

## روش دقیق استخراج پارامترهای محیطی فرامواد بر اساس اصل علیت

سید مصطفی موسوی رکن‌آبادی<sup>۱</sup>

منوچهر کامیاب<sup>۲</sup>، امیر جعفرقلی<sup>۳</sup>، محمود رفائی بوکت<sup>۴</sup>

### چکیده

در این مقاله روشی دقیق و جامع برای استخراج پارامترهای محیطی ساختارهای فرامواد شامل گذردهی الکتریکی، تراوایی مغناطیسی، ضریب شکست، امپدانس مشخصه و ثابت انتشار ارائه شده است. روش ارائه شده مبتنی بر پارامترهای پراکندگی به دست آمده از تابش عمودی یک موج صفحه‌ای به تیغه ساختار فراماده تحت بررسی می‌باشد. مشکل اصلی در این فرایند، ابهام موجود در فاز موج عبوری از ساختار مورد بررسی می‌باشد که می‌بایست به طور دقیق تعیین گردد. در این مقاله، با اعمال رابطه کرامرز کرونیگ<sup>۵</sup> - که دربرگیرنده اصل علیت می‌باشد - به قسمت موهومی ضریب شکست محیط، بدون هرگونه ابهامی، قسمت حقیقی آن استخراج شده است.

### کلید واژه

فرامواد، پارامترهای محیطی، اصل علیت، تراوایی مغناطیسی، امپدانس مشخصه و ثابت انتشار

۱. دانشجوی دکتری برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی smmousavir@gmail.com

۲. دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی

۳. دانش آموخته دکتری برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی

۴. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی

تاریخ دریافت: ۸۹/۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۷

## مقدمه

در سال ۱۹۶۴ میلادی یک محیط چپگرد که دارای گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی منفی می‌باشد توسط وسلانگو<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت [۱]. تحقیقات انجام شده در آن زمان تا سالیان طولانی بدون هرگونه پیشنهاد و ساخت نمونه عملی رها شدند. تا اینکه در سال ۱۹۹۹ میلادی، پندری<sup>۲</sup> یک نمونه عملی از ساختارهای چپگرد شامل SRR<sup>۳</sup> و میله ارائه داد [۲] و این نمونه در سال ۲۰۰۰ توسط اسمیت ساخته و شکست منفی در آن مشاهده گردید [۳]. با ارائه ساختاری با ویژگیهای چپگرد، محققان برای ارائه ساختارهای منحصر به فرد دیگری با ضریب شکست منفی به تکاپو افتادند و از آنجا که ساخت یک محیط فراماده با ابعاد قابل آزمایش دارای هزینه‌های سنگینی بود و ساختارهای جدید دارای پارامترهای متفاوتی نسبت به مواد قبلی بودند این الزام وجود داشت تا الگوریتم‌های قدیمی [۴] اصلاح گردند. در نتیجه الگوریتم‌های جدیدتری که دارای توانایی‌های بیشتری بودند ارائه شدند [۵و۶]. با آن‌که الگوریتم‌های جدید معرفی شده، این قابلیت را داشتند که ساختارهای متنوع بیشتری را آنالیز کرده و رفتار الکترومغناطیسی آن‌ها را مدلسازی کنند ولی برخی ساختارها وجود دارند که این الگوریتم‌ها توانایی استخراج پارامترهای آن‌ها را ندارند. برای ایجاز لازم است به مشکل اصلی این الگوریتم‌ها که ناشی از ابهام موجود در فاز موج عبوری از تیغه فراماده می‌باشد اشاره کرد. در این راستا مشخص است که اگر تغییر فاز اندازه‌گیری شده موج عبوری از تیغه فراماده برابر  $\theta$  باشد تغییر فاز واقعی صورت گرفته برابر  $\varphi = \theta + 2m\pi$  خواهد بود که در آن

$$m = \dots, -1, 0, 1, \dots$$

همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌گردد پارامتر "m" بایستی به درستی تعیین گردد. در این نوشتار، مقاله [۵] به عنوان اساس کار الگوریتم قرار داده شده است و با استفاده از رابطه کرامرز-کرونینگ [۷]، ابهام موجود در تعیین پارامتر "m" برطرف و الگوریتم ذکر شده اصلاح گردیده است. علاوه بر این، روش ارائه شده می‌تواند پارامترهای یاد شده را در بازه‌ای که احتمالاً قسمت موهومی گذردهی الکتریکی یا تراوایی مغناطیسی منفی می‌شود نیز استخراج نماید.

