



Simulation of Electromagnetic Fields and Characteristics of Twisted Waveguides with Elliptical Cross Section Containing Plasma for X-Band Applications

Mahsa Mikaeili¹, Abbas Abdoli Arani^{2*} 

¹ PhD Student, University of Kashan, Kashan, Iran

² Associate Professor, University of Kashan, Kashan, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history: Article Type: Research paper Receive: 07 December 2025 Revise: 26 January 2026 Accept: 12 February 2026 Available online: 23 August 2026 Keywords: Twisted Elliptical Waveguide EW77 Waveguide Electromagnetic Fields	In this research, the electromagnetic characteristics of a twisted elliptical waveguide, EW77, filled with plasma and bounded by Perfect Electric Conductor and Perfect Magnetic Conductor walls are numerically investigated using COMSOL Multiphysics. The behavior of electromagnetic fields in the presence of plasma, along with the controllability of transmission and reflection characteristics in the X-band frequency range, is examined. For each configuration, the dispersion relation and scattering parameters are plotted over a specified frequency range. The behavior of electromagnetic fields for different twist rates and frequencies is analyzed using the finite element method based simulation approach. The numerical and simulation results indicate that the twisted EW77 waveguide exhibits low reflection and high power transmission. Furthermore, the presence of plasma leads to change in the reflection and transmission of power at specific frequencies.

Cite this article: M Mikaeili and A Abdoli Arani, Simulation of Electromagnetic Fields and Characteristics of Twisted Waveguides with Elliptical Cross Section Containing Plasma for X-Band Applications. *Applied Electromagnetics*. vol. 13, no. 2, pp. 83- 94, 2026.

DOR: <https://????????????>



© The Author(s). retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

شبیه سازی میدان ها و ویژگی های الکترومغناطیسی موج بر های پیمشی با سطح مقطع بیضوی حاوی پلازما برای کاربردهای باند X

مهسا میکائیلی باغی^۱، عباس عبدلی آرانی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲ دانشیار، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده	مشخصات مقاله
در این پژوهش، ویژگی های الکترومغناطیسی موج بر بیضوی EW77 در حالت پیمشی و حاوی پلازما با دیواره ی رسانای الکتریکی کامل و دیواره ی رسانای مغناطیسی کامل به صورت عددی در نرم افزار کامسول بررسی می شود. همچنین رفتار میدان های الکترومغناطیسی در حضور پلازما و ارزیابی قابلیت کنترل پذیری مشخصه های انتقال و انعکاس امواج، در باند بسامدی X، بررسی می شود. در هر حالت رابطه پاشندگی و پارامترهای پراکندگی در بازه بسامدی مشخص ترسیم می شوند. رفتار میدان های الکترومغناطیسی برای نرخ پیمشی و بسامدهای مختلف با بهره گیری از روش شبیه سازی مبتنی بر المان محدود بررسی می شود. نتایج عددی و شبیه سازی نشان می دهند که موج بر EW77 پیمشی بازتاب پایین و انتقال توان بالایی از خود نشان می دهد. همچنین نتایج نشان می دهند که حضور پلازما موجب تغییر بازتاب و انتقال توان در بسامدهای خاص می شود.	تاریخچه مقاله: نوع مقاله: علمی - پژوهشی دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳ ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱ کلیدواژه ها: موج بر بیضوی پیمشی موج بر EW77 میدان های الکترومغناطیسی

استناد: مهسا میکائیلی باغی و عباس عبدلی آرانی، شبیه سازی میدان ها و ویژگی های الکترومغناطیسی موج بر های پیمشی با سطح مقطع بیضوی حاوی پلازما برای کاربردهای باند X، «الکترومغناطیس کاربردی»، (۲)۱۳: صص ۸۳-۹۴، (۱۴۰۵).

DOR: <https:// ??????????????>

© نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



مقدمه

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (۱)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (۲)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (۳)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (۴)$$

به معادله موج الکترومغناطیسی می‌توان رسید:

$$\nabla^2 \left(\frac{\vec{E}}{B} \right) - \epsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\vec{E}}{B} \right) = 0 \quad (۵)$$

لازم به ذکر است، برای بررسی تحلیلی میدان‌های الکترومغناطیسی موج‌برهای پیچشی نیاز به تغییر مختصات وجود دارد. این دستگاه مختصات با پیچش موج‌بر هم‌گام است و محورهای X و Y آن با چرخش سطح مقطع موج‌بر می‌چرخند. معادلات تبدیل ارائه شده، رابطه بین مختصات دکارتی ثابت (X, Y, Z) و مختصات پیچیده (x, y, z) که برای اعمال شرایط مرزی دقیق و تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی درون موج‌برهای پیچشی، ضروری هستند را، بیان می‌کند [۲۳]:

$$\begin{aligned} X &= x \cos az + y \sin az \\ Y &= -x \sin az + y \cos az \\ Z &= z \end{aligned} \quad (۶)$$

که در آن α نرخ پیچش بر حسب rad/m نامیده می‌شود. [۲۳]

همچنین پارامترهای پراکندگی که به روابط بین سیگنال‌های ورودی و خروجی در یک شبکه دو پورت اشاره دارند، به صورت ماتریسی نمایش داده می‌شوند و شامل چهار پارامتر اصلی هستند:

S_{11} : نسبت بازتاب در پورت ۱ (میزان سیگنالی که از پورت ۱ بازتاب می‌شود): این پارامتر نشان می‌دهد که چه مقدار از سیگنال ورودی به پورت ۱، بازتاب می‌شود.

S_{12} : نسبت انتقال از پورت ۱ به پورت ۲ (میزان سیگنالی که از پورت ۱ به پورت ۲ منتقل می‌شود): این پارامتر نشان‌دهنده میزان سیگنالی است که از پورت ۱ به پورت ۲ منتقل می‌شود.

S_{21} : نسبت انتقال از پورت ۲ به پورت ۱: مشابه S_{21} است، اما در جهت معکوس.

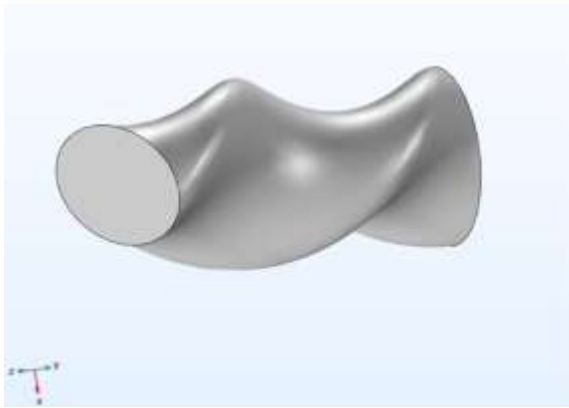
موج‌برها از دهه ۱۹۵۰ تاکنون به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی هدایت امواج الکترومغناطیسی در بسامدهای بالا شناخته شده‌اند [۳-۱]. موج‌برها در سامانه‌های مخابراتی، راداری، حسگرهای پیشرفته و شتاب‌دهنده‌های ذرات، به علت توانایی آن‌ها در انتقال با تلفات کم و کنترل دقیق بر روی مدهای انتشار، نقش اساسی ایفا می‌کنند [۴]. در میان انواع موج‌برها، نوع پیچشی^۱ آن به دلیل قابلیت در کاهش تلفات و بهبود تطبیق امپدانس [۵، ۶]، همچنین توانایی در تغییر قطبش [۷]، در مبدل‌های حالت و سامانه‌های برداری ریزموج مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸، ۹].

