

## طراحی و شبیه‌سازی رزوناتور فرامواد جهت بهبود پهنای باند

یحیی نیل برگی<sup>۱</sup>

۱. کارشناس ارشد برق، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران

### چکیده

متامتریال طراحی شده در این مقاله رابه صورت عددی و تجربی برای کاربردهای رادار و وای فای بررسی و شبیه‌سازی نمودیم. این فراماده، سه فرکانس رزونانس ۳.۳ گیگاهرتز، ۲.۵ گیگاهرتز و ۱.۸ گیگاهرتز ایجاد می‌کند. کل ابعاد سلول واحد شبیه‌سازی شده  $8 \times 8 \times 274.1$  میلی‌متر است. فرکانس ۳.۳ گیگاهرتز در رادار هواشناسی استفاده می‌شود. وازفرکانس ۲۰.۵ گیگاهرتز به طور گسترده در Wi-Fi برای برنامه‌های کاربردی با پهنای باند بالا و سرعت بالا استفاده می‌شود. طراحی رزوناتور فراماده با ابعاد بهینه شده که باعث افزایش پهنای باند به بیش از ۳۲٪ و بهبود یافتن پارامتر پراکندگی S تا ۵۰ تا ۶۰٪ در محدوده فرکانس Wi-Fi می‌باشد. این ویژگی‌ها باعث بالا رفتن حساسیت و کارایی متمایز رزوناتور فراماده شبیه‌سازی شده در این مقاله شده است.

واژه‌های کلیدی: متامتریال، رزوناتور، فرامواد، زیرلایه، ضریب نفوذپذیری

## Design and simulation of metamaterial resonator to improve bandwidth

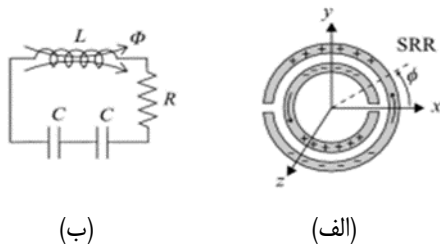
Yahya Nilbargi

MSc of Electrical Engineering, Imam Ali University, Iran, Tehran.

### Abstract

The metamaterial designed in this article was investigated and simulated numerically and experimentally for radar and Wi-Fi applications. This metamaterial creates three resonance frequencies of GHz 3.3, GHz 2.5 and GHz 1.8. The total dimensions of the simulated unit cell are  $8 \times 8 \times 274.1$  mm. 3.3 GHz frequency is used in weather radar. The 20.5GHz frequency is widely used in Wi-Fi for high-bandwidth and high-speed applications. The design of the metamaterial resonator with optimized dimensions increases the bandwidth to more than 32% and improves the dispersion parameter S to 50.60% in the Wi-Fi frequency range. These features have increased the sensitivity and distinctive performance of the metamaterial resonator simulated in this article.

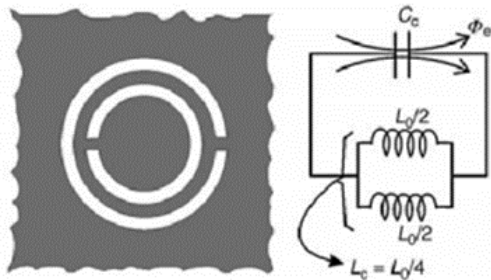
**Key words:** Metamaterial, Resonator, Metamaterial, Substrate, Permeability coefficient



شکل ۱- نمایش مدل مداری شبه استاتیک حلقه SRR (الف) شماتیک حلقه SRR (ب) مدل مداری آن. [۲]

### ۱-۲- رزوناتور CSRR

ساختار CSRR که مکمل ساختار SRR است، در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. می دانیم که اگر بخواهیم مکمل یک ساختار فلزی صفحه ای را بیابیم قسمت های فلزی ساختار اصلی را با شکاف و شکاف ها را با صفحه های فلزی پر می کنیم [۲]. اگر ضخامت صفحات فلزی صفر و رسانایی آنها بی نهایت در نظر گرفته رفتار می کنند. در این صورت ساختار اصلی و مکمل شود، آنگاه شکاف ها مانده های مغناطیسی کامل یکدیگر می باشند. اگر میدان  $F=(E,H)$  یک جواب برای ساختار اصلی باشد، آنگاه میدان آن دوگان  $F'$  که بصورت رابطه (۱) است، یک جواب برای ساختار مکمل است. در نتیجه اگر شرایط ایده آل باشد، انتظار داریم که رفتار حلقه CSRR دوگان حلقه SRR باشد [۴].



شکل ۲- رزوناتور CSRR و مدار معادل آن [۴].

$$F' = (E', H') = (-\sqrt{\mu/\epsilon} \cdot H, \sqrt{\epsilon/\mu} \cdot E) \quad (1)$$

### ۳- ابعاد ساختار رزوناتور CSRR

ساختار طراحی سلول واحد MTM شکل (۳) نمای بالایی از ساختار رزوناتور دو V معکوس می باشد که بوسیله نرم افزار CST 43 شبیه سازی گردیده است. در مرحله اول، زیرلایه ساختار ارائه شده از مواد دی الکتریک Rogers RO4350B به ابعاد  $8 \times 8$  میلی متر مربع (طول و عرض) با ضخامت  $1.524$  میلی متر تشکیل شده است. ثابت دی الکتریک ( $\epsilon$ ) و تلفات مماس ( $\delta$ ) این ماده  $3.66$  و  $0.0037$  است. ساختار پیشنهادی شامل سه حلقه مربع شکل بنام تشدید کننده های حلقه شکاف مکمل است که در داخل تشدید کننده دو V معکوس قرار

