

Electromagnetic Waves Propagation in a Perfect Electromagnetic Conductor Coaxial Waveguide Containing Chiro Plasma

Maghsoud Aghajani Baragoori¹, Abbas Abdoli Arani^{2*} 

¹PhD Student, University of Kashan, Kashan, Iran.Email: m55ab@chmail.ir

²Associate Professor, University of Kashan, Kashan, Iran (*Correspondence: abdoliabbas@kashanu.ac.ir)

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 10 November ۲۰۲۵

Revised: 16 January ۲۰۲۵

Accepted: 10 February ۲۰۲۵

Available online: 14 June 2026

Keywords:

Chiroplasma

Coaxial Waveguide

Perfect Electromagnetic Conductor

ABSTRACT

In this paper, the propagation of electromagnetic waves in a coaxial waveguide consisting of a core and a shell of a perfect electromagnetic conductor containing a chiro plasma is investigated. The components of the electromagnetic fields are calculated analytically. The dispersion relation of the hybrid modes is calculated by considering appropriate boundary conditions and its behavior is studied numerically by plotting figure for different modes. The effects of the chirality parameters, the perfect electromagnetic conductor admittance parameter and the inner and outer radii of the considered coaxial waveguide on the wave number are investigated. It is shown that the wave number and the cutoff frequency change with the change of various parameters.

Cite this article: Aghajani Baragoori, M., Abdoli Arani, A. (2025). Electromagnetic Waves Propagation in a Perfect Electromagnetic Conductor Coaxial Waveguide Containing Chiro Plasma. Journal of Applied Electromagnetics. 2025; 13(1):111-118.


DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1404.13.1.8.3>

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

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.



انتشار امواج الکترومغناطیسی در یک موج برهم محور رسانای الکترومغناطیسی کامل حاوی کایوپلازما

مقصود آقاجاری براگوری^۱، عباس عبدلی آرای^{۲*} 

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲ دانشیار، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران (نویسنده مسئول: abdoliabbas@kashanu.ac.ir)

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

چکیده (استایل چکیده)

در این مقاله، انتشار امواج الکترومغناطیسی در یک موج برهم محور شامل هسته و پوسته‌ی رسانای الکترومغناطیسی کامل که حاوی کایوپلازما می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مؤلفه‌ها و میدان‌های الکترومغناطیسی به صورت تحلیلی محاسبه می‌شوند. رابطه‌ی پاشندگی مدهای هیبریدی با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب محاسبه می‌شود و رفتار آن برلی مدهای مختلف، به صورت عددی با رسم نمودار، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تأثیر پارامترهای کایوپلازما، پذیرش‌های رسانایی الکترومغناطیسی کامل و شعاع داخلی و خارجی موج برهم محور مذکور بر روی عدد موج بررسی می‌شوند. نشان داده می‌شود که عدد موج و بسامد قطع با تغییر پارامترهای مختلف تغییر می‌کند.

کلیدواژه‌ها:

کایوپلازما

موج برهم محور

رسانای الکترومغناطیسی کامل

استناد: آقاجاری براگوری، مقصود، عبدلی آرای، عباس[©]. انتشار امواج الکترومغناطیسی در یک موج برهم محور رسانای الکترومغناطیسی کامل حاوی کایوپلازما. الکترومغناطیس کاربردی. (۱۴۰۴)؛ ۱۳ (۱): ۱۱۸-۱۱۱.

DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1404.13.1.8.3>

 نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

OPEN ACCESS 

۱- مقدمه

مواد کایال موادی هستند که خاصیت کایال بودن از خود نشان می‌دهند، به این معنی که به دلگی ساختار مولکولی خود دارا ی خواص چپ دست یا راست دست هستند؛ بنابراین، آن‌ها را نمی‌توان بر روی تصوی آینه‌ای آن‌ها منطبق کرد، درست مانند دستان ما نمی‌توانند بر روی یکدیگر منطبق شوند. کارالیتی یک

مفهوم هندسی است که به عدم تقارن یک شی اشاره دارد $\hat{n} \cdot (\vec{D} - M\vec{E}) = 0$