در بخش دوم این مقاله، روش معرفی شده به صورت یک الگوریتم گام به گام مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم با استفاده از الگوریتم ارائه شده، پارامترهای محیطی ساختارهای متعارف فراماده به طور دقیق محاسبه شده و در نهایت در بخش چهارم این نوشتار، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

1. Veselago

2. Pendry

3. Split Ring Resonator

## الگوریتم استخراج پارامترهای محیطی

### مدل سازی یک تیغه بزرگ با یک سلول تشکیل دهنده آن

الگوریتم ارائه شده، پارامترهای محیطی را از روی پارامترهای پراکندگی به دست آمده از تابش عمودی یک موج صفحه‌ای بر ساختار مورد بررسی، محاسبه می‌نماید. در صورتی که لازم باشد پارامترهای پراکندگی به کمک روش‌های عددی به دست آیند، برای سهولت کار و هم‌چنین کاهش حجم محاسبات عددی می‌توان با تعیین شرایط مرزی مناسب، به جای تحلیل عددی یک تیغه بزرگ از ساختار مورد نظر، تنها سلول آن را مورد آنالیز قرار می‌دهیم. برای این کار در نرم‌افزار مورد استفاده، دو وجهی از سلول را که میدان الکتریکی بر آن‌ها عمود است را PEC و دو وجهی را که میدان مغناطیسی تابشی بر آن‌ها عمود است را PMC در نظر می‌گیریم و پورت‌ها را در دو سمت باقیمانده قرار می‌دهیم و پارامترهای  $S_{11}$  و  $S_{21}$  را استخراج می‌کنیم.

### محاسبه امپدانس و قسمت موهومی ضریب شکست

امپدانس ( $Z$ ) و قسمت موهومی ضریب شکست یک ساختار فراماده، به سادگی از الگوریتم ارائه شده در مرجع [۵] قابل محاسبه می‌باشند و ما در اینجا تنها برای کامل بودن بحث آن روش را به طور مختصر در اینجا آورده‌ایم.

### استخراج امپدانس و قسمت موهومی ضریب شکست ساختار فراماده

امپدانس و ضریب شکست یک محیط از روابط زیر محاسبه می‌گردند [۵].

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+s_{11})^2 - s_{21}^2}{(1-s_{11})^2 - s_{21}^2}} \quad \text{Re}(z) \geq 0 \quad (1)$$

$$n = \frac{1}{k_0 d} \left\{ \left[ \text{Re} \left[ \ln \left( e^{ink_0 d} \right) \right] + 2m\pi \right] - i \text{Im} \left[ \ln \left( e^{ink_0 d} \right) \right] \right\} \quad \text{Im}(n) > 0 \quad (2)$$

$$\pm i\sqrt{1-X^2}, \quad X = \frac{1}{2s_{21}}(1-s_{11}^2+s_{21}^2) \quad (3)$$

همان‌طور که در روابط بالا دیده می‌شود، با وجود شرط  $\text{Re}(z) > 0$ ، امپدانس محیط

فراماده به راحتی محاسبه می‌شود. علاوه بر آن با توجه به شرط  $e^{ink_0d} \leq 1$ ، می‌توان قسمت موهومی ضریب شکست را به آسانی به دست آورد. تنها پارامتری که در این فرایند دارای ابهام باقی می‌ماند، در حقیقت قسمت حقیقی ضریب شکست است که بایستی برای تعیین دقیق آن، مقدار  $m$  به درستی انتخاب شود.

### تعیین قسمت حقیقی ضریب شکست ساختار فراماده

در مقالاتی که درباره استخراج پارامترهای محیطی ساختارهای فرامواد منتشر شده‌اند همواره تعیین مقدار صحیح پارامتر  $m$  دارای ابهام بوده است. در این مقاله روشی نیرومند و دقیق برای تعیین  $m$  با استفاده از اصل علیت بیان شده است که با استفاده از آن می‌توان مقدار  $m$  و در نتیجه قسمت موهومی ضریب شکست را در بسیاری از ساختارهای فراماده به دست آورد. یک پارامتر فیزیکی در صورتی علی است که قسمت حقیقی و موهومی آن در رابطه K-K صدق کنند. ما برای تعیین مقدار درست  $m$  این رابطه را به قسمت موهومی ضریب شکست اعمال و قسمت حقیقی آن را محاسبه کرده‌ایم [۷]. این رابطه به صورت زیر می‌باشد.

$$\operatorname{Re}(n(\omega))_{K-K} = 1 + \frac{2}{\pi} \text{P.V.} \left[ \int_0^{\infty} \frac{\omega' \operatorname{Im}(n(\omega'))}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \right] \quad (۴)$$

که در آن  $n$  ضریب شکست محیط و  $\text{P.V.}$  مقدار ویژه انتگرال ذکر شده می‌باشد. با مقایسه مقادیر به دست آمده از روابط (۲) و (۴) به آسانی می‌توان مقدار درست  $m$  را به دست آورد. به این صورت که مقداری از  $m$  را که به ازای آن  $\operatorname{Re}(n) = 1/k_0d \left\{ \operatorname{Re} \left[ \ln \left( e^{ink_0d} \right) \right] + 2m\pi \right\}$  به  $\operatorname{Re}(n(\omega))_{K-K}$  نزدیک‌تر است را به عنوان مقدار صحیح پارامتر  $m$  تعیین و قسمت حقیقی ضریب شکست را محاسبه می‌کنیم. لازم به ذکر است که در اکثر ساختارهای شناخته شده فرامواد به علت محدودیت ضریب شکست،  $m$  یکی از مقادیر صفر و  $-1$  و  $+1$  را اختیار می‌کند [۸].