کاربردهای موج‌برهای پیچشی حوزه‌های مختلفی چون مخابرات نوری و ریزموج برای تبدیل قطبش و کاهش تلفات انتشار [۱۰]، شتاب‌دهنده‌های ذرات برای کنترل دقیق میدان‌های الکترومغناطیسی [۱۱، ۱۲]، همچنین برای بهبود کیفیت سیگنال و در فناوری‌های فوتونیک و کوانتوم برای کنترل حالت‌های کوانتومی نور، می‌شود [۱۳، ۱۴].

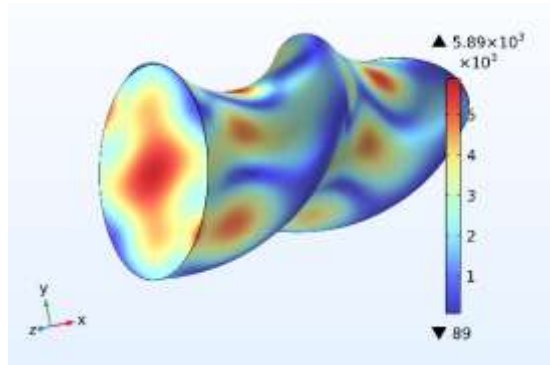
یکی از مطالعات بنیادی در زمینه‌ی موج‌برهای بیضوی در سال ۱۹۷۰ منتشر شد. در این پژوهش، با استفاده از حل تحلیلی معادلات ماکسول در مختصات بیضوی، رفتار انتشار امواج الکترومغناطیسی را در یک موج‌بر فلزی توخالی با مقطع بیضوی بررسی شد [۱۵]. همچنین، مؤلف با به کارگیری توابع ماتریو اصلاح‌شده و توسعه‌ی آن‌ها به صورت عددی، توانست بسامدهای قطع مربوط به نوزده مد متوالی را با دقت بسیار بالا محاسبه نماید [۱۶، ۱۷]. تحلیل‌ها نشان دادند که با افزایش خروج از مرکز، پهنای باند موج‌بر افزایش یافته و کنترل قطبش امواج بهبود می‌یابد. وی همچنین به مقایسه‌ی عملکرد ساختار بیضوی با موج‌برهای مستطیلی و دایروی پرداخت و نتیجه شد که موج‌بر بیضوی با نسبت محوری $a/b=2$ دارای پهنای باندی حدود ۲۵٪ کمتر از نوع مستطیلی ولی تقریباً دوبرابر موج‌بر دایروی است [۱۸]. نتایج پژوهش‌ها، بنیان فیزیکی و ریاضی تحلیل امواج هیبریدی در موج‌برهای بیضوی را شکل داد و مبنای توسعه‌ی روش‌های عددی نظیر FEM و FDTD در دهه‌های بعدی قرار گرفت [۱۹، ۲۰]. همچنین با استفاده از توابع ماتریو و روش نیمه‌تحلیلی معادلات انتگرالی میدان صفر، رفتار انتشار امواج را در موج‌بر بیضوی فلزی غیر هم کانون بررسی شده است و با حل دقیق معادلات ویژه، بسامدهای قطع و مدهای TE و TM را محاسبه و نشان‌دهنده‌ی که این روش در مقایسه با روش‌های عددی متداول مانند FEM و BEM، از دقت و همگرایی بالاتری برخوردار است [۲۱].

برای بررسی موضوع با استفاده از معادلات ماکسول [۲۲]:

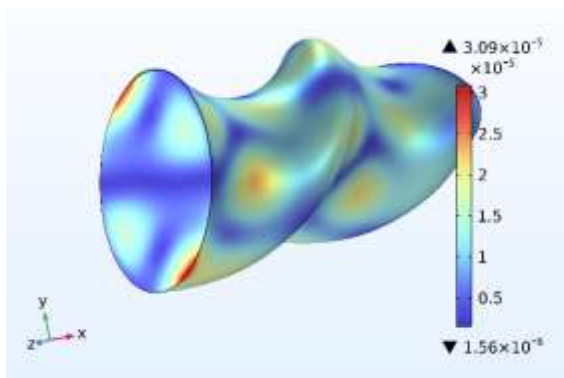
^۱ Twisted Waveguides



شکل (۱) هندسه موج‌بر پیچشی بیضوی با میزان پیچش $\frac{\pi}{2} \frac{\text{rad}}{\text{m}}$.



(الف)



(ب)

شکل (۲) میدان‌های الکترومغناطیسی موج‌بر پیچشی بیضوی حاوی خلا با مرز PEC با میزان پیچش $\frac{\pi}{2} \text{ (rad/m)}$ (الف) میدان الکتریکی (ب) میدان مغناطیسی.

در ساختار مورد مطالعه، محور انتشار موج‌بر در راستای محور z در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، تغییرات میدان‌ها در طول این محور تعیین‌کننده‌ی نحوه‌ی پیشروی موج و رفتار مدهای انتشار است. شکل (۳) نمای دیگری از ساختار فیزیکی و ماهیت مد منتشرشده ارائه می‌دهد. برای تعمیم نتایج لازم است نرخ پیچش‌های بیشتر نیز، بررسی شوند.

S_{22} : نسبت بازتاب در پورت ۲: مشابه S_{11} است، اما مربوط به پورت ۲ است [۲۴].

این عامل‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S_{11} = V_{r1} / V_{in}$$

$$S_{21} = V_{out2} / V_{in}$$

$$S_{12} = V_{out1} / V_{in}$$

$$S_{22} = V_{r2} / V_{in} \quad (۷)$$

در این پژوهش مدل پیچشی موج‌بر EW77 که از پرکاربردترین موج‌برها در باند X است، شبیه‌سازی و بررسی می‌شود. با توجه به ماهیت پیچیده و غیریکنواخت هندسه موج‌بر پیچشی، تعریف دقیق هندسه و اعمال صحیح توابع مرزی در محیط‌های نرم‌افزاری مانند کامسول (که پایه آن روش المان محدود است)، نیازمند رویکردی دقیق‌تر بود؛ لذا، هندسه سه‌بعدی دقیق این ساختار ابتدا در محیط نرم‌افزار متلب و با اعمال پارامترهای پیچش تعریف و ایجاد گردید. پس از اعتبارسنجی اولیه این مدل هندسی، ساختار حاصله به محیط نرم‌افزار کامسول وارد شد تا حل معادلات حاکم میدان الکترومغناطیسی با بهره‌گیری از المان محدود، برای چهار حالت مرزی و محیطی مختلف، شبیه‌سازی شود.