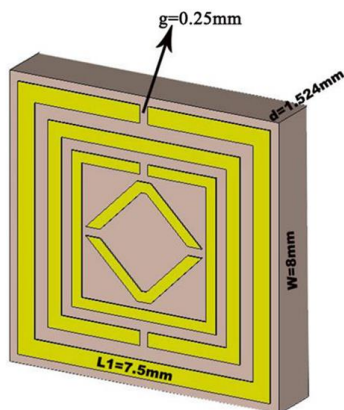
ویکتور و سلاگو بیش از چهار دهه پیش از این، با در نظر گرفتن خواص دور از انتظار برای مواد، وجود پدیده هایی را پیشگویی کرد که در طبیعت دیده نشده بودند. این موضوع سالها بعد با پیگیری دانشمندان دیگر و تحقق پدیده های مذکور، شاخه ای گسترده به نام فرامواد را ایجاد کرد. متامتریال ها از بخش های کوچکتري به نام سلول واحد که عمدتاً ترکیبی از فلز و عایق است تشکیل می شوند. در واقع ساختارهای متناوبی می باشند که متوسط اندازه سلول واحد آنها در مقابل طول موج، کوچک است [۱]. در این شرایط می توان چنین ساختاری را به عنوان یک محیط همگن در نظر گرفت و برای آن پارامترهای الکترومغناطیسی مؤثر، یعنی  $\epsilon_{eff}$  و  $\mu_{eff}$  تعریف کرد. از آنجایی که پاسخ یک ماده به میدان های خارجی اعمال شده، تا حدود زیادی توسط دو پارامتر  $\epsilon$  و  $\mu$  مشخص می شود، می توانیم یک فضای پارامتری الکترومغناطیسی را برای دسته بندی مواد، توسط دو پارامتر مذکور بیان کنیم. در یک محیط همسانگرد، خطی و پسیو، پارامترهای ساختاری محیط،  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  و  $\mu = \mu' - j\mu''$  می باشند، که قسمت های موهومی این پارامترها مثبت بوده و نشان دهنده تلفات است. متامتریال<sup>۱</sup> از دو واژه متا و متریال تشکیل شده است. واژه متا برگرفته از واژه یونانی متا به معنی فرا و متریال به معنای مواد می باشد فرامواد مواد مرکبی هستند که دارای خواص نامتعارف الکترومغناطیسی در ساختار وجودی خود و دارای خاصیت ضریب شکست منفی نور می باشد به این معنی که این مواد نور را در جهت مخالف مواد عادی منکسر می کنند پاسخ مواد معمولی به امواج الکترومغناطیسی به مولکول ها و اتم های سازنده آن ماده بستگی دارد در حالی که در فرامواد این پاسخ به ساختار تشکیل دهنده فرامواد بستگی دارد تا به نوع اتم ها و مولکول های تشکیل دهنده آن بستگی داشته باشد متامتریال های الکترومغناطیسی ساختارهای الکترومغناطیس مصنوعی "به طور مؤثر همگن" با خواصی که معمولاً در طبیعت یافت نمی شوند، هستند [۲].

### ۲- رزوناتور SRR

همانطور که می دانیم ساختارهای SRR از نوع رزونانسی است. برخلاف ساختار نشان داده شده در شکل ۱ که یک ساختار از نوع Dual Transimission Line می باشد. در ساختارهای Dual Transimission Line برای دست یافتن به امواج Backward، بطور خیلی ساده، خازن های سری و سلف های موازی به خط انتقال اضافه نند. ساختارهای رزونانسی نیز تولید امواج Backward می کنند و از نوع مواد CRLH هستند. مدار معادل SRRها یک مدار RLC است. برای داشتن درک بهتری از وجود L و C بهتر است شکل (۱) را در نظر بگیریم. در این شکل خازن های C در اثر حرکت جریان از یک سر حلقه به سمت مقاومت R نشان دهنده تلفات می باشد. معمولاً تلفات کم است و می توانیم اگر از آن صرف نظر کنیم ( $R=0$ ) [۲].

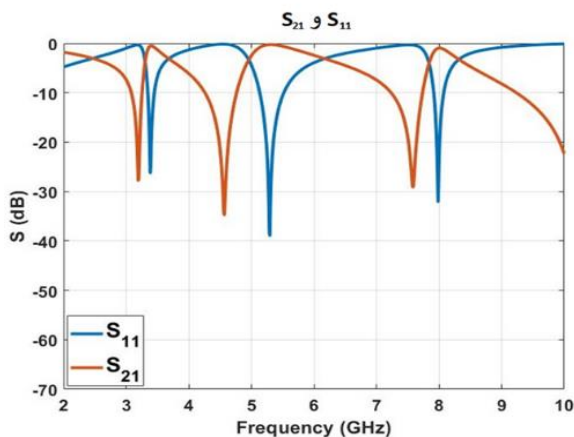
<sup>1</sup> Metamaterial

فرکانسی ۲ تا ۱۰ گیگاهرتز کار می‌کند. پس از شبیه سازی این سلول واحد برای بدست آوردن پارامترهای پراکندگی S شرایط مرزی را اعمال می‌کنیم.



شکل ۴- نمایی از سلول واحد شبیه سازی شده با نرم افزار CST

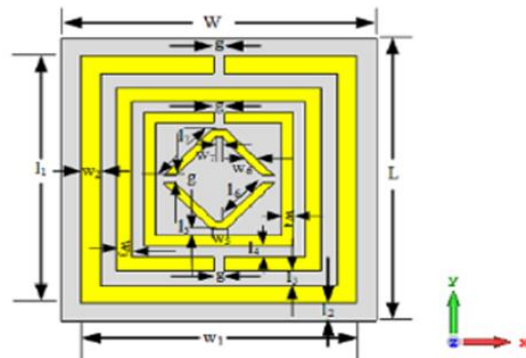
با اعمال شرایط مرزی در راستای محور x و y unit cell (بی نهایت سلول)، و در جهت انتشار موج open (باز و خلأ) تعریف شده است و بردار موج الکترومغناطیسی تابشی ( $k_0$ ) به صورت موج صفحه‌ای در امتداد محور Z منفی منتشر می‌شود، سلول واحد شکل (۳-۴) را شبیه سازی نموده ایم. از شبیه سازی سلول واحد شکل (۳-۴) با توجه به شرایط مرزی بالا، پارامترهای پراکندگی S (dB) برحسب فرکانس (GHZ) حاصل می‌گردد. در ادامه با توجه به شکل (۵) اندازه پارامترهای S11 و S21 که ضرایب انعکاس و انتقال سلول واحد شبیه سازی شده هستند را بدست می‌آوریم و سپس کاربرد این فرکانس‌ها را بیان می‌کنیم.