### تعیین گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی

گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی رابطه مستقیمی با امپدانس و ضریب شکست محیط دارد، [۹]. از آنجا که ما  $n$  و  $Z$  را در قسمت‌هایی قبلی محاسبه کرده‌ایم، می‌توانیم گذردهی الکتریکی و تراوایی و مغناطیسی را از روابط زیر محاسبه نماییم:

$$\mu = nz \quad (5)$$

$$\varepsilon = n / z \quad (6)$$

### تعیین ثابت انتشار ساختار فراماده

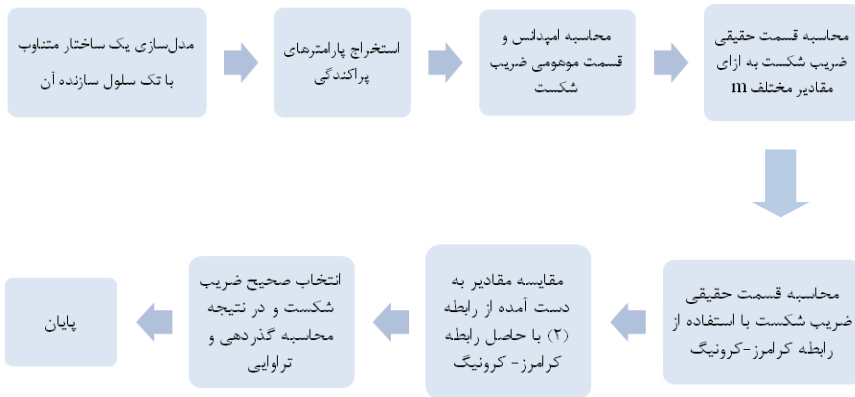
تمامی روابطی را که در قسمت‌های قبلی به دست آوردیم بر اساس تغییرات زمانی به صورت  $\exp(-j\omega t)$  می‌باشد. از این‌رو با اعمال آن به معادلات ماکسول، ثابت انتشار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \alpha - j\beta = \pm j\omega\sqrt{(\varepsilon' + j\varepsilon'')(\mu' + j\mu'')} \quad (7)$$

که علامت  $\gamma$  به صورتی تعیین می‌شود که  $\alpha$  مثبت باشد. علاوه بر آن علامت "و" به ترتیب نشان‌دهنده قسمت حقیقی و موهومی می‌باشند.

### بلوک دیاگرام

بلوک دیاگرام استخراج پارامترهای محیطی ساختارهای فرامواد که در بالا به صورت مبسوط ذکر گردید، به شکل زیر می‌باشد:

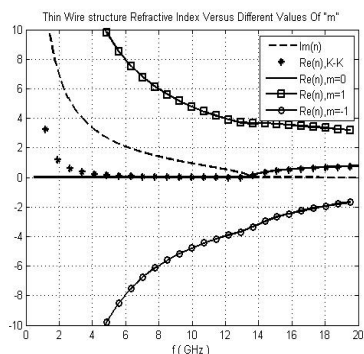


### بررسی ساختارهای مختلف بر اساس نحوه استخراج پارامترهای محیطی

در این قسمت، ساختارهای مختلف فراماده را که از نظر استخراج پارامترهای محیطی تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند را بررسی می‌کنیم. در این راستا ساختارهای  $\Omega$ , ELC, SRR, Thin wire و  $\Omega$  را مورد بررسی قرار می‌دهیم و درباره رفتار آن‌ها به تفصیل صحبت می‌کنیم.

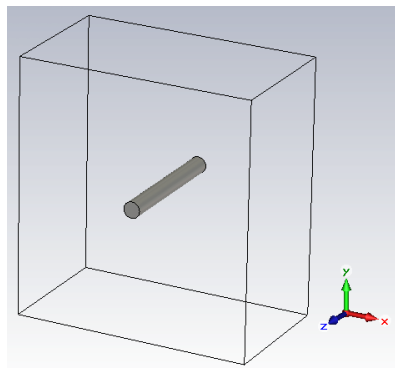
## ساختار Thin Wire [۹]