مواد در اپتیکی بانام رایج تر مواد فعال نور ی شناخته م ی‌شوند. از آنجاکه امکان گسترش خواص آن‌ها به طول موج‌های ریزموج یا متری از طریقی پیشرفت در علم پلهر ی از طریقی ساخت دی‌الکتریکی‌های مصنوعی وجود دارد، علاقه زلای به مطالعه این مواد کایال وجود داشته است. تحقیقات زلای در مورد کایال‌هته الکترومغناطیسی در کاربردهای گسترده این مواد کایال منجر به مطالعه و بررسی تأثیری کایال‌هته الکترومغناطیسی بر ساختارها ی هدایت کننده موج و موج بر شد [1-2]. کنترل درجه کایالیتته

یکی از مشکلات اصلی در مورد مواد کایرال است که اگر محیط ناهمسانگرد باشد می‌تواند حل شود. این واقعیت پلازما را به یک محیط جذاب تبدیل می‌کند، زیرا به دلیل وجود میدان مغناطیسی بایاس، یک محیط ناهمسانگرد است. تحقیقات نشان می‌دهد که شکل‌های خاصی از ناهمسانگردی بایع معرفی شوند تا به کنترل کایال‌هته در ساختارهای موج هدایت شده دست یابند. یکی از نامزدهای احتمالی، کاپروپلازما است. پلازما ی کایرال نوعی پلازما است که خواص کایرال دارد و این خاصیت کایرال می‌تواند بر پراکندگی و انتشار امواج الکترومغناطیسی در پلازما تأثیر بگذارد و منجر به رفتارها و کاربردهای منحصر به فردی شود. پلازما ی کایرال ناهمسانگرد است و می‌تواند شکست منفی نشان دهد و مشابه مواد کایرال، پلازما ی کایرال می‌تواند صفحه قطبش امواج الکترومغناطیسی را بچرخاند. علاوه بر این، از آنجاکه موج برهای پلازما ی کایال در الکترونیکی ریزموج استفاده می‌شوند، بررسی میدان‌های الکترومغناطیسی، ویژگی‌های انتشار امواج الکترومغناطیسی و دیگر عوامل مؤثر بر انتشار امواج الکترومغناطیسی در این نوع ساختار مهم است. علاوه بر این، از آنجاکه موج برهای پلازما ی کایال در الکترونیکی ریزموج استفاده می‌شوند، بررسی میدان‌های الکترومغناطیسی، ویژگی‌های انتشار امواج الکترومغناطیسی و سایر عوامل مؤثر بر انتشار امواج الکترومغناطیسی در این نوع ساختار مهم است. بدیعی است که هرکدام از این ساختارها مزایای خود را دارند و بررسی هرکدام می‌تواند اهمیت خود را داشته باشد. تجزیه و تحلیل این نوع تحقیقات برگیر جالب است زیرا موج بر پلازما ی کایو کاربردها ی زیادی در مهندسی الکترومغناطیسی دارد. رسانای

الکترومغناطیسی کامل^۱ (PEMC) [3-4] تعمیم رسانای الکترونیکی کامل^۲ (PEC) و رسانای مغناطیسی کامل^۳ (PMC) است [5]. انرژی و توان الکترومغناطیسی نم ی‌توانند وارد محیط PEMC شوند زیرا بردار مختلط پوینتینگ، برای مقادیر حقیقی ی M، موهومی می‌شود [6-7]. شرایط مرزی در سطح PEMC به صورت زیر بیان می‌شود