شکل ۵- نمودار منحنی پارامترهای پراکندگی S (dB) برحسب فرکانس (GHZ)

همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود اندازه پارامتر S11 ضریب انعکاس در فرکانس‌های ۳.۳، ۵.۲ و ۸ گیگاهرتز به ترتیب برابر با 26.32 dB- و 29.26 dB- و 29.26 dB- می‌باشد و اندازه پارامتر S21 ضریب انتقال نیز به ترتیب برابر با 28.50 dB- و 34.50 dB- و 29.26 dB- بدست می‌آید. همچنین

گرفته است. این تشدید کننده‌ها از مس ساخته شده اند که ضخامت آن ۰.۳۵ میلی متر است. رسانایی ( $\sigma$ ) رزوناتور ۸.۵ × ۱۰۷ S/m که از جنس مس آنیل شده است. عرض حلقه مربع اول ۰.۴ میلی متر، حلقه دوم مربع ۰.۳۰ میلی متر و حلقه سوم ۰.۲۵ میلی متر است که عرض دو V معکوس ۰.۲۰ میلی متر است. فاصله بین حلقه اول و دوم ۰.۴۰ میلی متر، حلقه دوم و سوم ۰.۳۰ میلی متر و حلقه سوم با دو V معکوس ۰.۲۰ میلی متر است. تمام شکاف‌های سلول پیشنهادی برابر با ۰.۲۵ میلی متر است. نمای پرسپکتیو تشدید کننده معرفی شده در شکل (۳) نشان داده شده است [۳].



شکل ۳- نمایی از ساختار سلول واحد رزوناتور CSRR [۳].

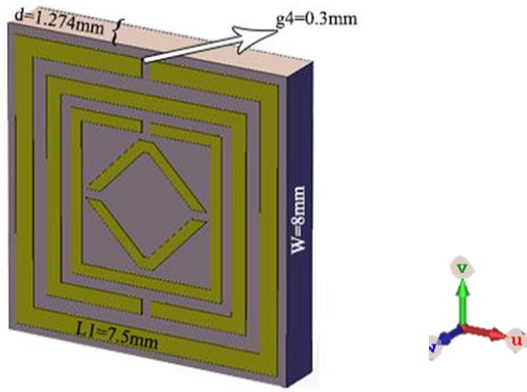
#### ۴- طراحی و شبیه سازی رزوناتور CSRR

در این قسمت از مقاله، ساختار یک رزوناتور فرامواد از آرایه ای بسیار بزرگ از سلول‌های واحد ساخته می‌شود. برای شبیه سازی کامپیوتری چنین ساختاری یک سلول واحد را با چنان شرایط مرزی شبیه سازی می‌کنیم که بتواند شرایط بی نهایت بودن ساختار را پیاده سازی می‌کند. جدول (۱) پیکربندی ابعادی سلول واحد MTM پیشنهادی مرجع [۳] را نشان می‌دهد که مادر این مقاله توسط نرم افزار CST شبیه سازی کرده ایم.

جدول ۱- توضیحات ابعادی برای پیکربندی MTM شده [۳].

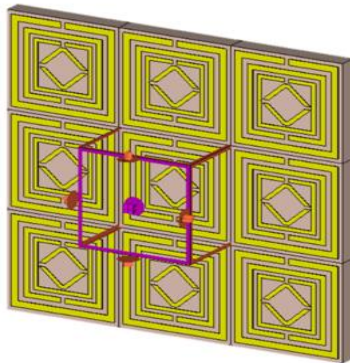
پارامترها	اندازه	پارامترها	اندازه	پارامترها	اندازه	پارامترها	اندازه
	(mm)		(mm)		(mm)		(mm)
W	۸	W4	۰.۳	L2	۰.۵	L7	۱.۷۷
L	۸	W5	۰.۴	L3	۰.۴	g	۰.۲۵
W1	۷.۵	W6	۰.۳	L4	۰.۳	d	۱.۵۲۴
W2	۰.۵	W7	۰.۰۱۵	L5	۰.۲	h	۰.۰۳۵
W3	۰.۴	L1	۷.۵	L6	۱.۵		

شکل (۴) نمایی از سلول واحد شبیه سازی شده توسط نرم افزار (CST-2019) می‌باشد که در این شبیه سازی اندازه طول و عرض حلقه‌ها، همچنین شکاف‌ها و اندازه طول و عرض دو V معکوس داخل حلقه‌ها برابر جدول (۱) طراحی گردیده است. همانطور که در قسمت قبل این مقاله آمده است، رزوناتور فراماده شبیه سازی شده در بازه



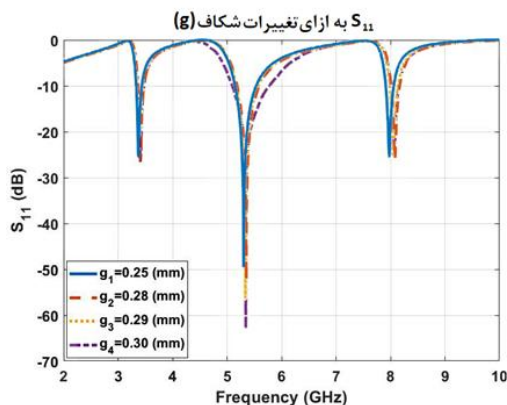
شکل ۶- نمایی از سلول واحد شبیه سازی شده با اندازه گپ  
CST با  $(g_4=0.30\text{mm})$

سپس شرایط مرزی در مرجع [۳] را با در نظر گرفتن اینکه سلول واحد در فرکانس ۲ تا ۱۰ گیگاهرتز کار می کند در راستای محور x و y unit cell (بی نهایت سلول)، و در جهت انتشار موج open (باز و خلاً) تعریف شده است و بردار موج الکترومغناطیسی تابشی  $(k_0)$  به صورت موج صفحه‌ای در امتداد محور Z منفی منتشر می شود، به سلول واحد شبیه سازی شده شکل (۷) اعمال می کنیم.



