



---

# گزارش نهایی متامتریال

---

نویسنده: نسرین کریمی

شماره دانشجویی: ۴۰۱۴۴۸۱۴۷

جناب آقای دکتر کریمیان

متامتریال – پاییز ۱۴۰۱



## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل ۱ - آشنایی با فرامواد.....	۱
۱-۱- معرفی و تاریخچه .....	۱
۱-۲- فرامواد ترکیب شده‌ی راست‌دستی و چپ‌دستی (CRLH).....	۳
۱-۳- گروه‌بندی فرامواد ها .....	۴
۱-۴- باند توقف (Bandgap) .....	۴
۱-۵- کایرال (Chiral) .....	۵
۱-۶- کاربردهای فرامواد .....	۵
فصل ۲- راهنمایی برای روش عمومی طراحی فیلتر .....	۶
فصل ۳- شبیه سازی در نرم افزار ADS .....	۹
فصل ۴- شبیه سازی در نرم افزار CST .....	۱۰
۴-۱- جزئیات طراحی: .....	۱۲
۴-۲- شرط موثر همگنی: .....	۱۳
۴-۳- نتیجه گیری: .....	۱۳
فصل ۵- طراحی در نرم افزار Altium Designer .....	۱۴
منابع.....	۱۶

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
شکل ۱-۱ ..... ۲	سیم نازک (TW) و رزوناتور حلقه‌ای شکافی (SRR) ..... ۲
شکل ۱-۲ ..... ۲	ساختار چپ‌دستی تک‌بعدی و ساختار چپ‌دستی چندبعدی ..... ۲
شکل ۱-۳ ..... ۳	مدار معادل یک خط انتقال ایده آل CRLH ..... ۳
شکل ۲-۱ ..... ۶	شبکه نردبانی خط انتقال غیرمتعادل CRLH ..... ۶
شکل ۳-۱ ..... ۹	تصویر ورودی نرم افزار ADS ..... ۹
شکل ۴-۱ ..... ۱۰	تصویری از محیط نرم افزار CST ..... ۱۰
شکل ۴-۲ ..... ۱۱	شکل طراحی شده برای پروژه نهایی متامتریال در نرم افزار CST ..... ۱۱
شکل ۴-۳ ..... ۱۱	S11 ..... ۱۱
شکل ۴-۴ ..... ۱۲	S21 ..... ۱۲
شکل ۴-۵ ..... ۱۲	S11 و S22 ..... ۱۲
شکل ۵-۱ ..... ۱۴	Top Layer ..... ۱۴
شکل ۵-۲ ..... ۱۴	Bottom Layer ..... ۱۴
شکل ۵-۳ ..... ۱۵	نمای کلی ..... ۱۵
شکل ۵-۴ ..... ۱۵	چاپ نهایی PCB ..... ۱۵

## فصل ۱- آشنایی با فرامواد

فرامواد یا متامتریال (Metamaterial) ماده‌ای است که در طبیعت وجود ندارد و به صورت مهندسی شده آن را با استفاده از مواد موجود در طبیعت می‌سازند. به عنوان مثال با استفاده از ترکیب چند عنصر مانند فلزها و پلاستیک می‌توان شرایطی محیا کرد که خاصیت فراموادی داشته باشند. از ماده‌ی جدید ساخته شده می‌توان در کنترل موج‌های الکترومغناطیسی از طریق فیلتر کردن، جذب، افزایش یا حذف موج‌های ناخواسته استفاده کرد. یکی از ویژگی خاصی که فرامواد دارد، منفی بودن ضریب شکست است که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است.

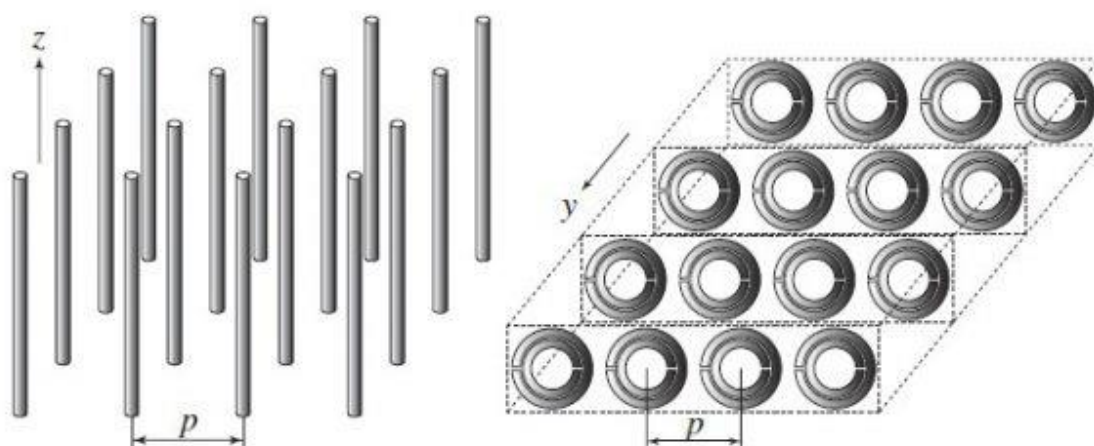
### ۱-۱- معرفی و تاریخچه

اولین بار بحث در مورد وجود این نوع ماده توسط فیزیکدان روسی ویکتور وسلایگو (Viktor Veselago) در سال ۱۹۶۷ میلادی مطرح شد. وسلایگو این مواد را به عنوان مواد چپ‌دستی (LH) مطرح کرد تا برای همه اثبات کند که این مواد می‌توانند موج‌های الکترومغناطیسی را با استفاده از میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و بردارهای ثابت فاز با خاصیت چپ‌دستی بودن در مقایسه با مواد موجود مرسوم که به عنوان مواد راست‌دستی (RH) شناخته شده‌اند، منتشر کند.

بعد از مقاله‌ی وسلایگو در مورد مواد چپ‌دستی بیش از ۳۰ سال طول کشید تا اولین فراماده‌ی چپ‌دستی به صورت آزمایشگاهی ساخته شود. این ماده در طبیعت وجود ندارد اما بصورت مصنوعی با استفاده از کنار هم قرار دادن ساختارهای همگن می‌توان بوجود آورد.