ساختار Thin Wire در شکل (۱) نشان داده شده است. در این ساختار قطر میله  $0.4 \text{ mm}$  و ابعاد سلول در راستای محوره‌های  $X$  و  $Y$  و  $Z$  به ترتیب برابر  $5/8 \text{ mm}$ ،  $6/3 \text{ mm}$  و  $3/33 \text{ mm}$  است. شرایط مرزی سلول در راستای محور  $Z$ ، هادی الکتریکی کامل و در راستای محور  $X$ ، هادی مغناطیسی کامل تعیین شده است. موج صفحه‌ای در راستای محور  $Y$  تابیده می‌شود. در شکل (۲) قسمت موهومی و قسمت حقیقی ضریب شکست به ازای مقادیر مختلف  $m$  و همچنین قسمت حقیقی ضریب شکست به دست آمده از رابطه کرامرز کرونیگ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در تمامی باند فرکانسی، قسمت حقیقی ضریب شکست به ازای  $m = 0$  مطابقت زیادی با مقدار به دست آمده از رابطه کرامرز کرونیگ دارد و نسبت به بقیه نمودارها به نمودار به دست آمده از رابطه کرامرز کرونیگ نزدیک‌تر است. در نتیجه برای این ساختار در تمامی باند فرکانسی  $m = 0$  قابل قبول است. نمودارهای مربوط به پارامترهای محیطی این ساختار به طور کامل در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، این ساختار در یک محدوده فرکانسی دارای  $\text{Re}(\varepsilon) < 0$  و در تمام باند فرکانسی مورد بررسی دارای  $\text{Re}(\mu) > 0$  می‌باشد. لازم به ذکر است که در این ساختار قسمت موهومی گذردهی و تراوایی در تمام بازه فرکانسی مثبت می‌باشد.

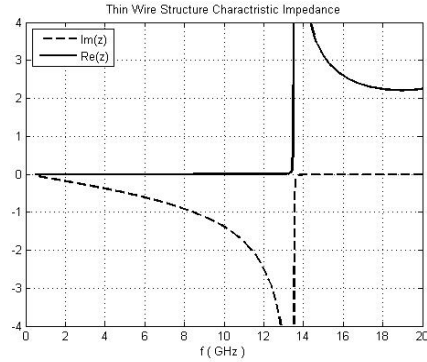
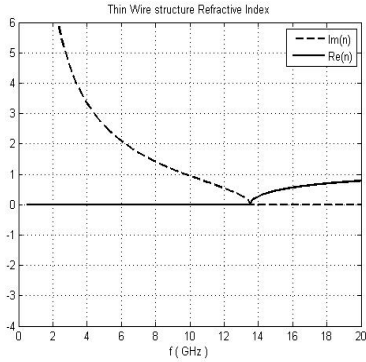
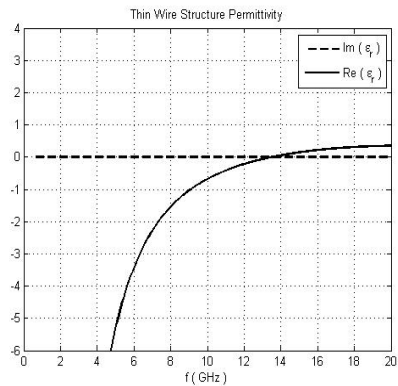
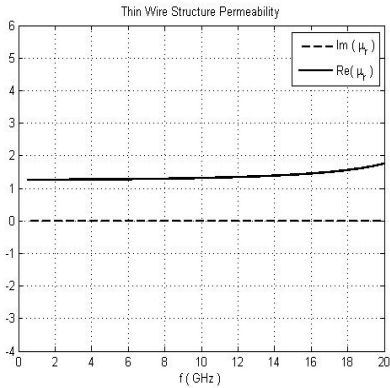


شکل (۲) ضریب شکست ساختار thin wire

به ازای مقادیر مختلف  $m$  و رابطه  $K-K$



شکل (۱) ساختار thin wire

شکل (۳-ب) - ضریب شکست ساختار *thin wire*شکل (۳-الف) - امپدانس مشخصه ساختار *thin wire*شکل (۳-د) - تراوایی مغناطیسی ساختار *thin wire*

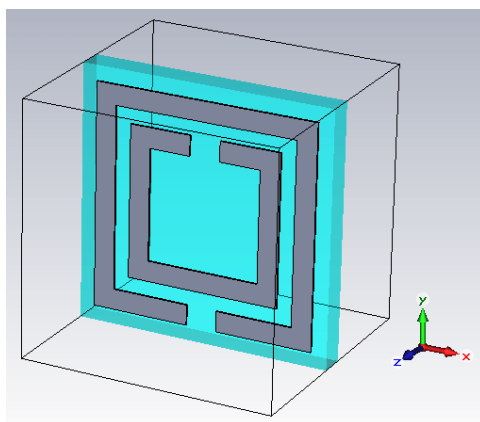
شکل (۳-ج) - گذردهی الکتریکی

مشخصه ساختار *thin wire*

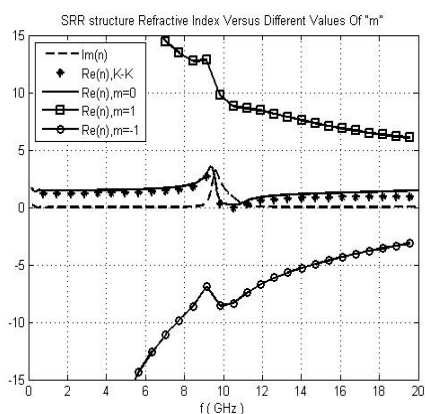
## ساختار SRR، [۱۰]