$$\hat{n} \times (\vec{H} + M\vec{E}) = 0; [5]$$

که \hat{n} بردار بیکه عمود^۴ و M پارامتر پذیرفتاری^۵ PEMC را مشخص می‌کند و در حد $M=0$ و $M \rightarrow \pm\infty$ PEMC، M به ترتیب به PMC و PEC تبدیل می‌شود. موج‌برها با مواد مختلف کاربردهای متفاوتی در امواج ترا هرتز، ریزموج، میلی‌متری و نور ی دارند. بسته به کاربرد موج‌بر، آن‌ها سطح مقطع متفاوتی دارند و با مواد مختلفی پر می‌شوند. موج برهایی با مرز PEMC اهمیت ویژه‌ای در زمینه^۶ توصیف انتشار موج دارند [8-10]. تحقیقات زلای در مورد استفاده از مواد PEMC انجام شده است [11-12]. لازم به ذکر است که مرز PMC دو ویژگی مفید و جالب را تضم ی م ی‌کنند: اول، PMC نم ی‌تواند اجازه دهد که امواج و جریان‌های الکترومغناطیسی وارد سطح شوند. دوم، سطوح PMC امپدانس سطح برگیر بالا یی در ی محدود فرکانس ی محدود دارند و سطوح PMC امواج الکترومغناطیسی را بدون تغ یی ر فاز م ی‌دان الکترونیکی منعکس می‌کنند [13]. موج بر با مرز PEMC [10] و مرز PMC [14-15] و هسته کا یو پلازما [16-18] در توصیف انتشار موج الکترومغناطیسی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. تحقیقات متنوعی در حوزه‌های مختلف پلازمایی از قبلی تحریک و تقویت مدهای هیریعی در موج‌برهای پلازمایی [19]، بررسی حرکت الکترون تزریق شده در موج بری حاوی پلازما با سطح مقطع پیی‌ت‌ها ی [20]، محاسبه سطح مقطع راداری آنتن پلازمایی [21]، محاسبه بسامد تشدیعی ک پلازما ی چنبره ای [22] انجام شده است. همچنین متذکر م ی‌شو یی که موج بر هم‌محور از یک استوانه‌ی توپیر رسانای داخلی هم‌محور با یک استوانه رسانای توخالی خارجی تشکیل شده است. سطح مقطع پوسته و هسته می‌تواند دارای شکل‌های مختلف مانند مستطیل، دایره، بیضی و غیره باشد. بین هسته و پوسته م ی‌تواند دی‌الکتریکی، هوا، پلازما و یا مواد دیگر قرار بگیرد. در این پژوهش، ما انتشار امواج الکترومغناطیسی را در موج برهای هم‌محور با سطح مقطع دایره‌ای حاوی کاپروپلازما ی حلقوی احاطه شده توسط دیواره‌ها ی رسانای الکترومغناطیسی کامل (CPCCW) مطالعه می‌کنیم. مؤلفه‌های میدان‌های

¹ Perfect Electromagnetic Conductor

² Perfect Electric Conductor

³ Perfect Magnetic Conductor

⁴ Unit vector normal

⁵ Admittance parameter

$$\varepsilon_i \quad (10)$$

در اینجا $\omega_p = (n_0 e^2 / m_e \varepsilon_0)^{1/2}$ و $\omega_c = eB_0 / m_e$ به ترتیب به عنوان بسامد الکترونی پلاسما و بسامد سیکلوترونی الکترون تعریف می‌شوند.

میدان‌های الکترومغناطیسی را می‌توان به صورت مؤلفه‌های عرضی و طولی به صورت زیر نوشت:

$$\vec{E} \quad (11)$$

$$\vec{H} \quad (12)$$

ما مؤلفه‌های طولی و عرضی میدان را برای حالت هیبریدی در ناحیه کایروپلاسما در نظر می‌گیریم:

$$E_z \quad (13)$$

$$H_z \quad (14)$$

$$E_i \quad (15)$$

$$E_i \quad (16)$$

$$E_i \quad (17)$$

$$E_i \quad (18)$$

$$E_i \quad (19)$$

الکترومغناطیسی را به صورت تحلیلی محاسبه می‌کنیم. با اعمال شرایط مرزی مناسب رابطه پاشندگی مدهای هیبریدی را به دست می‌آوریم. با رسم رابطه پاشندگی محاسبه شده و رفتار آن را برای مدهای مختلف بررسی می‌کنیم. تأثیر پارامترهای کایرالیته، پذیرفتاری رسانایی الکترومغناطیسی کامل و شعاع داخلی و خارجی موج بر هم‌محور مذکور بر روی عدد را بررسی می‌کنیم. در واقع اثر مرز PEMC را روی انتشار میدان الکترومغناطیسی در موج‌بر مذکور بررسی می‌کنیم. این مقاله در چهار بخش ارائه می‌شود: بخش اول مقدمه است. در بخش دوم معادلات اساسی در پیکربندی در نظر گرفتن شده ارائه می‌شوند و میدان‌های الکترومغناطیسی و رابطه پاشندگی محاسبه می‌شوند. در بخش سوم، نتایج را به صورت عددی و با رسم نمودار بررسی می‌کنیم. در بخش چهارم یک نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- محاسبه میدان‌ها و معادله پاشندگی

یک CPCCW با هسته و پوسته PEMC را در نظر می‌گیریم. شعاع داخلی و خارجی مرزهای کایروپلاسمای حلقوی را با R_1 و R_2 نشان می‌دهیم.

برای کایروپلاسما در نظر می‌گیریم [16-18]:

$$\vec{D} \quad (1)$$

$$\vec{H} \quad (2)$$

که $\tilde{\varepsilon}$ به عنوان پذیرفتاری کایرالیته تعریف می‌شود و $\tilde{\mu}$ به ترتیب تانسور دی‌الکتریک و نفوذپذیری نرده‌ای هستند. معادلات موج E_z و H_z به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\left(\quad (3) \right)$$

$$\quad (4)$$

$$e \quad (5)$$

$$e \quad (6)$$

$$e \quad (7)$$

$$e \quad (8)$$

$$e \quad (9)$$

علاوه بر این، تانسور $\tilde{\varepsilon}$ به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\tilde{\varepsilon} \quad (9)$$

و بنابراین $\varepsilon_e, \varepsilon_T, \varepsilon_p$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

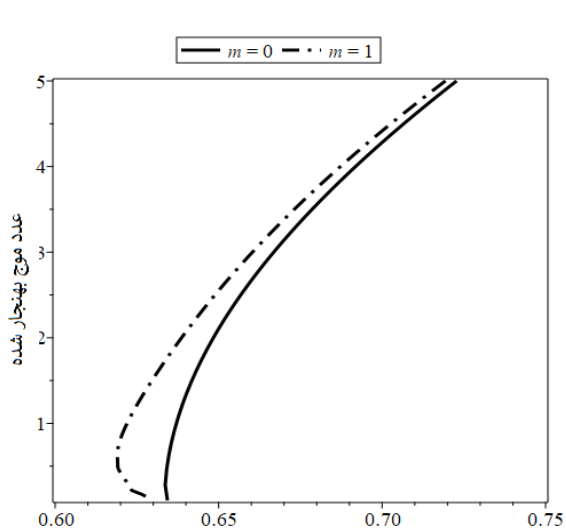
H (۲۹)	H	
H (۳۰)	=	
معادله پاشندگی حاصل از شرایط مرزی بالا با مساوی صفر	-	
قرارداد دترمینان ماتریس ضرایب این معادلات به دست می‌آید.	+	
دترمینان ضرایب به صورت زیر محاسبه می‌شود:	-	(۱۷)
D (۳۱)	+	
که	-	
α	+	
α	-	
α	+	
a	-	
α	+	
α	+	
α	+	
a	+	
α	+	
$\alpha_{32} = T_{3a} Y'_m(p_1 R_1) + T_{4a} \frac{m}{R_1} Y_m(p_1 R_1),$ (۳۲)	+	(۱۸)
α	+	
$\alpha_{34} = T_{5a} Y'_m(p_2 R_1) + T_{6a} \frac{m}{R_1} Y_m(p_2 R_1),$	+	
α	+	
$\alpha_{42} = T_{3b} Y'_m(p_1 R_2) + T_{4b} \frac{m}{R_2} Y_m(p_1 R_2),$	+	
α	+	
$\alpha_{44} = T_{5b} Y'_m(p_2 R_2) + T_{6b} \frac{m}{R_2} Y_m(p_2 R_2),$	+	
T_i (۳۳)	v_i (۱۹)	
T_i (۳۴)	v_i (۲۰)	
T_i (۳۵)	v_i (۲۱)	
T_i (۳۶)	v_i (۲۲)	
T_i (۳۷)	v_i (۲۳)	
T_i	v_i (۲۴)	
T_i	T (۲۵)	
T_i	γ_i (۲۶)	
T_i	p_i	
T_i	H (۲۷)	
T_i	H (۲۸)	