شکل ۷- نمایی از اعمال شرایط مرزی به آرایه‌ای از سلول واحد با  
CST

با اعمال شرایط مرزی در بازه فرکانسی ۲ تا ۱۰ گیگاهرتز، نتایج پارامترهای پراکندگی S (dB) بر حسب فرکانس (GHz) بدست می آید. در شکل های (۸ و ۹) نمودارهای  $S_{11}$  و  $S_{21}$  نشان شده است



شکل ۸- نمودار  $S_{11}$  (dB) بر حسب فرکانس

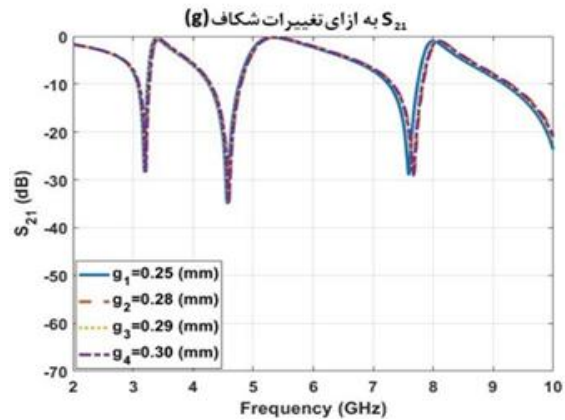
پهنای باند در 3 dB- برای باند فرکانس اول که باند S می باشد از فرکانس ۰.۲۶ تا ۰.۵۹. ۳ گیگاهرتز برابر با ۳۳۰ مگاهرتز و در باند فرکانسی دوم که باند C نام دارد از ۵ تا ۰.۱۶ گیگاهرتز برابر با ۱۱۰۰ مگاهرتز و برای باند سوم که باند X هست از فرکانس ۰.۷۷ تا ۰.۸ گیگاهرتز برابر با ۴۳۰ مگاهرتز بدست می آید. از مهمترین ویژگی های این ساختار پیشنهادی، اندازه کوچک و ساختار تشدید کننده ساده است که می تواند حداکثر باند فرکانسی را پوشش دهد و فرکانس های تشدید مورد نیاز را ارائه دهد. با توجه به جدول (۲) فراماده شبیه سازی شده سه فرکانس رزونانس ۰.۳، ۰.۲۵ و ۰.۸ گیگاهرتز را ایجاد می کند که برای فرکانس تشدید اول یعنی ۰.۳ گیگاهرتز باند S (۴-۲) گیگاهرتز را پوشش می دهد که در رادارهای آب وهوا مورد استفاده قرار می گیرد. فرکانس رزونانس دوم یعنی ۰.۲۵ گیگاهرتز باند C (۸-۴) گیگاهرتز را پوشش می دهد. از آنجایی که سرعت شبکه Wi-Fi می بایست سریع باشد و این باند فرکانسی دارای سرعت و پهنای باند بالا می باشد بنابراین فراماده پیشنهادی می تواند در Wi-Fi برای کاربردهای با پهنای باند بالا و سرعت بالا استفاده شود. و فرکانس رزونانس سوم ۰.۸ گیگاهرتز باند X (۱۲-۸) گیگاهرتز را ارائه می کند و برای کاربردهای نظامی و رادارهای دریایی از این سلول واحد شبیه سازی شده استفاده نمود.

جدول ۲- پارامترهای پراکندگی S

نام	فرکانس تشدید (GHz)	$S_{11}$ (dB)	$S_{22}$ (dB)
$F_{r1}$	۳.۳	-۲۶.۵	-۲۸.۳
$F_{r2}$	۵.۲	-۳۹.۲۶	-۳۴.۵
$F_{r3}$	۸	-۳۲.۲	-۳۹.۲۶

#### ۴-۱- رزوناتور CSRR بهبود یافته

فرکانس تشدید ایجاد شده توسط رزوناتور بستگی به مدار تشدید تشکیل شده از اندوکتانس و خازن خط انتقال در هر سلول دارد. از این رو، برای آنکه محیطی داشته باشیم که به طور همزمان  $\epsilon$  و  $\mu$  ایجاد نماید باید از SRRها استفاده نماییم. به طور مشابه، اگر در طراحی از ساختارهای CSRR استفاده شود، چون CSRRها در مجاورت فرکانس تشدید یا تشدید خود  $\epsilon$  منفی از خود نشان می دهند بنابراین، به همان دیگری که قادر به فراهم کردن  $\mu$  است نیاز داریم.  $\mu$  منفی می تواند با استفاده از گپ هاب به دست آید. این گپ ها باعث میشوند که ساختار مانند یک پالاسمای مغناطیسی عمل کرده تا فرکانس تشدید،  $\mu$  از خود نشان دهند. این فرکانس تشدید بستگی به مدار تشدید تشکیل شده از خازن گپ و اندوکتانس خط انتقال در هر سلول دارد [۵]. در این بخش از مقاله به طراحی و شبیه سازی سلول واحد فراماده با ابعاد ساختاری جدول (۱) و با دو تغییر، یکی از این تغییرات در اندازه گپ (شکاف) و تغییر دوم در ضخامت (d) زیر لایه می پردازیم. بنابراین با توجه به اندازه گپ (شکاف) در مرجع [۸۲]، سلول واحدی را با اندازه گپ های،  $g_1=0.25\text{mm}$ ،  $g_2=0.28\text{mm}$ ،  $g_3=0.29\text{mm}$  و  $g_4=0.30\text{mm}$  بر روی زیر لایه ای به ضخامت  $d=1.274\text{mm}$  مانند شکل (۶) طراحی و شبیه سازی می کنیم.



شکل ۹- نمودار  $S_{21}$  (dB) بر حسب فرکانس

حال برای بدست آوردن سلول واحد فراماده با بهترین عملکرد (پهنای باند و حساسیت) به مقایسه آنها می‌پردازیم تا در نهایت بهترین سلول واحد را که دارای پهنای باند، حساسیت بالا و پارامترهای پراکندگی  $S$  آن بهبود یافته باشد معرفی خواهیم کرد.