یک نمونه ساختار SRR در شکل (۴) نشان داده شده است. ابعاد سلول مکعبی شکل مورد بررسی در  $2/5$  mm بوده و ساختار SRR بر روی یک زیرلایه با ضخامت  $0/25$  mm و  $\epsilon_r = 4.4$  و تاژتانت تلفات  $0/02$  چاپ شده است. طول یک ضلع خارجی حلقه بیرونی  $2/2$  mm و عرض تمامی خطوط  $0/2$  mm و فاصله بین دو حلقه  $0/15$  mm و شکاف ایجاد شده در هر حلقه  $0/3$  mm در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی سلول در راستای محور  $\gamma$ ، هادی الکتریکی کامل و در راستای محور  $Z$ ، هادی مغناطیسی کامل تعیین شده است. موج صفحه‌ای در راستای محور  $X$  تابیده می‌شود. شکل (۵) قسمت موهومی و قسمت حقیقی ضریب شکست به ازای مقادیر مختلف  $m$  و همچنین قسمت

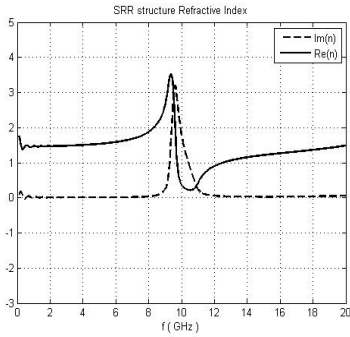
حقیقی ضریب شکست به دست آمده از رابطه کرامرز کرونیگ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود قسمت حقیقی ضریب شکست این ساختار در تمام بازه فرکانسی به ازای  $m = 0$  به طور کامل بر قسمت حقیقی ضریب شکست به دست آمده از رابطه  $K-K$  منطبق است. در نتیجه برای این ساختار نیز در تمامی باند فرکانسی  $m = 0$  قابل قبول است. در این ساختار همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است این ساختار در بازه فرکانسی  $9/3 - 10/9$  GHz دارای قسمت حقیقی تراوایی منفی و در تمام باند فرکانسی قسمت حقیقی گذردهی آن مثبت می‌باشد. لازم به ذکر است که در این ساختار قسمت موهومی تراوایی در تمام بازه فرکانسی مثبت و قسمت موهومی گذردهی الکتریکی در محدوده فرکانسی  $9-10$  GHz منفی است.



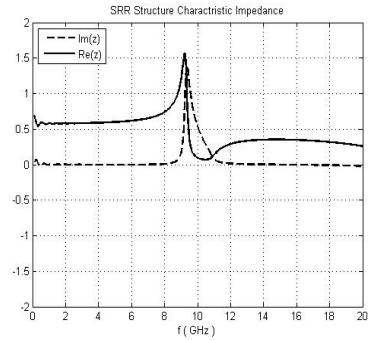
شکل (۴) ساختار SRR



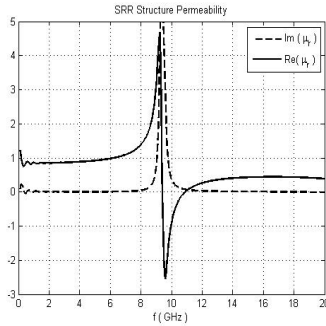
شکل (۵) - ضریب شکست ساختار SRR به ازای مقادیر مختلف  $m$  و رابطه  $K-K$