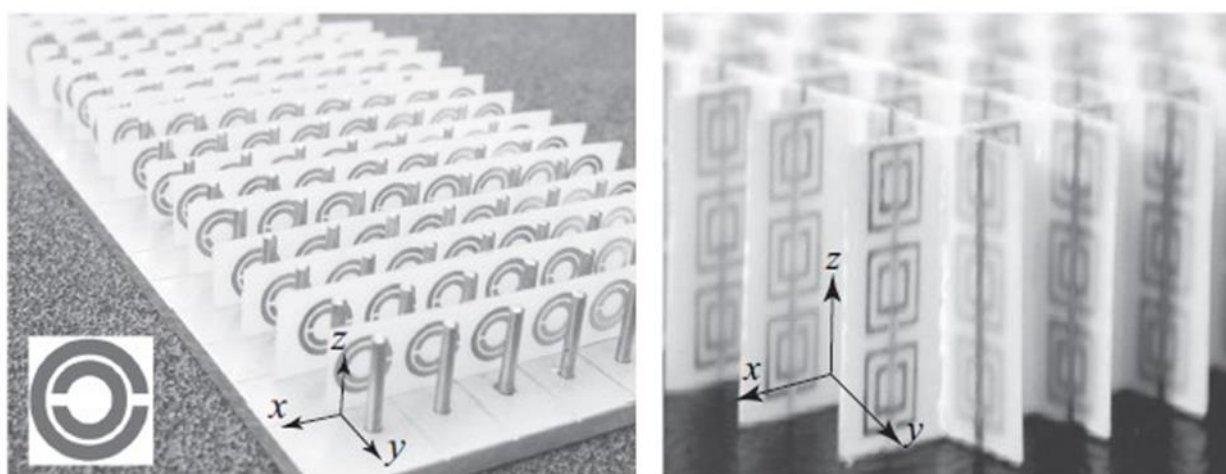
این آزمایش توسط اسمیت و همکارانش در سال ۲۰۰۰ میلادی در دانشگاه کالیفرنیا، سن دیگو انجام شد. اسمیت و همکارانش برای ساخت این ماده از کارهای پندری (Pendry) الهام گرفتند. همانطور که می‌دانید ضریب شکست شامل دو پارامتر است، یکی ضریب گذردهی الکتریکی ( $\epsilon$ ) و دیگری ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ ).

ساختاری که پندری معرفی کرد ساختارهایی با  $\epsilon$  منفی /  $\mu$  مثبت با نام سیم نازک (TW) و  $\epsilon$  مثبت /  $\mu$  منفی با نام رزوناتور حلقه‌ی شکافی (SRR) که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ سیم نازک (TW) و رزوناتور حلقه‌ای شکافی (SRR)

اسمیت و همکارانش از این دو ساختار الهام گرفته و با ترکیب آنها توانستند اولین فرامواد چپ‌دستی را بصورت آزمایشگاهی تولید کنند. در شکل ۱-۲ ساختار پیشنهادی آنها نمایش داده شده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی این نوع ساختارها اندازه‌ی کوتاه‌تر از طول موج آنها است که موج‌های الکترومغناطیسی را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد.



شکل ۱-۲ ساختار چپ‌دستی تک‌بعدی و ساختار چپ‌دستی چندبعدی

متامتریال‌های الکترومغناطیسی به صورت کلی اینگونه تعریف شده‌اند که سازه‌هایی الکترومغناطیسی موثرًا همگن مصنوعی با خواص غیرمعمول که بصورت طبیعی وجود ندارند هستند. یک سازه موثرًا همگن، سازه‌ای است که میانگین اندازه سلول واحد سازنده آن  $p$ ، بسیار کوچکتر از طول موج هدایت شده  $\lambda_g$  باشد.

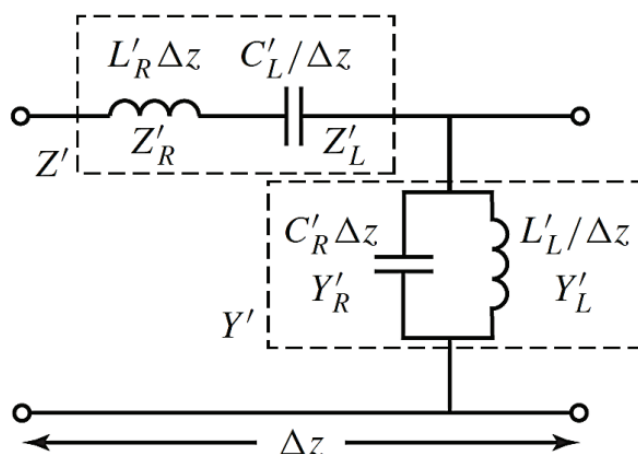
به این ترتیب ما نیز حد شرط موثرًا همگن را برابر  $p = \frac{\lambda_g}{4}$  در نظر می‌گیریم.

## ۱-۲- فرامواد ترکیب شده‌ی راست‌دستی و چپ‌دستی (CRLH)

مفهوم و پایه‌ی اصلی CRLH توسط کالز (Caloz) معرفی شد. این نوع ساختار یک فرامواد با پهنای باند زیاد تولید می‌کند که شامل خازن‌های سری و سلف‌های موازی است تا بتواند خاصیت چپ‌دستی را در ساختار بوجود آورد. با استفاده از این ساختار براحتی می‌توان مدار معادل فرامواد را تحلیل و بررسی و ویژگی‌های مورد نیاز برای ساختارهای جدید را استخراج کرد.

ساختارهای خط انتقالی متامتریال‌های CRLH شامل خازن‌های (اینتردیجیتال) سری  $C_L$  و سلف (استاب) موازی  $L_L$  است که مسئول چپگردی می‌باشند. هرچند با انتشار موج در امتداد ساختارها، جریان‌ها و ولتاژها تأثیرات طبیعی دیگری را القا می‌کنند. با شار جریان در امتداد  $C_L$ ، شار مغناطیسی القا شده و بنابراین، اندوکتانس‌های سری  $L_R$  نیز ظاهر می‌شود.

بعلاوه، گرادیان‌های ولتاژی بین هادی‌های فوقانی صفحه زمین وجود دارند که با خازن موازی  $C_R$  همخوانی دارند.