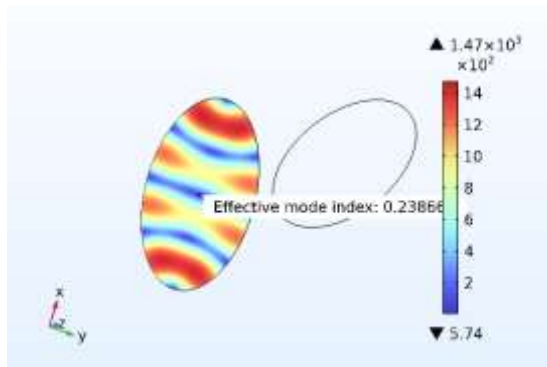
این مقاله شامل چهار بخش است که مقدمه در بخش اول آورده شد. در بخش دوم شبیه‌سازی موج‌بر بیضوی پیچشی و انتشار امواج هیبریدی با مرز PEC حاوی خلا و پلاسما انجام می‌شود. در بخش سوم شبیه‌سازی موج‌بر بیضوی پیچشی و انتشار امواج هیبریدی با مرز PMC حاوی خلا و پلاسما انجام می‌شود. در بخش چهارم یک نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- شبیه‌سازی موج‌بر بیضوی پیچشی و انتشار امواج هیبریدی با مرز PEC^2 حاوی خلا و پلاسما

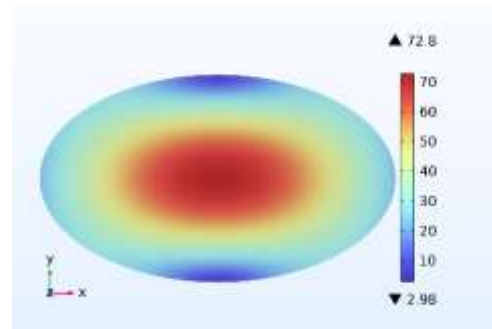
ابعاد تقریبی موج‌برهای EW77 شامل قطر بزرگ بیضی، معادل ۴۳.۶ mm و قطر کوچک آن، معادل ۲۵.۴ mm است. نوع پیچشی این نوع موج‌بر نیز با همان ابعاد استاندارد، مطابق شکل (۱) شامل پیچش در حول محور طولی خود است.

توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در ساختار مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار کامسول با میزان پیچش $\frac{\pi}{2} \frac{\text{rad}}{\text{m}}$ ، شبیه‌سازی شده و میدان‌های الکترومغناطیسی برای موج‌بر، مطابق شکل (۲) ترسیم شده است.

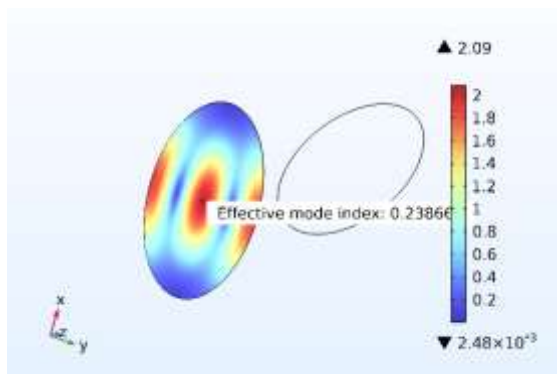
^۲ Perfect Electric Conductor



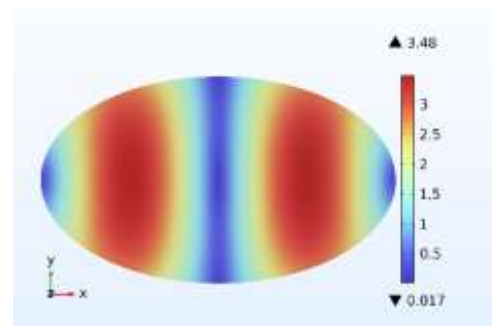
(ب)



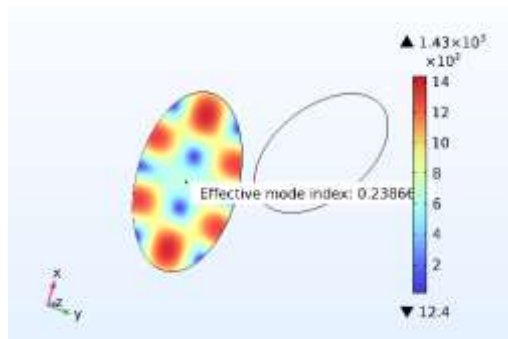
(الف)



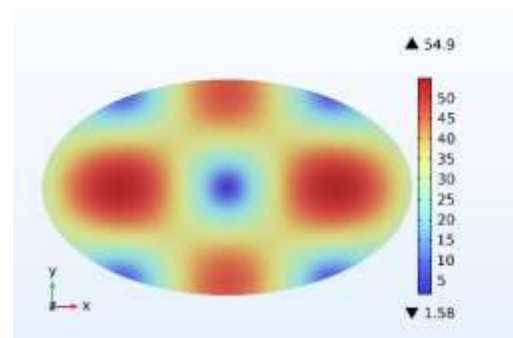
(ج)



(ب)



(د)

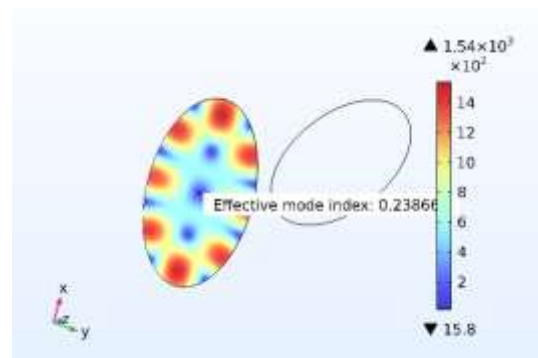


(ج)

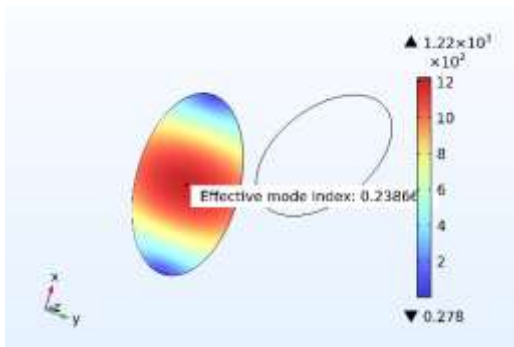
شکل (۳) میدان الکتریکی در سطح مقطع موج‌بر پیچشی بیضوی حاوی خلأ با مرز PEC با میزان پیچش $2\pi \frac{rad}{m}$ (الف) بسامد ۷ GHz (ب) بسامد ۷.۶ GHz (ج) بسامد ۱۰ GHz.

شکل (۴) میدان الکتریکی موج‌بر بیضوی پیچشی حاوی خلأ با مرز PEC با نرخ پیچش $\pi/4 \frac{rad}{m}$ (الف) عدد موج $۷۵.۰۳ \frac{rad}{m}$ (ب) عدد موج $۱۲۲.۱۷ \frac{rad}{m}$ (ج) و عدد موج $۱۵۳.۶۹ \frac{rad}{m}$ (د) عدد موج $۱۹۳.۸۸ \frac{rad}{m}$.

در ادامه، میزان پیچش تا اندازه $\pi/4 \frac{rad}{m}$ کاهش داده شده است و با عدد موج‌های مختلف، شکل میدان الکتریکی، استخراج شده و در شکل‌های (۴) و (۵)، نشان داده شده است. سپس عدد موج را به مقادیر بالاتر، مطابق شکل (۵) افزایش می‌دهیم.