ابتدا سلول واحدی را با استفاده از جدول (۱) که ابعاد ساختاری آن است و با در نظر گرفتن اندازه  $g_2=0.28\text{mm}$  بر روی زیر لایه  $d=1.274\text{mm}$  توسط نرم افزار CST طراحی و شبیه سازی می‌کنیم. سپس شرایط مرزی بالا را در فرکانس ۲ تا ۱۰ گیگاهرتز اعمال می‌کنیم. حال به بررسی نتایج به دست آمده از شکل (۹ و ۸) می‌پردازیم. نمودار (۸) نشان می‌دهد که سلول واحد فراماده شبیه سازی شده در سه فرکانس ۳.۳، ۳.۳، ۵.۳ GHz و ۸.۱ GHz رزونانس ایجاد می‌کند. اندازه پارامتر  $S_{11}$  برای این فرکانس‌ها به ترتیب برابر با  $-26\text{ dB}$ ،  $-52\text{ dB}$  و  $-33\text{ dB}$  است. و اندازه پارامتر  $S_{21}$  به ترتیب برابر  $30\text{ dB}$ ،  $-26\text{ dB}$  و  $-33\text{ dB}$  می‌شود. در مرحله بعدی سلول واحد را برای گپی (شکاف) به اندازه  $g_3 = 0.29\text{mm}$  شبیه سازی کردیم. سپس شرایط مرزی بالا را اعمال نمودیم. نتایج پارامترهای پراکندگی  $S$  (dB) بر حسب فرکانس (GHz) در نمودار (۸) نشان داده شده است. همانگونه که در نمودار (۸) نشان داده شده است، این فراماده در سه فرکانس ۳.۳، ۳.۳، ۵.۳ GHz و ۸.۱ GHz تشدید دارد. از مشاهده نمودار بالا اندازه پارامتر  $S_{11}$  برابر با  $30\text{ dB}$ ،  $-57\text{ dB}$  و  $-26\text{ dB}$  بدست می‌آید و همچنین اندازه  $S_{21}$  برابر با  $40\text{ dB}$ ،  $-27\text{ dB}$  و  $-33\text{ dB}$  است. در نهایت سلول واحد را برای گپ  $g_4=0.30\text{mm}$  طراحی و شبیه سازی می‌نماییم و شرایط مرزی مرجع [۳] را اعمال می‌کنیم. همانطور که در نمودار (۹ و ۸) مشاهده می‌کنیم، این سلول واحد نیز در سه فرکانس ۳.۳، ۳.۳، ۵.۳ GHz و ۸.۱ GHz رزونانس ایجاد کرده است. که سه باند S، C و X را پوشش می‌دهد. اندازه پارامتر  $S_{11}$  این رزوناتور به ترتیب برابر با  $28\text{ dB}$ ،  $-63\text{ dB}$  و  $-27\text{ dB}$  دی سی بل است و اندازه پارامتر  $S_{21}$  نیز برابر با  $40\text{ dB}$ ،  $-27\text{ dB}$  و  $-35\text{ dB}$  است.  $29\text{ dB}$  حاصل می‌شود. از مشاهده نمودار (۸)، پهنای باند سلول واحد

شبیه سازی شده با گپ  $g_4=0.30\text{mm}$  در  $-3\text{ dB}$  برای فرکانس رزونانس اول از ۳.۲ GHz تا ۳.۷ GHz برابر با ۴۵۰ مگاهرتز و پهنای باند در فرکانس رزونانس دوم از ۴.۸۵ GHz تا ۶.۳ GHz برابر با ۱۴۵۰ مگاهرتز شده است و در نهایت پهنای باند برای فرکانس رزونانس سوم از ۷.۷۴ GHz تا ۸.۳۲ GHz برابر با ۵۸۰ مگاهرتز است. همچنین از مقایسه اندازه پارامتر  $S_{11}$  سلول شبیه سازی شده با گپ  $g_4=0.30\text{mm}$  با اندازه  $S_{11}$  سلول‌های شبیه سازی شده با گپ‌های ۰.۲۹ و ۰.۲۸ میلی متر نشان می‌دهد که این گپ (شکاف) اختلاف بیشتری داشته است که نشان دهنده حساسیت بالای این رزوناتور شبیه سازی شده است. بنابراین گپ  $g_4=0.30\text{mm}$  بهترین اندازه برای سلول شبیه سازی شده است که می‌تواند بهترین عملکرد را در زمینه پهنای باند و بهبود پارامترهای پراکندگی S و در نهایت حساسیت بالای رزوناتور به ما بدهد. پس از شبیه سازی‌های مختلف بر اساس اندازه گپ (شکاف) و بررسی نتایج پارامترهای پراکندگی S در این بخش به این نتیجه رسیدیم که سلول واحد شبیه سازی شده با گپ  $g_4=0.30\text{mm}$  بر روی زیر لایه  $d=1.274\text{mm}$  دارای بهترین پهنای باند و حساسیت بالا است. از این رو می‌توانیم این سلول واحد فراماده را بعنوان بهترین سلول واحد شبیه سازی شده در این مقاله معرفی کنیم و ما توانستیم در این علاوه بر افزایش پهنای باند و حساسیت رزوناتور، پارامترهای پراکندگی S را هم بهبود بدهیم.