شکل ۱-۳ مدار معادل یک خط انتقال ایده آل CRLH

مشخصه‌های فرکانسی را بصورت زیر بدست می‌آوریم:

$$\omega'_R = \frac{1}{\sqrt{L'_R C'_R}} \quad (\text{rad}\cdot\text{m})/\text{s}$$

$$\omega'_L = \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_L}} \quad \text{rad}/(\text{m}\cdot\text{s})$$

$$\kappa = L'_R C'_L + L'_L C'_R \quad (\text{s}/\text{rad})^2$$

فرکانس‌های رزونانسی سری و موازی نیز به ترتیب از فرمول‌های زیر بدست خواهند آمد:

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L'_R C'_L}} \quad \text{rad/s}$$

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_R}} \quad \text{rad/s}$$

### ۳-۱- گروه‌بندی فراموادها

فراموادهای الکترومغناطیسی به چندین گروه مختلف تقسیم می‌شوند که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌کنیم.

#### ضریب شکست منفی:

در این نوع مواد ضریب شکست دارای علامت منفی می‌باشد یعنی ضریب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی هر دو دارای علامت منفی هستند و نتیجه یک انعکاس منفی خواهد بود. این مواد اغلب به عنوان فرامواد دو برابر منفی (DNG) نیز معرفی می‌شوند. در مواد نوری اگر هر دو ضریب مثبت باشند، موج بصورت رو به جلو تشعشع خواهد کرد اما در حالی که هر دو ضریب منفی باشند موج رو به عقب تشعشع می‌کند. یک حالت دیگر نیز وجود دارد که شرط منفی بودن هر دو ضریب وجود دارد اما قطبی شدگی آنها متفاوت است که در این شرایط موج تشعشع نخواهد کرد.

#### تک منفی:

در این نوع ماده فقط یکی از ضریب‌ها دارای علامت منفی است که به آن فرامواد تک منفی (SNG) می‌گویند. این نوع مواد وقتی با سایر مواد تک منفی ترکیب می‌شوند خاصیت فراموادی به خود می‌گیرند. بیشتر مواد پلاسمایی دارای این ویژگی هستند. به عنوان مثال موادی که فقط ضریب گذردهی الکتریکی آنها منفی و ضریب نفوذپذیری آنها مثبت هستند می‌توان به طلا و نقره اشاره کرد. در مقابل موادی که فقط نفوذپذیری منفی دارند می‌توان به مواد ژیروتروپیک (Gyrotropic) اشاره کرد که خاصیت نوری - مغناطیسی از خود نشان می‌دهند.

### ۴-۱- باند توقف (Bandgap)

فرامواد باند توقفی مغناطیسی (EBG) برای کنترل انتشار نور استفاده می‌شوند. این نوع موادهای به اسم کریستال‌های فوتونیک (PC) نیز معرفی شده‌اند. مواد EBG با استفاده از ساختارهای دی‌الکتریک، متناوب ساخته می‌شوند که دارای تلفات کم و کیفیت بالا هستند. این نوع مواد بر روی فوتون‌ها تأثیر می‌گذارند و اثر خیلی شبیه به تأثیر مواد نیمه‌هادی بر روی الکترون‌ها است.

هدف از طراحی EBG را می‌توان حذف خاصیت انتشار در پهنای باند فرکانسی دلخواهی بیان کرد که نمی‌خواهیم ساختار در آن محدوده انتشار داشته باشد. بنابراین برای تحقق این امر از ساختارهایی با شکل‌ها و زوایای مختلف استفاده شده است و همچنان محققان در حال تحقیق و بررسی ساختارهای جدید در این زمینه هستند.

## ۱-۵- کایرال (Chiral)

در ساختار فرامواد کایرالی از مواد کایرال استفاده شده است. کایرال را می‌توان به عنوان یک عنصر یا مولکولی تعریف کرد که دارای خاصیت آینه‌ای هستند، بطوریکه با دقت بیشتر در ساختار آنها می‌توان یک نوع تکرار را در آنها بصورت آینه‌ای ملاحظه کرد. کایرال در زبان یونانی به معنای دست انسان نیز تعریف می‌شود که تکرار شدن ساختار بصورت قرار گرفتن دست راست در کنار دست چپ بیان می‌شود.

## ۱-۶- کاربردهای فرامواد

فرامواد تحت یک سری شرایط خاص برای کاربردهای مختلفی قابل استفاده هستند. امروزه آنتن‌های فرامواد در صنعت در دسترس هستند. هدف استفاده از فرامواد در آنتن چیزی جز بهبود عملکرد آن نیست. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که فرامواد باعث تقویت توان تشعشی در آنتن می‌شود. همچنین باعث کاهش اندازه‌ی کل آنتن می‌شود.

یکی دیگر از کاربردهای فرامواد استفاده از آنها در جاذب‌ها است. نحوه‌ی عملکرد آن بدین صورت است که با برخورد موج بر سطح آن بتواند مقدار زیادی از تشعشع الکترومغناطیسی را جذب کند. از ساختارهای پرکاربرد در این زمینه می‌توان به آشکارسازهای نوری و سلول‌های خورشیدی اشاره کرد.

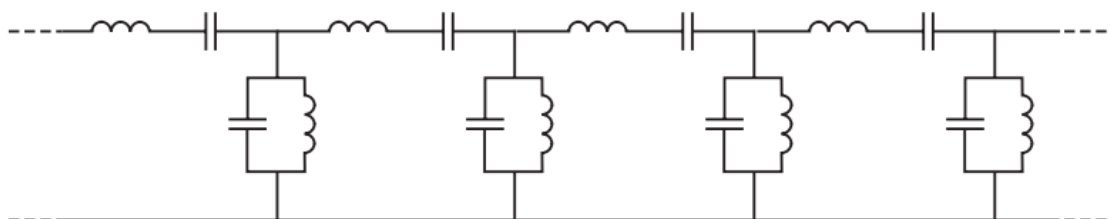
یکی از مهم‌ترین کاربردهای فرامواد، استفاده از آن در دستگاه‌های پوششی است. با توجه به خاصیت فرامواد در حذف فرکانس‌های ناخواسته می‌توان ساختارهایی طراحی کرد که خاصیت نامرئی سازی دارند و می‌توانند دیده نشوند. بدین صورت که وقتی نور بر سطح آن برخورد می‌کند، مانع از برگشت نور شده و در نتیجه نمی‌توان آن را با چشم دید.