(الف)

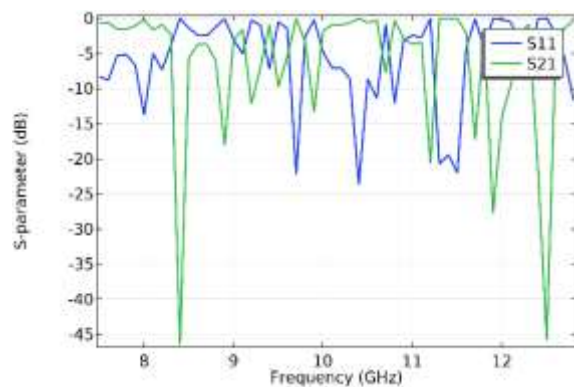


(ز)

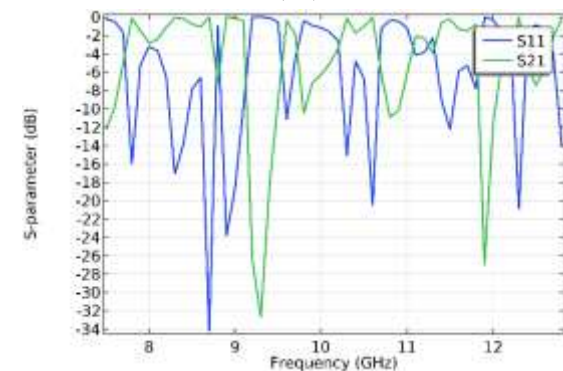
شکل (۵) میدان الکتریکی موج‌بر بیضوی پیچشی حاوی خلأ با مرز PEC با نرخ پیچش $\pi/4$ rad/m. (الف) عدد موج 2.21×10^3 rad/m (ب) عدد موج 2.31×10^3 rad/m (ج) عدد موج 2.48×10^3 rad/m (د) عدد موج 2.73×10^3 rad/m (ز) عدد موج 3.02×10^3 rad/m

در شکل (۶)، نمودارهای پراکندگی این نوع موج‌بر در محدوده بسامدی مشخص نشان داده شده است.

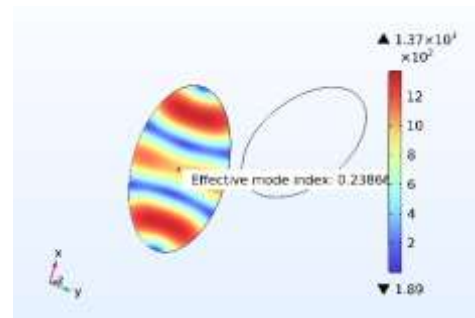
در شکل (۶) که مربوط به پارامترهای پراکندگی یا S-عامل‌ها است، مقادیر S11 و S21 با میزان پیچش‌های مختلف بر حسب بسامد در بازه‌های انتشار هر موج‌بر نمایان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل (۶-ج)، مقدار S11 در محدوده حدود ۷٫۳ تا ۹ GHz کمتر از -10 dB است که بیانگر تطبیق مناسب امپدانسی و در نتیجه بازتاب بسیار کم موج ورودی در این محدوده بسامدی است.



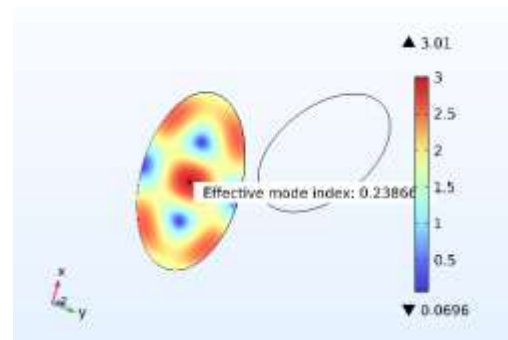
(الف)



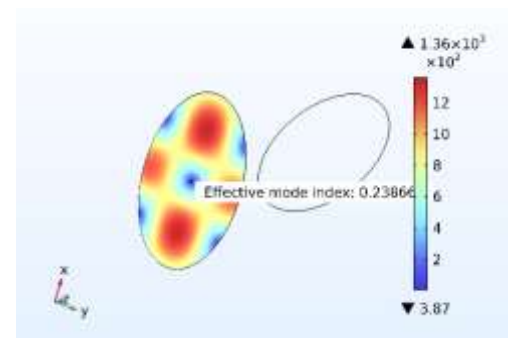
(ب)



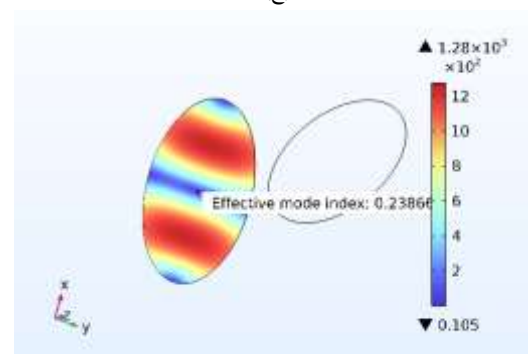
(الف)



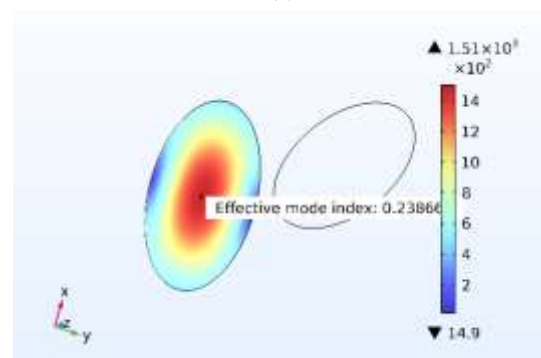
(ب)



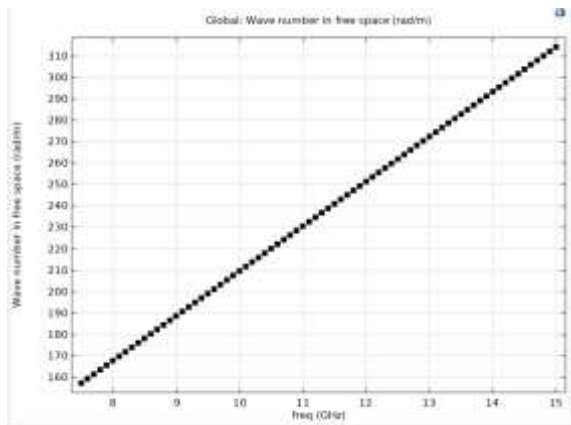
(ج)



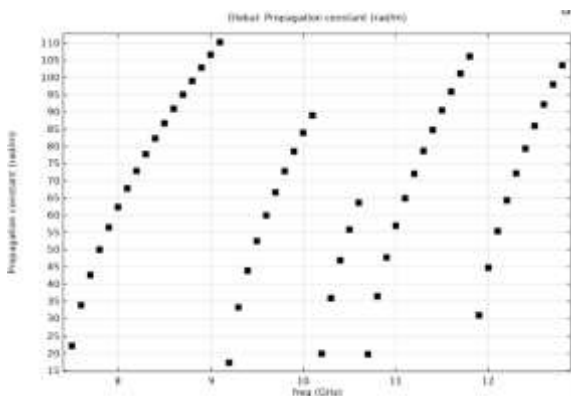
(د)



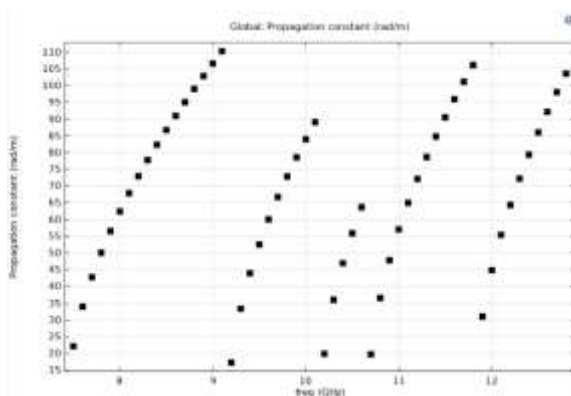
(ر)