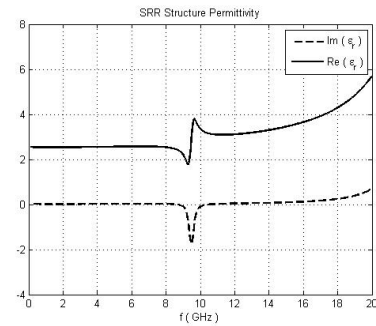
شکل (۶-ب) - ضریب شکست ساختار SRR



شکل (۶-الف) - امپدانس مشخصه ساختار SRR



شکل (۶-د) تراوایی مغناطیسی ساختار SRR

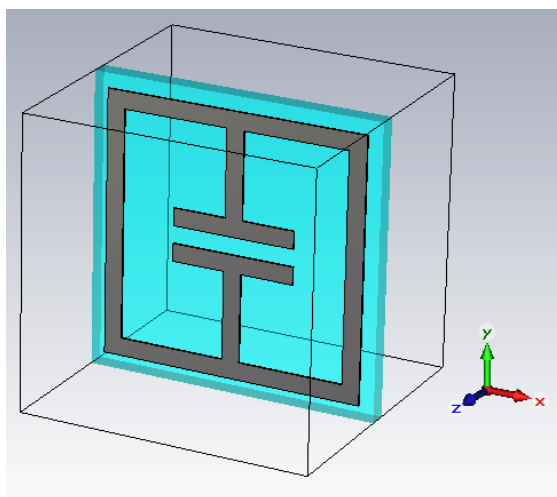


شکل (۶-ج) گذردهی الکتریکی مشخصه ساختار SRR

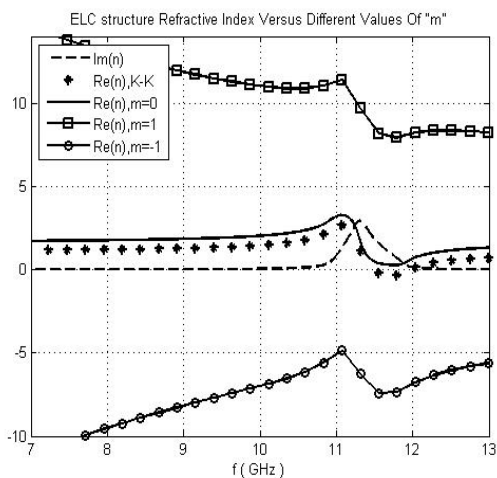
### ساختار ELC، [۱۰]

یک نمونه از ساختار ELC در شکل (۷) نشان داده است. ابعاد سلول مکعبی شکل مورد بررسی  $mm$   $3/33$ ، عرض تمامی خطوط  $mm$   $0/2$ ، شکاف بین دو بازوی نشان داده شده  $mm$   $0/2$ ، طول شکاف  $mm$   $1/4$  و طول بیرونی هر ضلع ساختار  $mm$   $3$  است. لازم به ذکر است که تمامی خطوط بر روی یک زیر لایه با ثابت دی الکتریک  $4/4$  و ضخامت  $mm$   $8$  قرار گرفته‌اند. شرایط مرزی سلول در راستای محور  $y$ ، هادی الکتریکی کامل و در راستای محور  $z$ ، هادی مغناطیسی کامل تعیین شده است. موج شکست به ازای مقادیر مختلف  $m$  و همچنین قسمت حقیقی ضریب شکست به دست آمده از رابطه کرامرز کرونیگ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود قسمت حقیقی ضریب شکست این ساختار در تمام بازه فرکانسی به ازای  $m = 0$  به طور کامل بر قسمت حقیقی ضریب

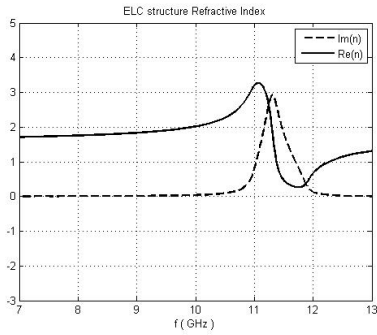
شکست به دست آمده از رابطه کرامرز کرونیگ منطبق است. همان‌طور که در نمودارهای شکل (۹) نشان داده شده است این ساختار در بازه فرکانسی ۱۱/۹ - ۱۱/۱ GHz دارای قسمت حقیقی گذردهی منفی و در تمام باند فرکانسی قسمت حقیقی تراوایی آن مثبت می‌باشد. لازم به ذکر است که در این ساختار قسمت موهومی گذردهی در تمام بازه فرکانسی مثبت و قسمت موهومی تراوایی در بازه فرکانسی ۱۲ - ۱۰/۲ GHz منفی است.



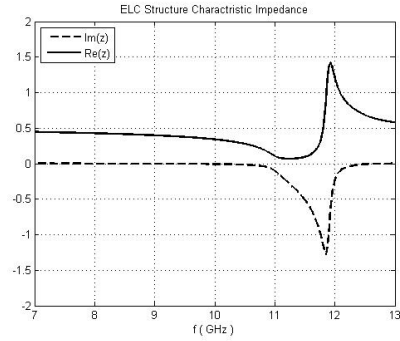
شکل (۷) ساختار ELC



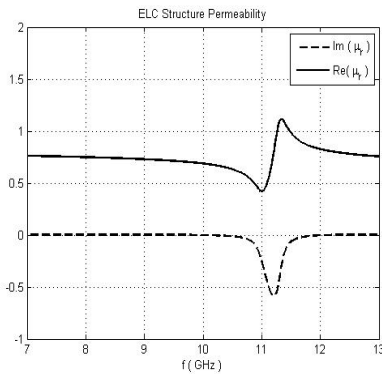
شکل (۸) ضریب شکست ساختار ELC به ازای مقادیر مختلف m و رابطه K-K