## فصل ۲- راهنمایی برای روش عمومی طراحی فیلتر

می توان فیلتر را با استفاده از خطوط انتقال طراحی کرد. برای این منظور از راهنمای زیر استفاده می کنیم.

خط انتقال متناوب CRLH شکل زیر را در نظر بگیرید:



شکل ۲-۱ شبکه نردبانی خط انتقال غیرمتعادل CRLH

دستورالعمل های معمول برای طراحی یک ساختار واقعی خط انتقال CRLH ممکن است به شرح زیر باشد:

ابتدا یک فرکانس انتقال مناسب را انتخاب کنید، همانطور که توسط معادله زیر داده شده است:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt[4]{L_R C_R L_L C_L}} = \sqrt{\omega_R \omega_L} = \sqrt{\omega_{se} \omega_{sh}},$$

و تعریف کرده ایم:

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}}, \quad \omega_L = \frac{1}{\sqrt{L_L C_L}}, \quad \omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \quad \omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}.$$

فرکانس انتقال  $\omega_0$  بسته به کاربرد، نقش های مختلفی را ایفا می کند، اما به طور کلی مرکز پهنای باند عملیاتی را نشان می دهد.

شرایط تطبیق معادله زیر را به پورت های امپدانس  $Z_0$  اعمال کنید.

$$Z_R = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = Z_0,$$

$$Z_c = Z_L = Z_R, \quad Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} = Z_0.$$

معادلات زیر سه معادله را در چهار مجهول  $C_L$ ,  $L_L$ ,  $C_R$ ,  $L_R$  نشان می دهند. بنابراین، یک درجه آزادی باقیمانده برای یکی از این چهار متغیر وجود دارد که ممکن است برای برآوردن برخی محدودیت‌های تکنولوژیکی یا نیازهای کاربردی، مانند پهنای باند، مورد سوء استفاده قرار گیرد. نشان داده شد که پهنای باند از فرکانس قطع LH بالا گذر  $\omega_{cL}$  به فرکانس قطع RH پایین گذر  $\omega_{cR}$  با معادله اولی در حالت متعادل و با فرمول های پیچیده تر معادله دومی در حالت نامتعادل داده می شود. توجه داشته باشید که این cut off ها به تعداد سلول ها بستگی ندارد بلکه فقط به مقدار پارامترهای LC بستگی دارد. بنابراین پهنای باند کسری ممکن است به صورت زیر نوشته شود:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt[4]{L_R C_R L_L C_L}} = \sqrt{\omega_R \omega_L} = \sqrt{\omega_{se} \omega_{sh}},$$

$$Z_R = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = Z_0,$$

$$Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} = Z_0.$$

$$\omega_{cL}^{bal} = \omega_R \left| 1 - \sqrt{1 + \frac{\omega_L}{\omega_R}} \right|,$$

$$\omega_{cR}^{bal} = \omega_R \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\omega_L}{\omega_R}} \right).$$

$$FBW = 2 \frac{(\omega_{cR} - \omega_{cL})}{(\omega_{cL} + \omega_{cR})},$$

که ممکن است معادله چهارم را برای تعیین  $C_L$ ,  $L_L$ ,  $C_R$ ,  $L_R$  تشکیل دهد.

تعداد مناسب سلول  $N$  را برای کاربرد خاص انتخاب کنید. به عنوان مثال، در یک آنتن با موج نشتی (LW)، جهت دهی به دیافراگم تابش و در نتیجه به طول کل خط  $N.p$  بستگی دارد، جایی که  $p$  طول سلول واحد است به طوری که  $N$  باید به درستی تنظیم شود. (برای جهت دهی مورد نظر)

اکنون می توان شبکه را به صورت عملی با تولید اندوکتانس های  $L_L$ ,  $L_R$  و ظرفیت های  $C_L$ ,  $C_R$  با سلف ها و خازن های واقعی پیاده سازی کرد. دو گزینه اصلی برای این عناصر واکنشی موجود است: اجزای تراشه فناوری نصب سطحی (SMT) یا اجزای توزیع شده. تراشه SMT محدودیت های مهمی برای MTM ها دارد: (۱) به دلیل رزونانس خود به فرکانس های پایین (معمولاً ۳-۶ گیگاهرتز، بسته به مقادیر آنها) محدود می شوند. (۲) آنها فقط در مقادیر گسسته ارائه شده توسط تولید کنندگان در دسترس هستند. (۳) آنها را نمی توان در فناوری های سازگار با MIC/MMIC پیاده سازی کرد. (۴) کنترل ویژگی های EM آنها دشوار است. (۵) آنها را نمی توان به راحتی برای کاربردهای تشعشع استفاده کرد. (۶)

آنها به ساختارهای مداری منتهی می شوند در حالی که ما در نهایت می خواهیم موادی ایجاد کنیم که در آینده باید توسط فرآیندهای نیمه هادی یا نانوتکنولوژی تولید شوند. به این دلایل، اجزای توزیع شده معمولاً ارجح هستند. فناوری باید برای اجرای خط انتخاب شود.

این فناوری می تواند یک میکرو نوار، موجبر همسطح، خط نوری یا هر نوع دیگری باشد.

هنگامی که یک فناوری انتخاب شد، باید تصمیم بگیریم که چگونه سلف ها و خازن ها را بسازیم. به عنوان مثال در فناوری میکرواستریپ، سلف ها را می توان به شکل نوارهای سلف مارپیچی یا نوارهای خرد ساده پیاده سازی کرد، در حالی که خازن ها ممکن است در ساختارهای بین دیجیتالی یا فلزی-عایق - فلزی (MIM) اجرا شوند. متأسفانه، فقط فرمول های سنتز بسیار نادرست برای سلف ها و خازن های توزیع شده در دسترس هستند، و بنابراین ما آنها را با جزئیات توصیف نمی کنیم. در نهایت، یک طراحی دقیق نیاز به شبیه سازی های تمام موج دارد. سپس پارامترهای LC استخراج شده و در مدل شبکه LC وارد می شوند. رویه طراحی ممکن است لازم باشد چند بار برای تولید و طراحی بهینه تکرار شود. اگرچه سنتز تنها با تجزیه و تحلیل تکراری در دسترس است، یک مدل استخراج خوب ابزارهایی را برای طراحی دقیق و کارآمد فراهم می کند.