شکل (۷) نمودار، تغییرات عدد موج اولیه k_0 برحسب بسامد در موج بر بیضوی پیچشی حاوی $\pi/4 \frac{rad}{m}$ با مرز PEC



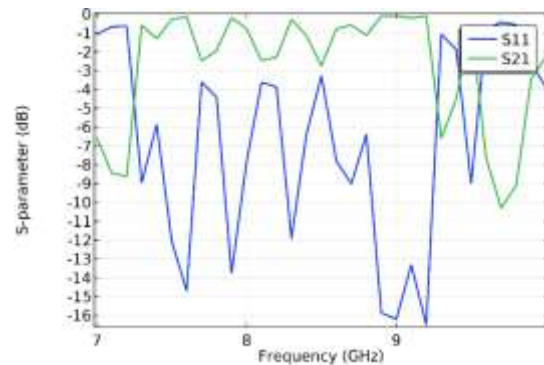
(الف)



(ب)

شکل (۸) نمودار پاشندگی موج بر بیضوی پیچشی حاوی $\pi/2 \frac{rad}{m}$ با مرز PEC (الف) میزان پیچش $\pi/4 \frac{rad}{m}$ (ب) میزان پیچش $\pi/2 \frac{rad}{m}$

به منظور بررسی رفتار الکترومغناطیسی موج بر حاوی پلازما، ابتدا توزیع میدان الکتریکی در مقطع ساختار استخراج شد و سپس پارامترهای پراکندگی آن در محدوده بسامدی مورد مشخص ترسیم می شود و میزان بازتاب و انتقال بررسی می شود. در نهایت،



(ج)

شکل (۶) نمودار پراکندگی برای موج بر EW77 پیچشی حاوی $\pi/2 \frac{rad}{m}$ با مرز PEC. (الف) میزان پیچش $\pi/4 \frac{rad}{m}$ (ب) میزان پیچش $\pi/2 \frac{rad}{m}$. میزان پیچش $2\pi \frac{rad}{m}$ از سوی دیگر، مقدار S21 در همین محدوده بین -1 dB تا 0 dB نوسان دارد که نشان دهنده انتقال تقریباً کامل توان از پورت ورودی به پورت خروجی است؛ بنابراین، موج بر طراحی شده در این بازه ی بسامدی عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. برای درک بهتر، میزان اتلاف، بازتاب و انتقال این نوع موج بر پیچشی در جدول (۱) آورده می شود.

جدول (۱) درصد توان بازتابی، انتقالی و تلفات ساختار موج بر پیچشی در محدوده بسامدی کاری برای میزان پیچش $2\pi \frac{rad}{m}$

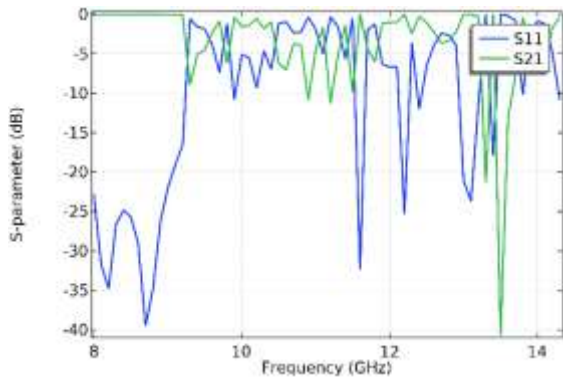
پارامتر	مقدار بر حسب dB	مقدار خطی	درصد توان	توضیح فیزیکی
S ₁₁	-۱۲	۰٫۲۵۱	۶٫۳٪	توان بازتابی
S ₂₁	-۱	۰٫۸۹۱	۷۹٫۴٪	توان انتقالی
—	—	—	۱۴٫۳٪	تلفات کل

در ادامه، به بررسی عدد موج و نمودار پاشندگی موج بر بیضوی پیچشی، با میزان پیچش های مختلف $\pi/4 \frac{rad}{m}$ ، در محدوده بسامدی انتشاری آن ها، در شکل های (۷) و (۸) می پردازیم.

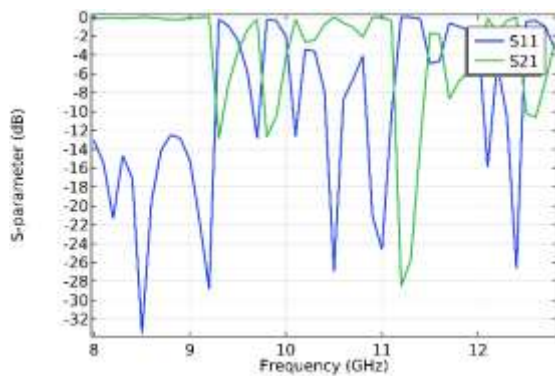
در نمودار (۷)، تغییرات عدد موج اولیه یا همان عدد موج در فضای آزاد k_0 برحسب بسامد نشان داده می شود.

در شکل (۸)، عدد موج یا ثابت انتشار β به عنوان تابعی از بسامد برای موج بر بیضوی پیچشی یا همان نمودار پاشندگی، رسم می شود.

برای بررسی اثر حضور پلازما بر رفتار انتشار موج در ساختار، موج بر را حاوی پلاسمای سرد و غیربرخوردی در نظر می گیریم. پلازما به دلیل وابستگی بسامدی ثابت دی الکتریک، می تواند ویژگی های انتشار را تغییر دهد.



(الف)

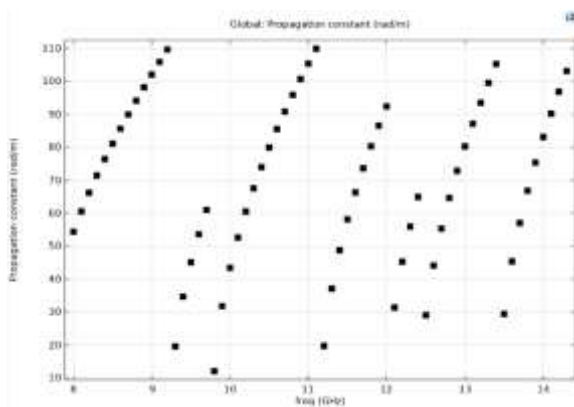


(ب)

شکل (۱۰) نمودار پراکندگی برای موج‌بر EW77 پیچشی حاوی پلاسما با مرز PEC، چگالی $1 \times 10^{16} m^{-3}$ (الف) میزان $\pi/4 \frac{rad}{m}$ (ب) میزان $\pi/2 \frac{rad}{m}$.

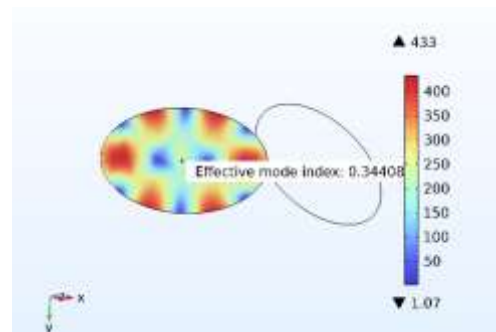
در شکل (۱۰)، رفتار بسامدی موج‌بر پلاسمایی بر اساس نمودارهای S پارامتر بررسی می‌شود.