#### ۴-۲- تجزیه و تحلیل جریان سطحی، E-field و H-field

در شکل (۱۰) الف الگوی جریان سطحی سه فرکانس تشدید مجزا را نشان می‌دهد که بر روی پچ توزیع شده است و به ترتیب در فرکانس‌های ۳.۳، ۳.۳، ۵.۳ GHz و ۸.۱ GHz رخ داده است. برای اولین فرکانس رزونانس ۳.۳ GHz، گپ‌هاگرتز، جریان به طور مساوی در هر حلقه فلزی که با رنگ قرمز ذکر شده، نشان داده شده است. شدت جریان سطحی برای قسمت بالایی حلقه دوم و قسمت پایینی حلقه سوم بالا است. همچنین برای فرکانس تشدید ۵.۳ GHz گپ‌هاگرتز در شکل (۱۰) الف نشان داده شده است، حلقه بیرونی جریان شدت بیشتری دارد ولی در رزوناتور دو V معکوس شکل جریان شدت کمتری دارد. حلقه داخلی نیز شدت جریان زیادی را دارا می‌باشد و حلقه میانی سطح بالایی از جریان را برای فرکانس تشدید ۸ GHz نشان می‌دهد. شکل (۱۰) ب توزیع میدان الکتریکی E سلول واحد MTM شبیه سازی شده را در سه فرکانس رزونانس مجزا نشان می‌دهد. این فرکانس‌ها ۳.۳، ۳.۳، ۵.۳ GHz و ۸.۱ GHz هستند. میدان الکتریکی E اطراف حلقه‌های مختلف در فرکانس تشدید ۳.۳ GHz توزیع شده است. برای فرکانس ۵.۳ GHz گپ‌هاگرتز میدان الکتریکی E بیشتر در حلقه‌های داخلی متمرکز است و مقدار متوسطی هم در حلقه بیرونی سلول توزیع شده است. در فرکانس تشدید ۸.۱ GHz قسمت

نسبت به سلول واحد شبیه سازی شده مرجع [۳] در بخش (۴) برای فرکانس اول بیش از ۳۰.۳۶٪ و برای فرکانس دوم ۳۲٪ و برای فرکانس سوم بیش از ۳۵٪ افزایش داشته است. همچنان که در نمودار (۸) نشان داده شده است، موج بازتر و شکل موج پهن تر شده است. حال به مقایسه اندازه پارامتر  $S_{11}$  فراماده شبیه سازی شده در این بخش با اندازه  $S_{11}$  مرجع [۳] که در بخش (۴) شبیه سازی نمودیم می پردازیم.

$$V_1 = S_{11} + S_{21} \quad (2)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (3)$$

$$T = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (4)$$

$$S_{21} = \frac{(1-T^2)Z}{1-T^2Z^2} \quad (5)$$

$$S_{11} = \frac{(1-T^2)Z}{1-T^2Z^2} \quad (6)$$

$$\mu_r = \frac{j2S_{11}}{jk_0d} + \mu_0 \quad (7)$$

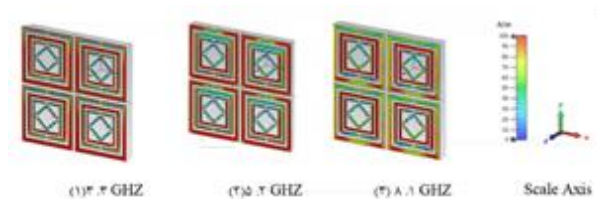
$$\epsilon_r = \frac{2}{jk_0d} \frac{1+S_{11}-S_{21}}{1-S_{11}+S_{21}} \quad (8)$$

$$n = \frac{2}{jk_0d} \sqrt{\frac{(S_{21}-1)^2 - S_{11}^2}{(S_{21}+1)^2 - S_{11}^2}} \quad (9)$$

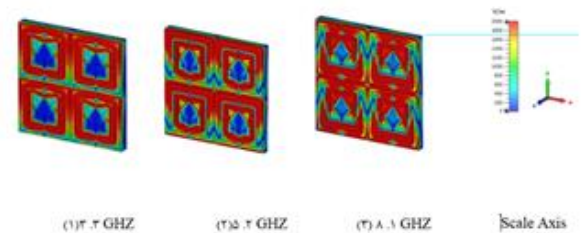
$$Z = \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \quad (10)$$

اندازه پارامتر  $S_{11}$  در مرجع برای فرکانس دوم Wi-fi برابر با ۲۶ dB- است و برای سلول شبیه سازی شده در این بخش در فرکانس Wi-fi برابر با ۶۳ dB- می باشد که اختلاف این دو ۷۴.۷۴- dB خواهد شد. این اختلاف اندازه نشان دهنده این است که حساسیت رزوناتور شبیه سازی شده نسبت به رزوناتور مرجع [۳] بیش از ۵۰.۶۰٪ افزایش داشته است. بنابراین این اختلاف باعث بالارفتن حساسیت رزوناتور و بهتر شدن کیفیت Wi-fi می گردد. و همچنین از این اختلاف اندازه  $S_{11}$  می توانیم به نتیجه برسیم که فراماده ای که ما در این بخش از مقاله با CST شبیه سازی کردیم، پارامترهای پراکندگی S آن بهبود یافته است. با توجه به روابط خطوط انتقال، دانستیم که اندازه پارامترهای پراکندگی  $S_{11}$  و  $S_{21}$  وابسته به ضخامت زیرلایه d است. در رابطه های (۷) و (۸) با کاهش ضخامت زیرلایه d مقدار نفوذپذیری موثر ( $\mu_r$ ) و گذردهی نسبی ( $\epsilon_r$ ) افزایش می یابد. هر دو فاکتور را در رابطه (۱۰) قرار می دهیم، می بینیم که امپدانس افزایش پیدا خواهد کرد. سپس امپدانس بدست آمده را در معادلات پارامترهای پراکندگی S (۵) و (۶) جایگذاری می کنیم، می بینیم