پارامترهای مشخصه شبکه خط انتقالی CRLH موثرها همگن در نهایت توسط روابط زیر تعیین می شود:

$$L'_R = \frac{L_R}{p}, \quad C'_R = \frac{C_R}{p}, \quad L'_L = L_L \cdot p, \quad C'_L = C_L \cdot p,$$

که در آن  $p$  هنوز طول فیزیکی سلول واحد را نشان می دهد. به عنوان مثال، CL یک خازن MIM معمولاً کوچکتر از خازن بین دیجیتالی خواهد بود، زیرا یک خازن معین (مثلاً ۱ pF) را می توان با طول کمتری در ساختار MIM نسبت به ساختار بین دیجیتالی به دست آورد که فقط لبه ضعیفی دارد. جفت وجود دارد. (با فاصله کم و گذردهی بالا). هنگامی که پارامترهای مشخصه یافت شدند، در صورت لزوم می توان از تحلیل تقریبی TL همگن استفاده کرد.

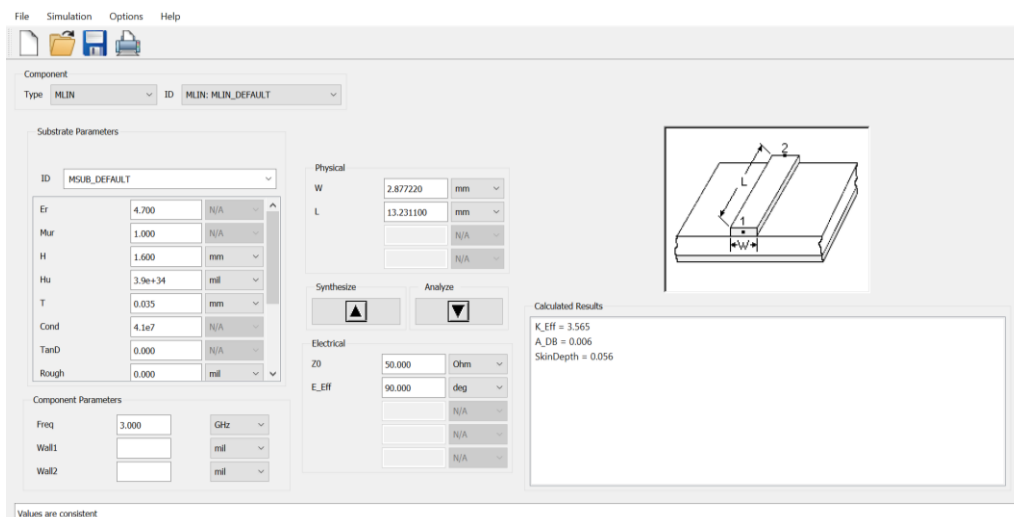
## فصل ۳ - شبیه سازی در نرم افزار ADS

نرم افزار ADS ادونس دیزاین سیستم (Advanced Design System (ADS) یا سیستم طراحی پیشرفته، از جمله قدرتمندترین محصولات شرکت Keysight و در واقع یک نرم افزار اتوماسیون طراحی الکترونیکی است که ابزار طراحی بسیار قدرتمند و محیط طراحی یکپارچه‌ای را در اختیار مهندسين مایکروویو و طراحان محصولات الکترونیکی RF مانند تلفن‌های همراه، پیجرها، شبکه‌های بی‌سیم، ارتباطات ماهواره‌ای، سیستم‌های رادار و لینکهای داده پرسرعت قرار می‌دهد. نرم افزار ADS از تمامی مراحل فرآیند طراحی شامل تصویربرداری شماتیک، طرح بندی، بررسی قوانین طراحی، شبیه سازی مدار دامنه فرکانس و دامنه زمان، و شبیه‌سازی میدان الکترومغناطیسی پشتیبانی می‌کند، که این امر، به مهندسين اجازه می‌دهد تا بدون تغییر ابزار، یک طراحی RF را به طور کامل توصیف و بهینه سازی کنند.