در شکل (۱۱)، نمودار پاشندگی امواج، برای دو مقدار پیچش، رسم شده است.

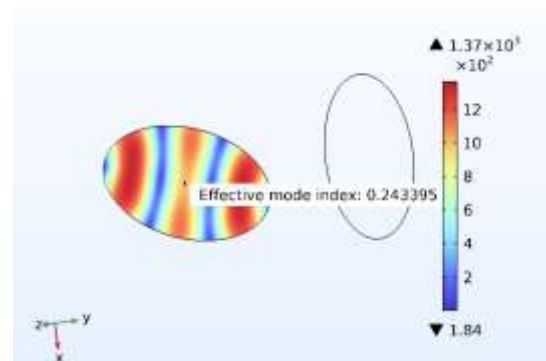


(الف)

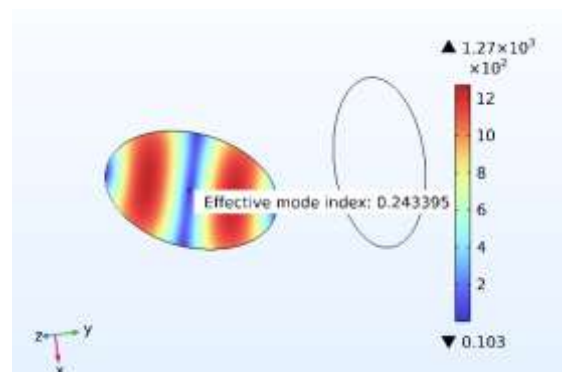
منحنی پاشندگی، رسم می‌گردد. ترتیب ارائه نتایج نیز به صورت گام‌به‌گام از مشاهده توزیع میدان، به تحلیل انتقال و بازتاب، و در نهایت بررسی ویژگی‌های انتشار موج تنظیم می‌شود.



(الف)



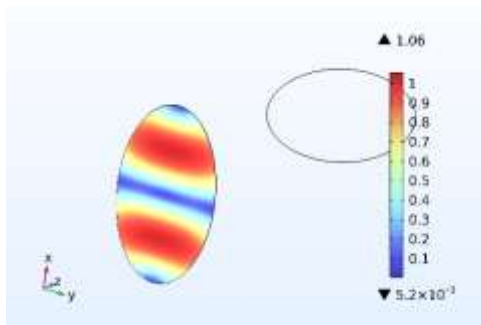
(ب)



(ج)

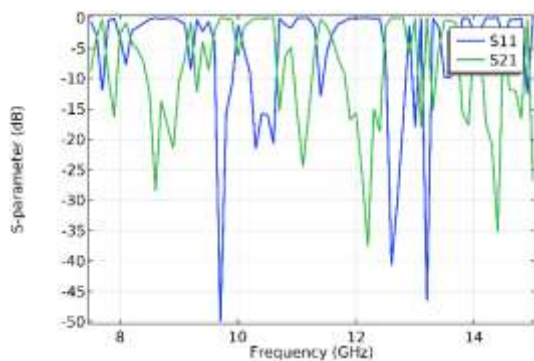
شکل (۹) میدان الکتریکی در موج‌بر بیضی پلاسمایی با مرز PEC، چگالی $1 \times 10^{16} m^{-3}$ (الف) میزان $\pi/4 \frac{rad}{m}$ و بسامد ۱۴.۳ GHz. (ب) میزان $\pi/2 \frac{rad}{m}$ و بسامد ۱۲.۸ GHz. (ج) میزان $\pi/2 \frac{rad}{m}$ و بسامد ۱۰.۹ GHz.

شکل (۹)، میدان الکتریکی موج‌بر بیضی پیچشی حاوی پلاسما، با پیچش‌ها و بسامدهای مختلف را نشان می‌دهد.

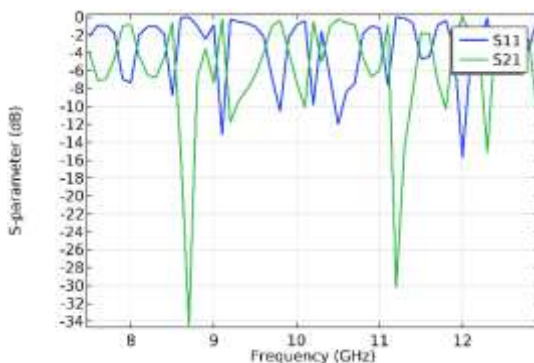


(ج)

شکل (۱۲) میدان الکتریکی در سطح مقطع موجر پیچشی بیضوی حاوی خلأ با مرز PMC (الف) بسامد ۱۰.۲ GHz و میزان پیمایش $\frac{\pi}{4} \frac{rad}{m}$ (ب) بسامد ۱۱.۸ GHz و میزان پیمایش $\frac{\pi}{2} \frac{rad}{m}$ (ج) بسامد ۸ GHz و میزان پیمایش $\frac{\pi}{2} \frac{rad}{m}$.

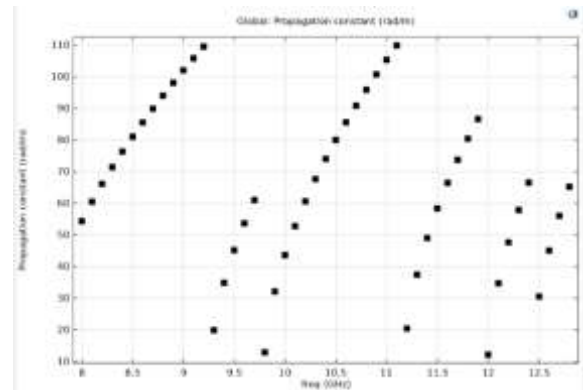


(الف)



(ب)

شکل (۱۳) نمودار پراکندگی برای موجر EW77 پیچشی حاوی خلأ با مرز PMC . (الف) میزان پیمایش $\frac{\pi}{4} \frac{rad}{m}$ (الف) میزان پیمایش $\frac{\pi}{2} \frac{rad}{m}$.

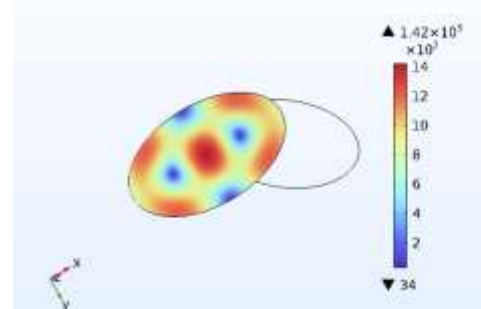


(ب)

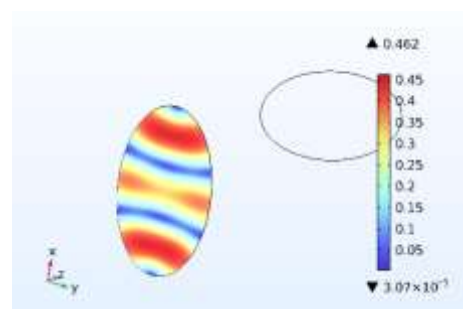
شکل (۱۱) نمودار پاشندگی موجر بیضوی پیچشی با مرز PEC . چگالی $1 \times 10^{16} m^{-3}$ (الف) میزان پیمایش $\frac{\pi}{4} \frac{rad}{m}$ (ب) میزان پیمایش $\frac{\pi}{2} \frac{rad}{m}$.