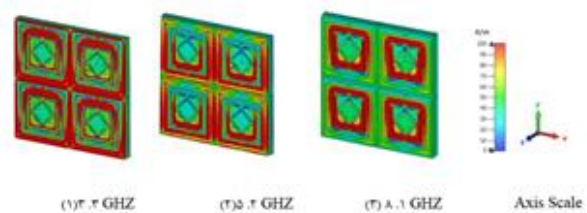
پایینی حلقه میانی و قسمت بالایی حلقه داخلی میدان الکتریکی E مقدار بیشتری توزیع شده، اما حلقه بیرونی دو V معکوس متوجه شارژ زیادی برای فرکانس تشدید ۸ گیگاهرتز شد. شکل (۱۰) ج توزیع میدان مغناطیسی H را برای سه فرکانس رزونانس جداگانه نشان می دهد. در این شکل که با نرم افزار CST شبیه سازی شده است، برای هر فرکانس رزونانس، رفتار میدان مغناطیسی H نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می کنیم میدان مغناطیسی H برای فرکانس ۳.۳ GHZ در قسمت پایینی حلقه بیرونی و میانی و اطراف حلقه داخلی قویتر است. توزیع این میدان در اطراف دو V معکوس با شدت کمتری توزیع شده است. در فرکانس ۵.۲ GHZ شدت میدان مغناطیسی H در حلقه میانی و داخلی متوسط است و برای دو V معکوس شکل شدت کمتری دارد. و در نهایت برای فرکانس ۸.۱ GHZ میدان مغناطیسی H در حلقه درونی شدت قابل توجهی دارد اما این میدان در حلقه بیرونی، میانی و حلقه V شکل شدت کمتری داشته و بسیار اندک توزیع شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰: تجزیه و تحلیل (الف) جریان سطحی (ب) توزیع میدان الکتریکی E و (ج) توزیع میدان مغناطیسی H

### ۳-۴- مقایسه سلول واحد شبیه سازی شده

از مقایسه فراماده شبیه سازی شده در این بخش با سلول واحد مرجع [۳] در می یابیم که اختلاف پهنای باندهای سلول با سلول واحد شبیه سازی شده در بخش (۴)، برای فرکانس رزونانس اول برابر با ۱۲۰ MHz و برای فرکانس رزونانس دوم برابر با ۳۵۰ MHz و برای فرکانس رزونانس سوم ۱۵۰ MHz خواهد شد. بنابراین پهنای باند این سلول

که اندازه  $S_{11}$  و  $S_{21}$  پیدا می‌کند. ماهم در این مقاله از روابط خطوط انتقال بالا استفاده کرده ایم تا با ویژگی‌های این روابط، بتوانیم سلول واحد فراماده‌ای راشیبه سازی کنیم که تمامی این ویژگی‌ها را داشته باشد.

## ۴-۴- کاربرد سلول واحد CSRR شبیه سازی

در این مقاله یک فراماده DNG به صورت عددی و تجربی برای کاربردهای رادار و Wi-Fi شبیه سازی و بررسی شده است. متامتریال طراحی شده سه فرکانس رزونانس ۱.۳ GHZ، ۲.۵ GHZ و ۱.۸ GHz. ۸ گیگاهرتز را ارائه می‌دهد که باندهای S، C و X را پوشش می‌دهد. کل ابعاد سلول واحد پیشنهادی  $۸ \times ۸ \times ۱$  میلی متر است. 'MTM' پیشنهادی DNG<sup>۱</sup> است. باند ۳.۳ گیگاهرتز برای استفاده در رادار آب و هوا کاربرد دارد. از فرکانس ۱.۸ گیگاهرتز باند X برای رادار دریایی استفاده می‌شود. باند C ۵ گیگاهرتز به طور گسترده در Wi-Fi برای برنامه‌های کاربردی با پهنای باند بالا و سرعت بالا استفاده می‌شود. Wi-Fi در ابتدا برای دستگاه‌های محاسباتی سیار مانند لپ‌تاپ‌ها طراحی شده بود، اما اکنون به طور گسترده در کالاهای مصرفی مانند تلویزیون، پخش کننده DVD و دوربین‌های دیجیتال استفاده می‌شود. در این فصل از پایانامه با شبیه سازی‌های مختلف و بررسی‌های گوناگون بر روی نتایج بدست آمده از پارامترهای پراکندگی S، پهنای باند و حساسیت رزوناتور به این نتیجه رسیدیم سلول واحد شبیه سازی شده بر مبنای تغییر گپ ( $g_4=0.30\text{mm}$ )، عملکرد و ساختار رزوناتور شبیه سازی شده ما بهتر از رزوناتور مقاله مرجع [۳] می‌باشد.

از آنجایی که اندازه سلول واحد فراماده پیشنهادی به دلیل ضخامت کم زیر لایه ( $d=1.274\text{mm}$ ) کوچک است، فرکانس رزونانس مورد نظر را فراهم می‌کند و پهنای باند فرکانسی بزرگ و حساسیت بالایی را می‌دهد. از این رو سلول واحد شبیه سازی شده در این بخش می‌تواند به طور موثر در برنامه‌های رادار و Wi-Fi مورد استفاده قرار گیرد. Wi-Fi (بی سیم) یک پروتکل شبکه بی سیم است که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. Wi-Fi مانند سایر دستگاه‌های بی سیم کار می‌کند، زیرا سیگنال‌هایی را بین دستگاه‌ها با استفاده از فرکانس‌های رادیویی ارسال می‌کند. در باندهای فرکانسی ۲.۴ و ۵ گیگاهرتز کار می‌کند. وقتی از فرکانس‌های باند ۵ گیگاهرتز استفاده می‌شود، سرعت شبکه Wi-Fi معمولاً سریع‌تر است. باند ۵ گیگاهرتز دارای منطقه پوشش کمتری است، اما داده‌ها را سریعتر ارائه می‌دهد. فرکانس‌های بالاتر اجازه می‌دهند تا داده‌ها سریع‌تر از فرکانس‌های پایین‌تر تحویل داده شوند. از این رو باند ۵ گیگاهرتز امکان آپلود و دانلود سریعتر اطلاعات را فراهم می‌کند. از آنجایی که ساختار پیشنهادی یک باند فرکانسی ۵ گیگاهرتز را فراهم می‌کند، MTM پیشنهادی می‌تواند در

Wi-Fi برای کاربردهای پهنای باند و سرعت بالا استفاده شود. رادار دریایی احتمالاً مهم‌ترین قطعه تجهیزات روی پل کشتی برای افسر نگهبان (COO) است تا مراقب ناوبری ایمن باشد.