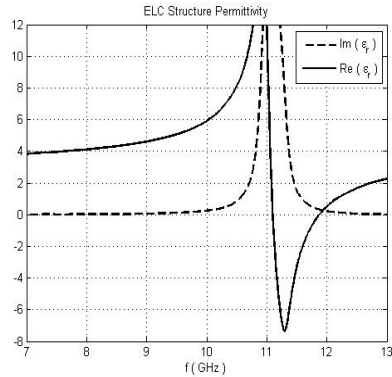
شکل (۹-ب) ضریب شکست ساختار ELC



شکل (۹-الف) امپدانس مشخصه ساختار ELC



شکل (۹-د) تراوایی مغناطیسی ساختار ELC

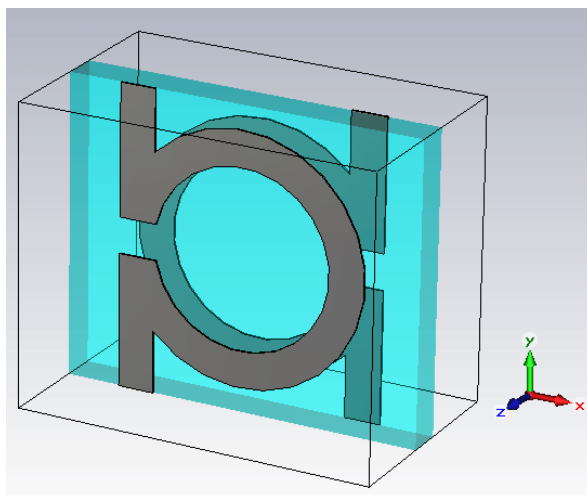


شکل (۹-ج) گذردهی الکتریکی مشخصه ساختار ELC

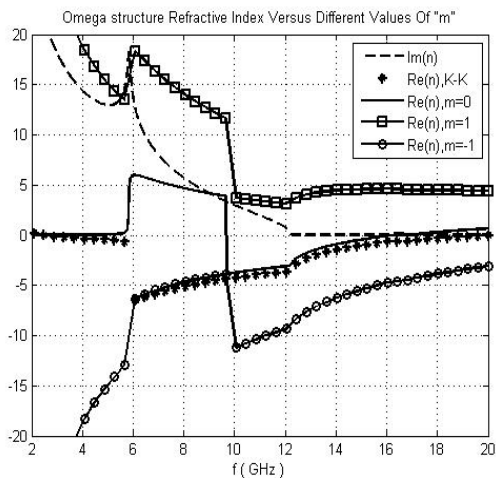
### ساختار Omega، [۹]

یک نمونه از ساختار Omega در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ابعاد سلول در راستای محورهای X و Y و Z به ترتیب برابر ۴ mm، ۳/۳۳ mm و ۲/۵ mm است. شعاع بیرونی حلقه ۱/۴ mm، عرض تمامی خطوط و شکاف ایجاد شده در هر حلقه ۰/۴ mm است. این ساختار بر روی یک زیرلایه با ثابت دی الکتریک ۴/۰ و ضخامت ۰/۴ mm قرار گرفته است. شرایط مرزی سلول در راستای محور Y، هادی الکتریکی کامل و در راستای محور Z، هادی مغناطیسی کامل تعیین شده است. موج صفحه‌ای در راستای محور X تابیده می‌شود. در شکل (۱۱) قسمت موهومی و قسمت حقیقی ضریب شکست به ازای مقادیر مختلف m و همچنین قسمت حقیقی ضریب شکست به دست آمده از رابطه کرامرز کرونیگ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود بر خلاف ساختارهای