۲- بررسی رفتار موج در موجر بیضوی پیچشی با مرزی PMC^3 حاوی خلأ و پلاسما

در این بخش دیواره‌های ساختار از حالت PEC به PMC تغییر داده شدند. این شرط باعث صفر شدن مؤلفه‌ی مماسی میدان مغناطیسی در مرز شده و در نتیجه نحوه‌ی توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی و مدهای قابل‌انتشار در موجر، مطابق شکل (۱۲) تغییر می‌کنند. همچنین نمودارهای پراکندگی و پاشندگی را به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان می‌دهیم.

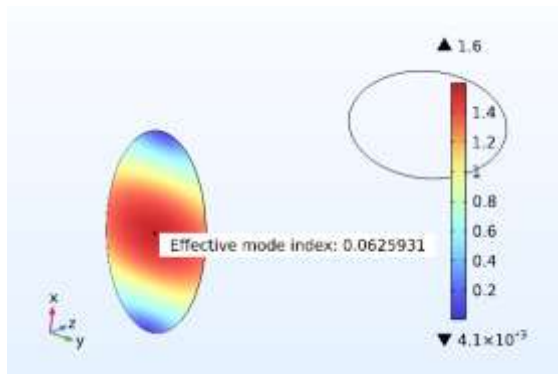


(الف)

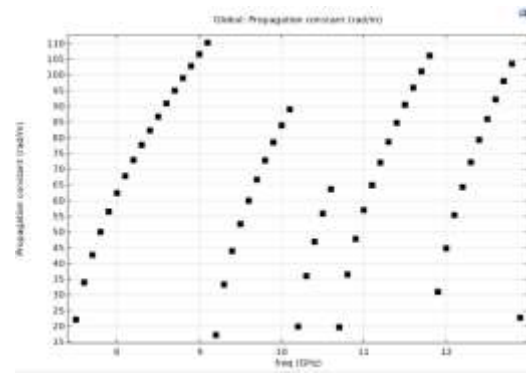


(ب)

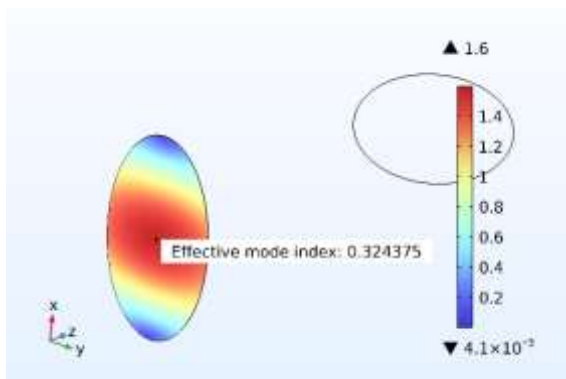
^۳ Perfect Magnetic Conductor



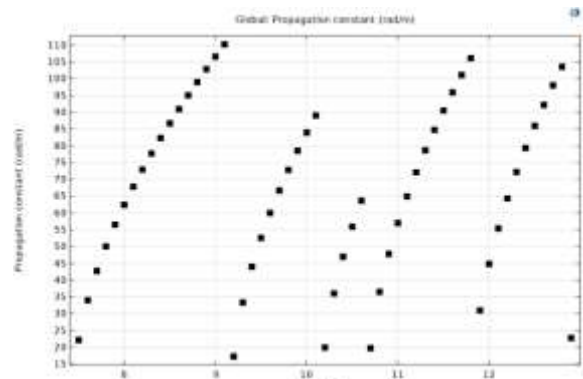
(ب)



(الف)



(ج)

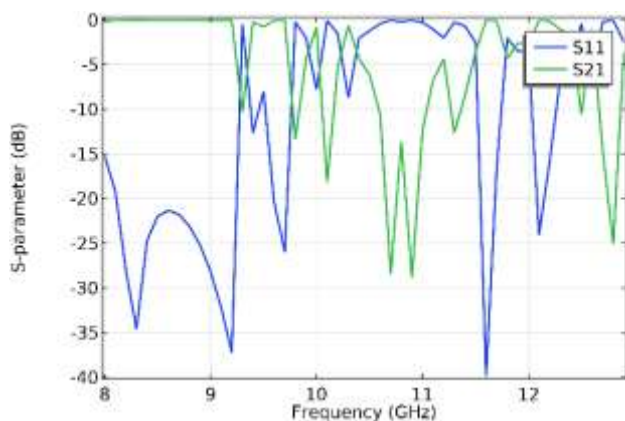


(ب)

شکل (۱۵) میدان الکتریکی در موج‌بر بیضوی پلاسمایی با مرز PMC چگالی $1 \times 10^{16} m^{-3}$ (الف) در بسامد ۱۰.۱ GHz و میزان پیچش $\frac{\pi}{4} \frac{rad}{m}$ (ب) در بسامد ۹.۸ GHz و میزان پیچش $\frac{\pi}{2} \frac{rad}{m}$ (ج) در بسامد ۸ GHz و میزان پیچش $\frac{\pi}{2} \frac{rad}{m}$.

بررسی این نمودارها نکات زیر را نشان می‌دهد:

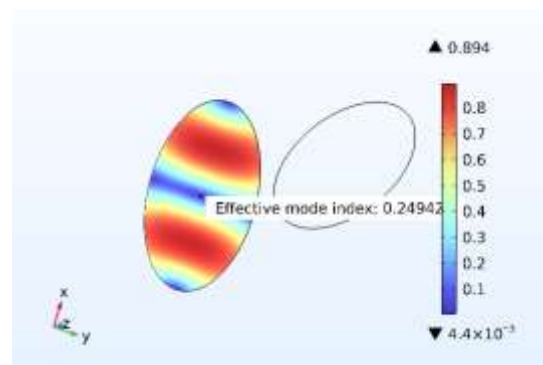
مقدار S_{11} در بخش قابل‌توجهی از محدوده بسامدی کمتر از ۱۰ dB است که نشان‌دهنده تطبیق قابل‌قبول موج‌بر در حضور پلازما است.



(الف)

شکل (۱۴) نمودار پاشندگی موج‌بر بیضوی پیچشی حاوی خلأ با مرز PMC (الف) میزان پیچش $\frac{\pi}{4} \frac{rad}{m}$ (الف) میزان پیچش $\frac{\pi}{2} \frac{rad}{m}$. در ادامه، موج‌بر پیچشی با مرز PMC و حاوی پلازما مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل (۱۵)، میدان‌های الکتریکی این موج‌بر با دو نرخ پیچش متفاوت و در بسامدهای مختلف مشاهده می‌شود. برای ارزیابی عملکرد انتقال و تطبیق موج‌بر پیچشی در این حالت، نمودارهای پاشندگی مطابق شکل (۱۶) ترسیم می‌شوند.