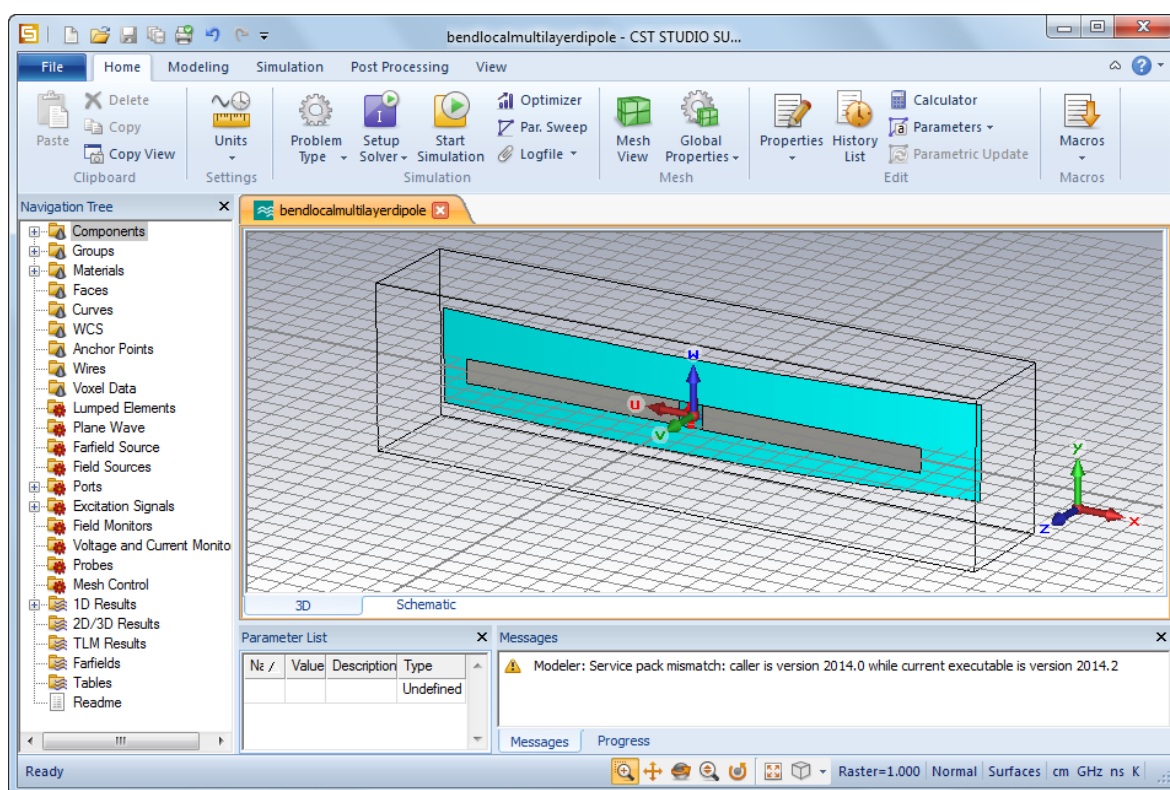
شکل ۳-۱ تصویر ورودی نرم افزار ADS

حال فرکانس ۳ گیگاهرتز را به دلخواه انتخاب کرده و از طریق tools و در مرحله بعد linecalc طول و عرض مورد نیاز را بدست آورديم:



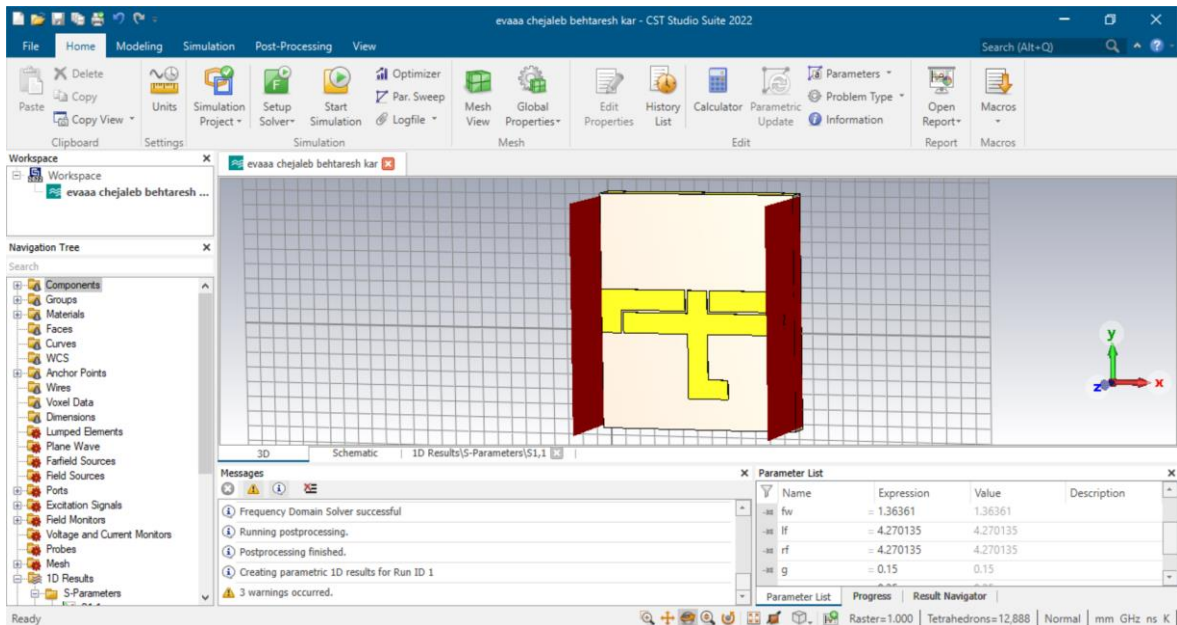
## فصل ۴ - شبیه سازی در نرم افزار CST

نرم افزار CST Studio Suite یک پلتفرم کامل از ابزارهایی است که به منظور آنالیز و طراحی الکترومغناطیس استفاده می شود. این نرم افزار متشکل از چندین ماژول قدرتمند مختلف است که در محیطی یکپارچه اغلب مسائل مربوط به الکترومغناطیس را دربردارد و می توان از آن برای طراحی، شبیه سازی و بهینه سازی های مختلفی استفاده کرد. فراگیری CST برای بررسی امواج الکترومغناطیس برای مهندسين برق بسیار مفید و کاربردی است و به کمک آن می توان بسیاری از مسائل مختلف الکترومغناطیس را در محیط سه بعدی و برای خواسته های متعدد، حل و آنالیز کرد.