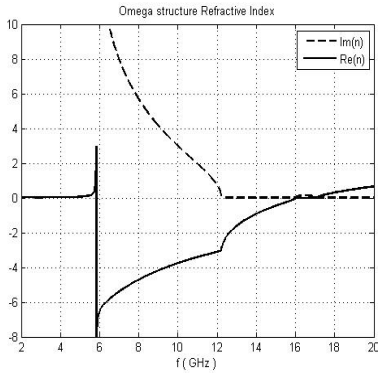
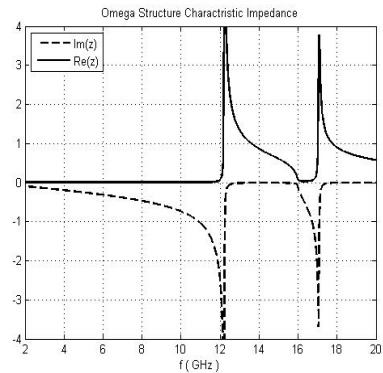
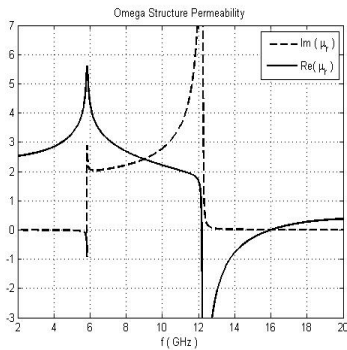
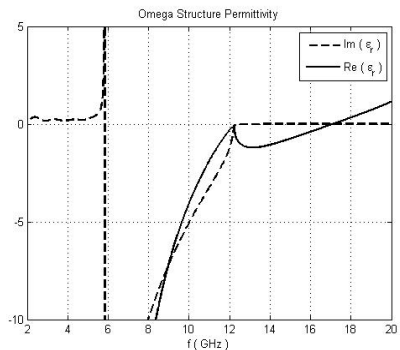
قبلی، مقدار "m" در تمامی باند فرکانسی برابر صفر نیست و در بازه ۶-۹/۷ GHz ضریب شکست بدست آمده از  $m = -1$  از رابطه کرامرز کرونیگ تبعیت می‌کند. لازم به ذکر است که این مسأله بدون استفاده از روش K-K به هیچ عنوان قابل دستیابی نبوده و استفاده از آن را اجتناب ناپذیر می‌نماید. پارامترهای محیطی این ساختار در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۰) ساختار *omega*



شکل (۱۱) ضریب شکست ساختار *omega* به ازای مقادیر مختلف  $m$  و رابطه K-K

شکل (۱۲- ب) ضریب شکست ساختار  $\omega$ شکل (۱۲- الف) امپدانس مشخصه ساختار  $\omega$ شکل (۱۲- د) تراوایی مغناطیسی ساختار  $\omega$ شکل (۱۲- ج) گذردهی الکتریکی ساختار  $\omega$ 

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در این نوشتار با نتایج آورده شده در مرجع [۹] مطابقت ندارد و این عدم مطابقت به دلیل آن است که در مرجع فوق‌الذکر از رابطه کرامرز-کرونینگ استفاده نشده است و در نتیجه مقداری درست برای قسمت حقیقی ضریب شکست انتخاب نشده است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی نیرومند و جامع برای استخراج پارامترهای محیطی ساختارهای مختلف فرامواد ارائه گردید که علاوه بر اصلاح الگوریتم‌های موجود، توانایی آن را دارد که پارامترهای مورد نیاز را در تمام باند فرکانسی تحت بررسی استخراج نماید. این امر با اعمال رابطه کرامرز-کرونینگ - که در برگزیده قانون علیت می‌باشد- به الگوریتم‌های موجود صورت پذیرفت. افزون بر این در این نوشتار برای حصول اطمینان از توانایی الگوریتم حاصل، پارامترهای محیطی چندین ساختار مختلف را با

استفاده از آن استخراج نمودیم و مشاهده کردیم که این الگوریتم می‌تواند بدون هیچ‌گونه ابهامی نیازهای ما را برآورده سازد.

## مراجع

- [1]. V.G, Veselago, "The Electrodynamics of substances with simultaneously negative value of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," SOVIET Physics Uspekhi, Jan-Feb 1968, vol. 10, NO 4, pp 56-198.
- [2]. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, vol. 47, issue 11, pp. 2075-2084.
- [3]. D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permittivity and permeability," Phys. Rev. letter, 2000, vol. 84, no 18, pp. 89-128.
- [4]. A. M. Nicolson and G. F. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques," IEEE Trans. Instrum. Meas., 1970, vol. IM-19, no. 4, pp. 377-382.
- [5]. X. Chen, T. M. Grzegorzcyk, B.-I. Wu, J. Pacheco, and J. A. Kong, "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials," Phys. Rev. E, 2004, vol. 70, 016608.
- [6]. D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic Parameter Retrieval from inhomogeneous metamaterials," Phys. Rev. E, 2005, vol. 71, 036617
- [7]. V. Lucarini, J. J. Saarinen, K. E. Peiponen, and E. M. Vartiainen, "Kramers-Kronig Relation in Optical Materials Research," Springer Series

in optical sciences, 2004,pp.29-41.

[8]. T. Koschny, P. Markos, D. R. Smith, and C. M. Soukoulis, “Resonant and antiresonant frequency dependence of the effective parameters of metamaterials,” *Phys. Rev. E* , 2003, vol. 68, no 065602,pp.115-165.

[9]. B.I. Wu, W. Wang, J. Pacheco, X. Chen, T. Grzegorzcyk, and J. A. Kong, “A study of using metamaterials as antenna substrate to enhance gain,” *PIER* ,2005, vol. 51, pp.295–328.

[10]. Ruopeng Liu, Tie Jun Cui, Da Huang, Bo Zhao and David R. Smith, “Description and explanation of electromagnetic behaviors in artificial metamaterials based on effective medium theory,” *Phys. Rev E*, 2007, vol. 76, 026606.