باند X به طور گسترده در رادارهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا آنتن‌های کوچکتری را امکان پذیر می‌کند که در اکثر قایق‌ها قرار می‌گیرند و وضوح هدف را بهبود می‌بخشد. رادار هواشناسی دستگاهی است که پالس‌های الکتریسیته الکترومغناطیسی را به اکوسیستم می‌فرستد تا بارندگی را تعیین کند، حرکت و شدت آن را تعیین کند و نوع بارندگی را که شامل باران، برف یا تگرگ است، کشف کند. رادار S-Band چشم انداز دوربرد نهایی را فراهم می‌کند و امکان برنامه ریزی، پیش بینی و دفاع را قبل از آب و هوای شدید فراهم می‌کند. از آنجایی که سلول طراحی شده دو فرکانس تشدید بیشتری را ارائه می‌دهد، یعنی ۳.۳ گیگاهرتز (باند S) و ۱.۸ گیگاهرتز (باند X)، بنابراین فراماده شبیه سازی شده هم می‌تواند در رادار آب و هوا و رادار دریایی استفاده شود.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به تعریف مبانی متامتریال و جاذب‌های الکترومغناطیسی و سپس به بررسی رزوناتور CR-SRR با استفاده از جاذب فراماده پرداختیم. در بخش Wi-Fi یک نمونه از جدیدترین رزوناتورهای CSRR<sup>۴</sup> که کاربرد بسیار زیادی در سرعت و پهنای باند برای Wi-Fi دارد مورد بررسی قرار گرفت و در آخر ساختار جدید تغییر در ابعاد و شکل ساختار، یکی از این رزوناتورهای فرامواد جدید CSRR طراحی و شبیه سازی شد. از ویژگی‌های این طراحی و ساختار شبیه سازی شده ابعاد بسیار کوچکتر از ساختار طراحی شده قبلی که باعث صرفه جویی در هزینه‌های ساخت آن می‌شود، فرکانس گزینی<sup>۵</sup> بالا (آسانی در تغییر فرکانس مرکزی رزوناتور)، تلفات کم، پهنای قابل کنترل، حساسیت بالای آن و همچنین بهبود در پارامترهای پراکندگی S و ساخت آسان را فراهم می‌آورد در حال که در طراحی‌های مبتنی بر روش‌های متعارف دیگر، دستیابی همزمان به خصوصیات بالا بسیار دشوار است. نحوه شبیه سازی ساختار توسط نرم افزار CST تحت شرایط مرزی و تحریک مشخص با تصاویری از محیط نرم افزار به طور کامل تشریح شد و نتایج شبیه‌سازی ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. از مقایسه فراماده شبیه سازی شده با سلول واحد مرجع [۳] در می‌یابیم که اختلاف پهنای باند این سلول با سلول واحد شبیه سازی شده، برای فرکانس رزونانس اول برابر با ۱۲۰ MHz و برای فرکانس رزونانس دوم برابر با ۳۵۰ MHz و برای فرکانس رزونانس سوم ۱۵۰ MHz خواهد شد. بنابراین پهنای باند این سلول نسبت به سلول واحد شبیه سازی شده مرجع [۳] در بخش (۴) برای فرکانس اول بیش از ۳۶.۳۰٪ و برای فرکانس دوم ۳۲٪ و برای فرکانس سوم بیش از ۳۵٪ افزایش داشته

4 Complementary Split Ring

5 Frequency selector

1 Metamaterial

2 Double Negative

3 officer of the watch

## ۵- منابع

- [1] Zheng, B. and Z. Shen, "Wideband radar absorbing material combining high-impedance transmission line and circuit analogue screen," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 4, pp. 318-319, 2008.
- [2] Pendry, J.B., et al., "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures," *Physical review letters*, vol. 76, no. 25, pp. 47-73, 1996.
- [3] Islam, M., et al., "Metamaterial based on an inverse double V loaded complementary square split ring resonator for radar and Wi-Fi applications," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1-19, 2021.
- [4] Pozar, D.M., *Microwave engineering*. 2011: *John wiley & sons*.
- [5] Danaeian, M., K. Afrooz, and A. Hakimi, "Miniaturization of substrate integrated waveguide filters using novel compact metamaterial unit-cells based on SIR technique," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 84, pp. 62-73, 2018.

است. همچنان که در نمودار (۸) نشان داده شده است، موج بازتر و شکل موج پهن تر شده است. حال به مقایسه اندازه پارامتر  $S_{11}$  فراماده شبیه سازی شده در این بخش با اندازه  $S_{11}$  مرجع [۳] که در بخش (۴) شبیه سازی نمودیم می پردازیم. اندازه پارامتر  $S_{11}$  در مرجع برای فرکانس دوم Wi-Fi برابر با ۲۶.۳۹- dB است و برای سلول شبیه سازی شده در این بخش در فرکانس Wi-Fi برابر با ۶۳- dB می باشد که اختلاف این دو ۲۳.۷۴ dB- خواهد شد. بنابراین این اختلاف باعث بالارفتن حساسیت رزوناتور و بهتر شدن کیفیت Wi-Fi می گردد. و همچنین از این اختلاف اندازه  $S_{11}$  می توانیم به نتیجه برسیم که فراماده ای که ما در این مقاله با CST شبیه سازی کردیم، پارامترهای پراکندگی S آن بهبود یافته است. در این مقاله یک فراماده به صورت عددی و تجربی برای کاربردهای رادار و وای فای شبیه سازی و بررسی شده است. تمامتریال طراحی شده، سه فرکانس رزونانس ۳.۳ GHZ، ۵.۲ GHZ، و ۸.۱ GHZ ایجاد می کند که باندهای S، C و X را پوشش می دهد. کل ابعاد سلول واحد شبیه سازی شده  $۸ \times ۸ \times ۱.۲۷۴$  میلی متر است. باند S ۳.۳ گیگاهرتز در رادار آب و هوا استفاده می شود. رادار دریایی در باند X ۱۰.۸ گیگاهرتز کار می کند. باند C ۵.۲۰ گیگاهرتز به طور گسترده در Wi-Fi برای برنامه های کاربردی با پهنای باند بالا و سرعت بالا استفاده می شود. Wi-Fi در ابتدا برای دستگاه های محاسباتی سیار مانند لپ تاپ ها طراحی شده بود، اما اکنون به طور گسترده در کالاهای مصرفی مانند تلویزیون، پخش کننده DVD و دوربین های دیجیتال استفاده می شود.