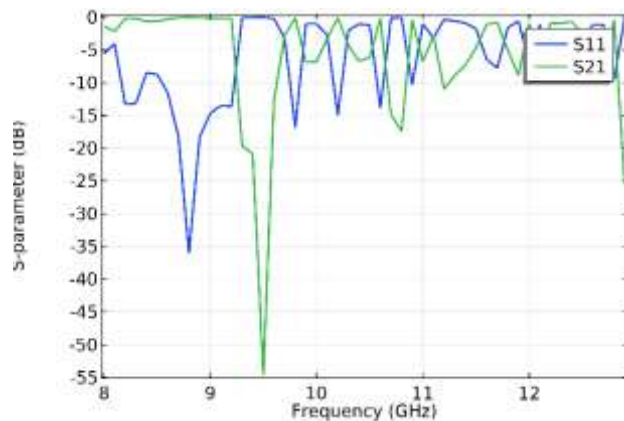
(الف)

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی میدان‌ها و ویژگی‌های الکترومغناطیسی موج‌برهای پیچشی با سطح مقطع بیضی حاوی پلاسما برای کاربردهای باند X بررسی شد. میدان‌ها و ویژگی‌های الکترومغناطیسی موج‌بر پیچشی تحت چهار حالت مرزی و محیطی شامل PEC حاوی خلأ و پلاسما و همچنین PMC حاوی خلأ و پلاسما، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حضور پلاسما، موجب تغییر شکل شاخه‌های پاشندگی و S-عامل‌ها می‌شود. پارامترهای پراکندگی و توزیع میدان‌ها بیانگر انتشار امواج با تلفات ناچیز بوده و عملکرد مناسب ساختار در کاربردهای بسامد بالا را تأیید می‌کند. موج‌بر بیضی EW77 در حالت پیچشی را در نظر گرفته شده است. در هر حالت رابطه پاشندگی و پارامترهای پراکندگی در بازه بسامدی مشخص ترسیم شدند. رفتار میدان‌های الکترومغناطیسی برای نرخ پیچش و بسامدهای مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج عددی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند که موج‌بر EW77 پیچشی بازتاب پایین و انتقال توان بالایی از خود نشان می‌دهد همچنین استفاده از پلاسما درون موج‌بر پیچشی می‌تواند منجر به تغییراتی شود.

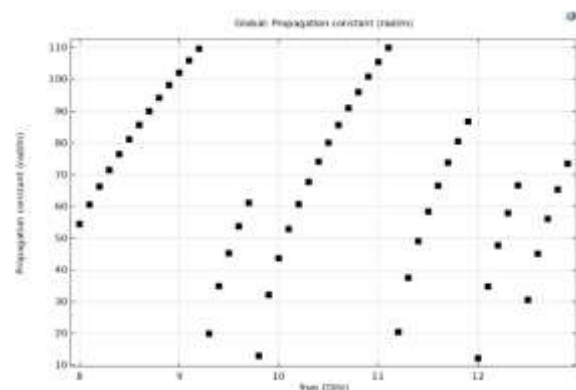
مراجع

- [۱] e. D. H. O. I. U. o. s. a. t. Fields and waves.
- [۲] H. A. D. M. v. d. Meer, Twisted rectangular waveguides: Theory and applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2011. 25: p. 678-690.
- [۳] J. L. Wilson, et al., Analysis of rapidly twisted hollow waveguides. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 57(1): p. 130-139.
- [۴] C. E. H. J. D. Jackson, NJ: Wiley, 1999.
- [۵] M. A. M. M. El-Shenawee, Electromagnetic properties of twisted waveguides. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012. vol. 60, no. 12: p. 3856-3864.
- [۶] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. Fourth Editions, University of Massachusetts at Amherst, John Wiley & Sons, Inc, 2012: p. 26-30.
- [۷] J. R. W. S. Ramo, and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*. Hoboken, NJ: Wiley, 1994.
- [۸] A. o. T. W. i. M. C. S. P. Singh, "IET Microwaves, 2023.
- [۹] N. A. o. E. T. W. C. Huang, "Appl. Phys. Lett., 2024.
- [۱۰] A. o. E. W. A. Kumar, "Prog. Electromagn. Res., 2011.
- [۱۱] T. E. W. f. P. C. X. Zhang, "Opt. Express, 2019.
- [۱۲] A. A. G. Khojeh, "Calculation of the resonance frequency of a toroidal plasma," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. Vol. 9, No.2, 2021-2022.
- [۱۳] M. C. i. T. E. W. Y. Wang, "J. Electromagn. Waves Appl., 2021.
- [۱۴] L.-L. T. i. E. T. W. L. Zhao, "IEEE Microwave Mag., 2022.

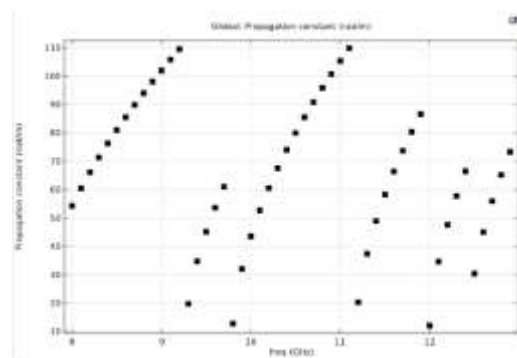


(ب)

شکل (۱۶) نمودار پراکندگی برای موج‌بر EW77 پیچشی حاوی پلاسما با مرز PMC. چگالی $1 \times 10^{16} m^{-3}$ (الف) میزان پیچش $\pi/4 \frac{rad}{m}$. (ب) میزان پیچش $\pi/2 \frac{rad}{m}$. نمودار پاشندگی را نیز، در شکل (۱۷) رسم می‌کنیم.



(الف)



(ب)

شکل (۱۷) نمودار پاشندگی موج‌بر بیضی پیچشی با مرز PMC. چگالی $1 \times 10^{16} m^{-3}$. (الف) میزان پیچش $\pi/4 \frac{rad}{m}$. (ب) میزان پیچش $\pi/2 \frac{rad}{m}$.

- [۱۵] J. Stratton, "Electromagnetic Theory, McGraw-Hill, New York, 1941," *There is no corresponding record for this reference (cit. on p. 10)*, 1941.
- [۱۶] S.-j. Zhang and Y.-c. Shen, "Eigenmode sequence for an elliptical waveguide with arbitrary ellipticity," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 43, no. 1, pp. 227-230, 1995.
- [۱۷] J. Meixner and F. W. Schäfke, "Mathieusche Funktionen," in *Mathieusche Funktionen und Sphäroidfunktionen: Mit Anwendungen auf Physikalische und Technische Probleme*: Springer, 1954, pp. 98-221.
- [۱۸] N. Marcuvitz, *Waveguide handbook* (no. 21). Iet, 1951.
- [۱۹] J. Kretzschmar, "Cutoff frequency of the TM_{c11} mode in a hollow conducting elliptical waveguide.," *Electronics Letters*, , 1969.
- [۲۰] A. A. A. Mohammad Behnam Abrahimi "Effect of strong uniform axial magnetic field on the TE and TM modes fields and injected electron dynamic in the plasma waveguide with Piet Hein cross section," *Scientific Journal of Applied Electromagnetics*, vol. Vol. 10, No.2,, 2022-2023.
- [۲۱] J.-W. Lee and J.-T. Chen, "A semianalytical approach for a nonconfocal suspended strip in an elliptical waveguide," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 6 , no. 12, pp. 3642-3655, 2012.
- [۲۲] W. H. Hayt, Jr., & Buck, J. A, *Engineering electromagnetics*, ed. McGraw-Hill. 2012.
- [۲۳] H. Yabe and Y. Mushiake, "Electromagnetic fields in twisted coordinate system," *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, vol. 64, no. 12, pp. 43-50, 1981.
- [۲۴] F. R. a. M. E. F. o. W. A. D. G. Gustrau.