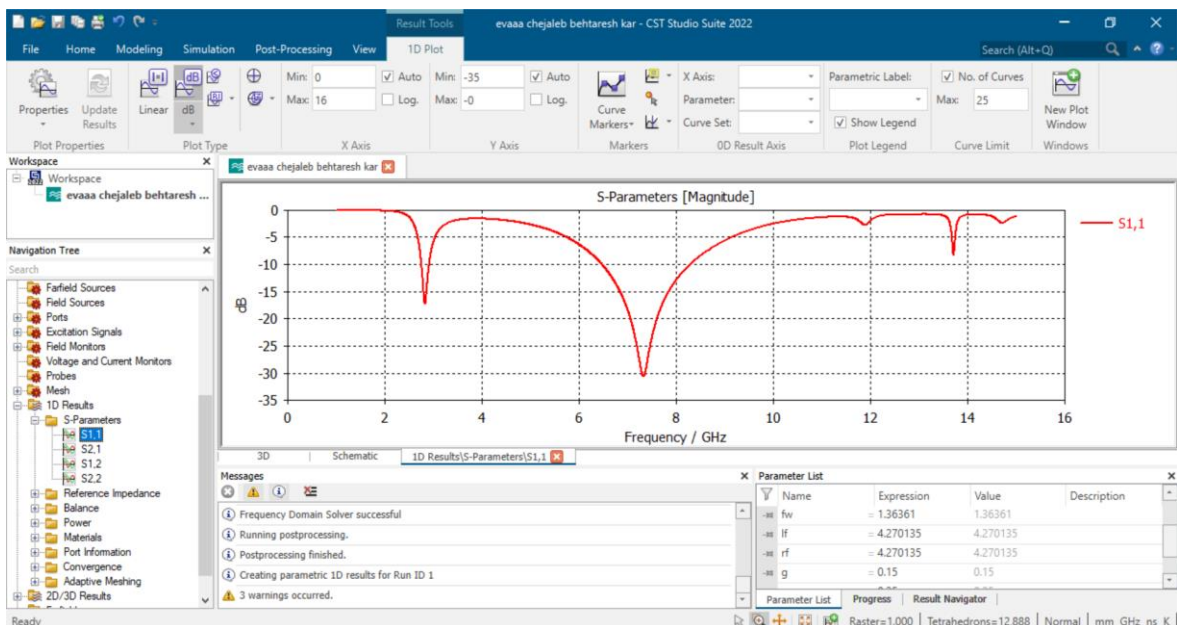
شکل ۴-۱ تصویری از محیط نرم افزار CST

حال با فرض پارامترهایی برای سادگی طراحی و سیمولیت به پیاده سازی طرح در نرم افزار پرداختیم. این طراحی پس از شبیه سازی اشکال و طرح های متعدد بدست آمده است:



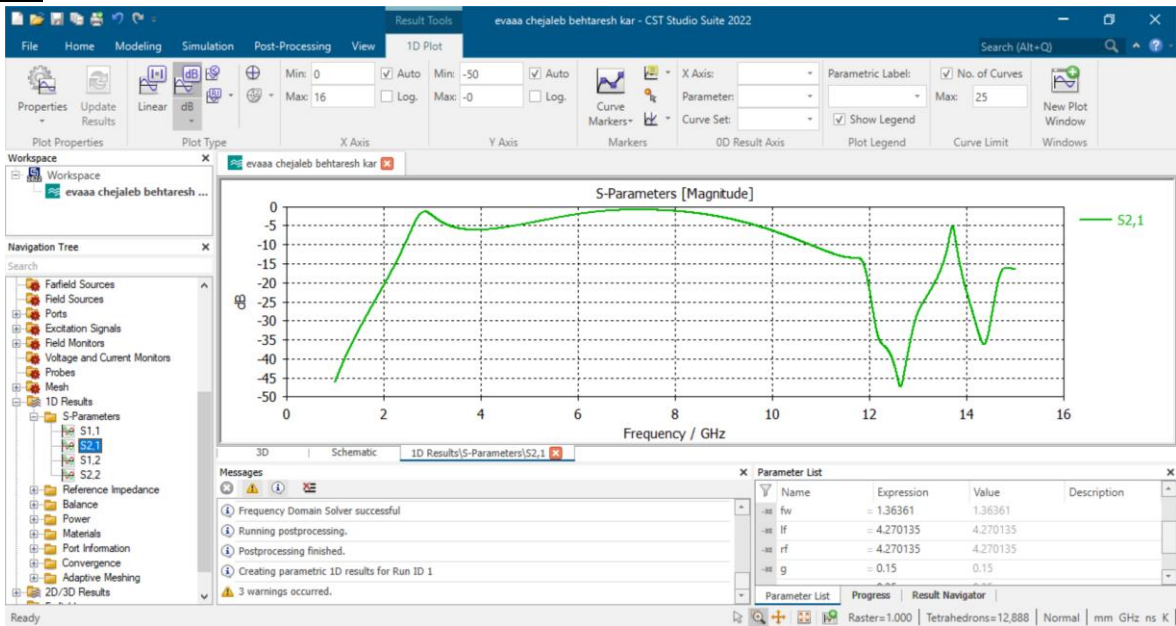
شکل ۴-۲ شکل طراحی شده برای پروژه نهایی متامتریال در نرم افزار CST

حال نتایج شبیه سازی را با هم مرور می کنیم:

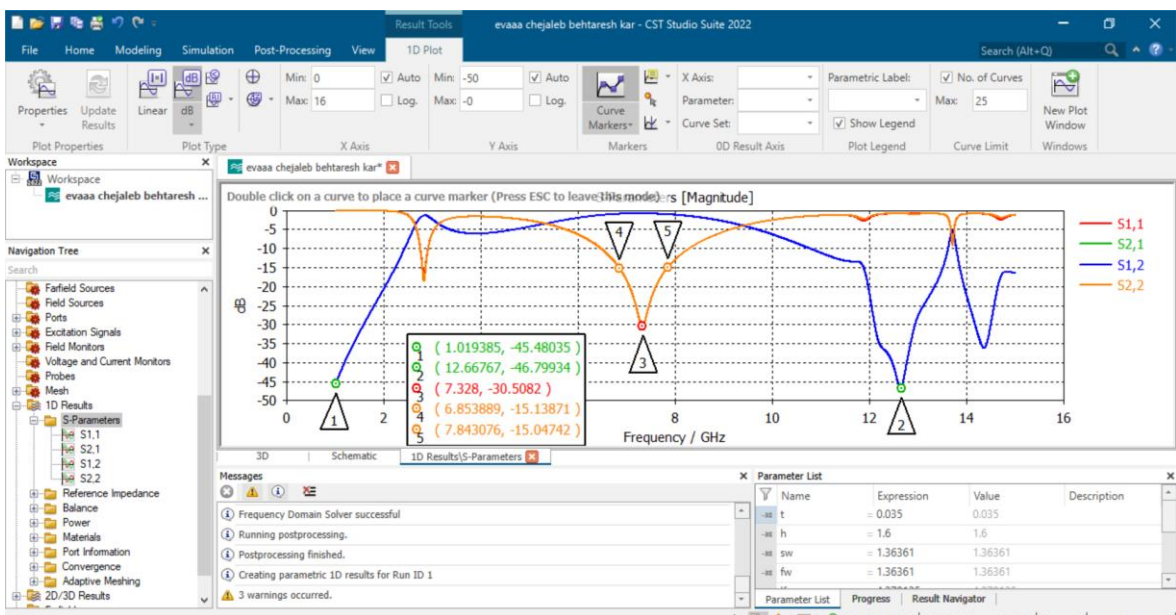


شکل ۴-۳ S11





شکل ۴-۴ S21



شکل ۴-۵ S11 و S22

#### ۴-۱- جزئیات طراحی:

سابستريت از جنس FR4-LOSSY انتخاب گردید که  $\epsilon = 4.7$  بصورت جداگانه تغيير و تنظيم گشت.

