد از آن مساله را حل می‌نماییم. موج تخت با طول‌موج ۰/۸ میکرومتر بر ساختار موردنظر فرود می‌آید و میدان الکتریکی در راستای x بر ساختار اعمال می‌کند. عبور میدان از ساختار به‌صورت شکل ۴ می‌باشد:



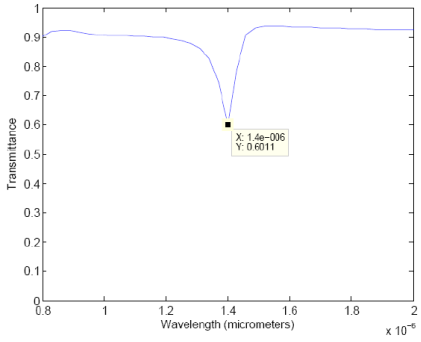
شکل۴: نمایش پروفایل انتشار موج تخت در SRR.

عبور میدان از جهت دیگر به‌شکل زیر می‌باشد:



شکل ۵: نمایش پروفایل انتشار موج تخت از جهت دیگر.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت، تشدید مغناطیسی رخ داده شده، پیداست. با توجه با این‌که ماده تشکیل دهنده SRR شبیه‌سازی شده طلا می‌باشد، بنابراین مقادیر کمیت‌های فیزیکی از جمله تراوایی μ، مربوط به طلا را از داده‌های موجود در بسته نرم‌افزاری کامسول، قرار می‌دهیم. اگر انتگرال چگالی انرژی براساس طول‌موج رسم شود، نموداری به شکل زیر بدست می‌آید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در طول موج ۱/۴میکرومتر پیکی مشاهده می‌کنیم که نشان دهنده تشدید مغناطیسی در این طول موج است. بدین معنی که با شبیه‌سازی تشدیدگر حلقه مجزا، تشدیدی مغناطیسی در ناحیه نزدیک به مادون قرمز به‌دست می‌آوریم.



شکل ۵: نمودار انتگرال چگالی انرژی براساس طول‌موج برای ساختار SRR شبیه‌سازی شده.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله ساختار تشدیدگر حلقه مجزا با ابعاد نانو که بلوک ساختاری یک فراماده است، با استفاده از روش المان متناهی شبیه‌سازی می‌شود. ابتدا با بررسی تناظر بین ظرفیت خازنی و خودالقا با پارامترهای هندسی ساختار، بسامد تشدید مغناطیسی را براساس پارامترهای هندسی به‌دست می‌آوریم. سپس با رسم نمودار انتگرال چگالی انرژی بر اساس طول‌موج یک شیفت در نمودار مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی تشدید مغناطیسی در این طول‌موج یعنی ۱/۴ میکرومتر، نزدیک به مادون قرمز و در نتیجه رسیدن به تراوایی مغناطیسی منفی در این طول‌موج است. بنابراین ابتدا با شبیه‌سازی ساختار SRR با هندسه مشخص می‌توان اطلاعاتی درباره موقعیت بسامد تشدید به‌دست آورد و این می‌تواند نقطه شروعی برای رسیدن به μ منفی و بسیاری کاربردها باشد.

مراجع

[1] Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J., *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*, IEEE Trans. Microw. Theory Tech.,vol. 47, no. 14, pp. 2075–2084, Nov.1999.

[2] Linden S. et al., *Photonic Metamaterials: Magnetism at Optical Frequencies*, Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, vol. 12, no. 6, pp. 1097-1105, Nov.dec. 2006.

[3] Pendry J.B., *Negative Refraction Makes a Perfect Lens*, Phys. Rev. Lett., 85, pp.3966-3969, 2000.

[4] Veselago V.G.,The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ, Sov. Phys.–Usp., vol. 10, no. 4, pp. 509–514,1968.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]