$$g = 0.15 \text{ mm}$$

$$h = 1.6 \text{ mm}$$

$$f = 3 \text{ GHz}$$



$$r_{via} = 0.25 \text{ mm}$$

$$t = 0.035 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = 4.7$$

$$L_L \approx \frac{Z_c^{\text{si}}}{\omega} \tan(\beta^{\text{si}} \ell^{\text{si}}),$$

$$C_L \approx (\varepsilon_r + 1) \ell^{\text{ic}} [(N - 3)A_1 + A_2] \quad (\text{pF}),$$

$$A_1 = 4.409 \tanh \left[ 0.55 \left( \frac{h}{w^{\text{ic}}} \right)^{0.45} \right] \cdot 10^{-6} \quad (\text{pF}/\mu\text{m}),$$

$$A_2 = 9.92 \tanh \left[ 0.52 \left( \frac{h}{w^{\text{ic}}} \right)^{0.5} \right] \cdot 10^{-6} \quad (\text{pF}/\mu\text{m}),$$

**۴-۲- شرط موثر ا همگنی:**

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\varepsilon_{eff}}} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9 \sqrt{4.7}} \cong 0.0461 \text{ m} \rightarrow \frac{\lambda_g}{4} = 0.0115 \text{ m}$$

**۴-۳- نتیجه گیری:**

اضافه کردن تکه استاب در پایین باعث بهبود out of band rejection شد و در نهایت ما توانستیم یک فیلتر باند میانی در فرکانس مورد نظر طراحی کنیم.



## فصل ۵- طراحی در نرم افزار Altium Designer

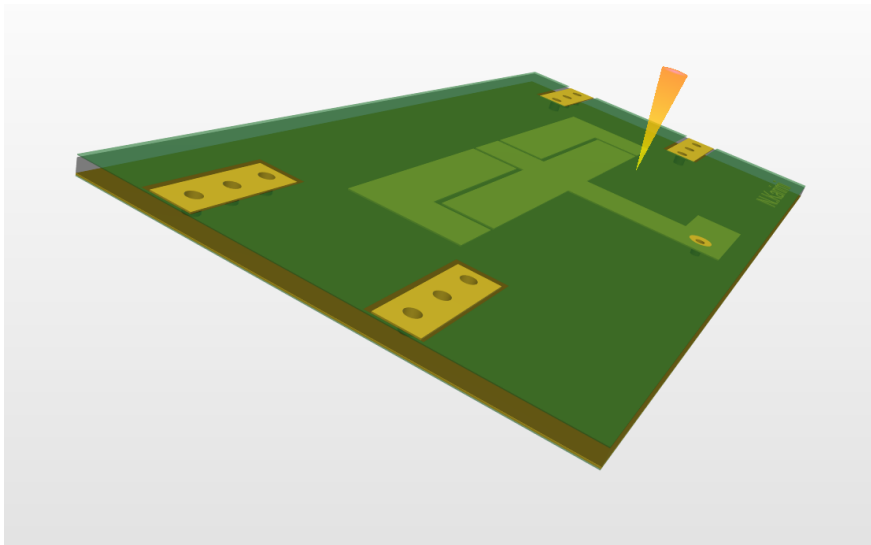
Altium Designer نرم افزار قدرتمندی که برای پیاده سازی شماتیک ، طراحی PCB و آنالیز مدارهای آنالوگ و برخی مدار های دیجیتالی طراحی شده است. یکی از مزایای نرم افزار Altium Designer دسته بندی مناسب کتابخانه ها به نحوی است که با صرف زمان کوتاهی قطعه مورد نظر را خواهیم یافت. آنالیز مدارهای آنالوگ در پروتل، توسط تحلیل گر پی اسپایس انجام می شود. محیط طراحی PCB در پروتل، بدلیل داشتن کتابخانه هایی کامل و بدون نقص معروف است و این امر سبب رفاه بیشتر کاربر در حین طراحی انواع PCB با این نرم افزار، خواهد شد. در این نسخه امکان شبیه سازی و کد نویسی برخی از FPGA ها نیز فراهم شده است که زمان طراحی و پیاده سازی را حداقل می کند. حال طراحی را به محیط این نرم افزار انتقال می دهیم:



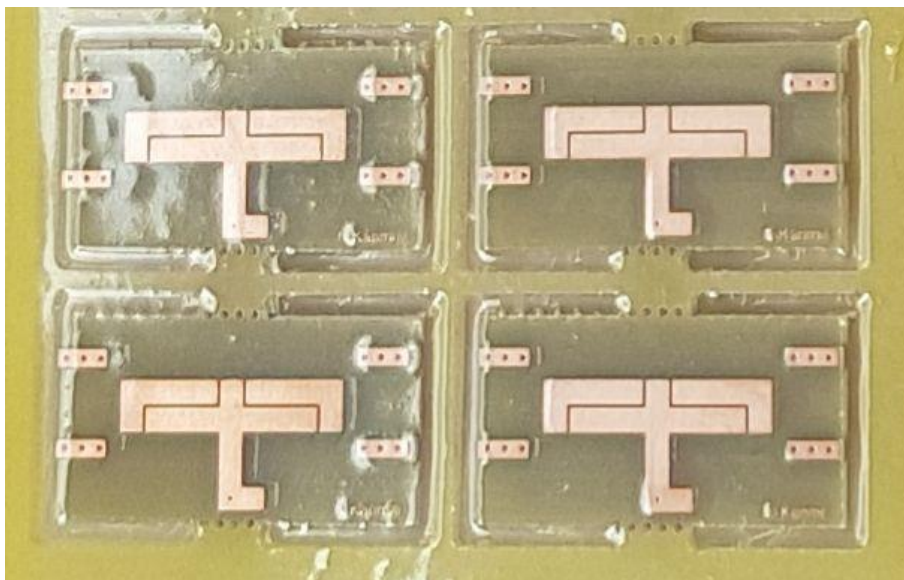
شکل ۵- ۱ Top Layer



شکل ۵- ۲ Bottom Layer



شکل ۵-۳ نمای کلی



شکل ۵-۴ چاپ نهایی PCB

جزئیات طراحی: تکنولوژی Thick PCB - Film



## منابع

C. Caloz, T. Itoh, Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications, John Wiley and Sons, Inc., 2006, pp. 3–132, 235. J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.