که J_{1m} و Y_{1m} و J_{2m} و Y_{2m} ثابت هستند. $J_m(p_j \rho)$ و $Y_m(p_j \rho)$ تابع بسل مرتبه m از نوع اول و دوم هستند. علاوه بر این:

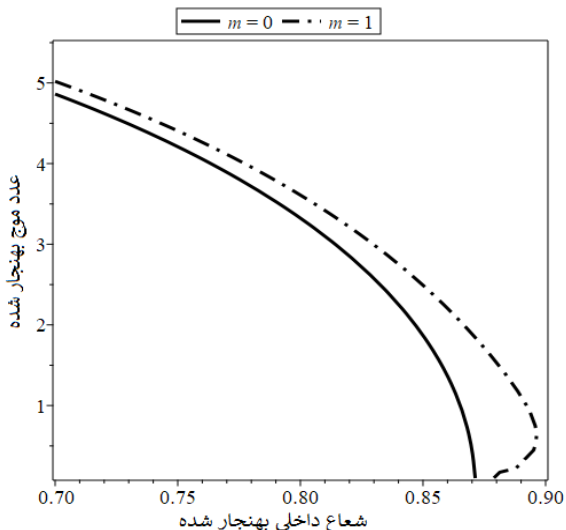
۳- نتایج شیه سازی

در این بخش، ما یک CPCCW با هسته و پوسته PEMC را برای بررسی عددی در نظر می‌گیریم. در شکل ۱، منحنی‌ها ی پاشندگی را در CPCCW با هسته و پوسته PEMC برای حالت‌های $m=0,1$ رسم کردیم. شکل ۱ تأثیر پارامتر پذیر فتاری کایرالیته γ روی منحنی‌های پاشندگی را نشان می‌دهد. واضح است که وقتی پارامتر پذیر فتاری کایرالیته دارای مقدار بالاتری باشد، مقدار بسامد قطع مربوطه کمتر می‌شود.

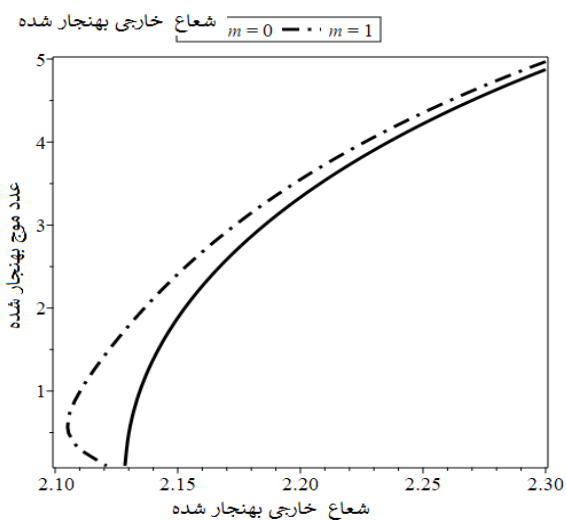
حال با استفاده از مؤلفه های میدان های الکترومغناطیسی محاسبه شده و نیز شرایط مرزی مناسب و سازگار در مرزها، میتوان معادله پاشندگی را به دست آورد. شرایط مرزی PEMC به صورت زیر بیان می‌شود [10]:



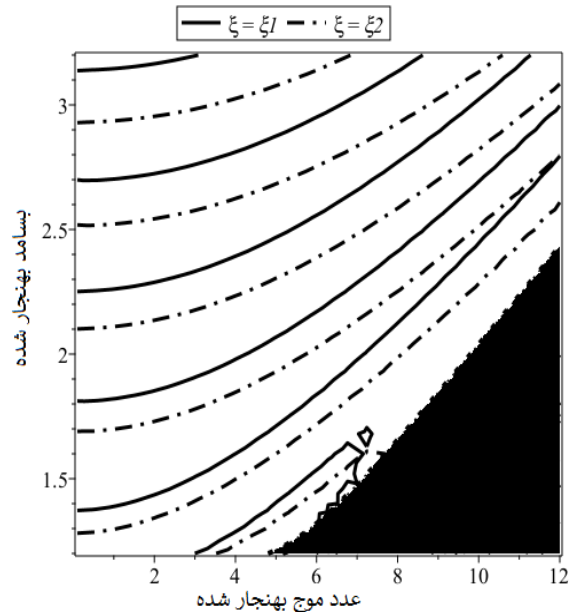
شکل (۲): عدد موج بهنجار شده، β برحسب پارامتر پذیرفتاری کایرالیتهی در CPCCW با هسته و پوسته PEMC



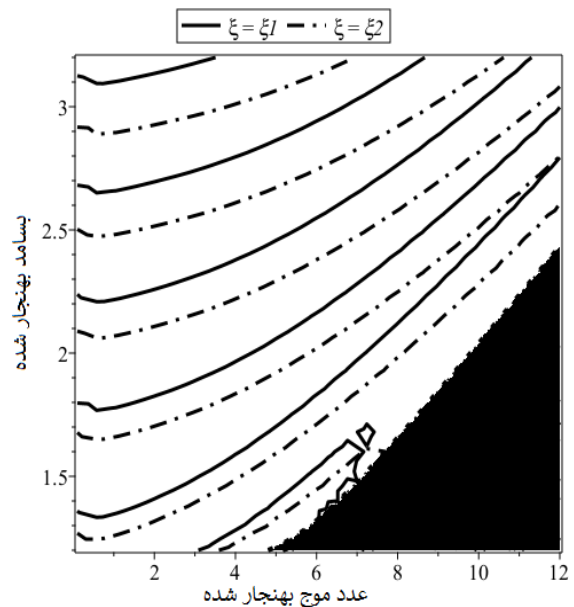
شکل (۳): عدد موج بهنجار شده، β برحسب شعاع هسته در CPCCW با هسته و پوسته PEMC.



شکل (۴): عدد موج بهنجار شده، β برحسب شعاع پوسته در CPCCW با هسته و پوسته PEMC



(الف): برای m=0



(ب): برای m=1

شکل (۱): نمودار رابطه پاشندگی در CPCCW با هسته و پوسته PEMC

شکل ۲ نشان می‌دهد که چگونه عدد موج بهنجار شده با پذیرفتاری کایرالیتهی در CPCCW با هسته و پوسته PEMC برای حالت‌های m=0,1 تغییر می‌کند. می‌بینیم که عدد موج بهنجار شده با پذیرفتاری کایرالیتهی برای هر دو حالت m=0 و m=1 افزایش می‌یابد.

شکل ۳ و ۴ نشان می‌دهد که چگونه عدد موج بهنجار شده با شعاع ناحیه پر شده توسط کایروپلاسم تغییر می‌کند. هنگامی که ناحیه پر شده کوچک باشد، جفت‌شدگی بین محیط و موجر کوچک است و هنگامی که افزایش می‌یابد، جفت‌شدگی افزایش می‌یابد.

- [8] M. A. Baqir and P. K. Choudhury, "Dispersion characteristics of optical fibers under PEMC twists," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 28, no. 17, pp. 2124–2134, Nov. 2014, doi: 10.1080/09205071.2014.971974.
- [9] A. Hussain and Q. A. Naqvi, "PERFECT ELECTROMAGNETIC CONDUCTOR (PEMC) AND FRACTIONAL WAVEGUIDE," *Electromagnetic Waves*, vol. 73, pp. 61–69, Jan. 2007, doi: 10.2528/pier07032401.
- [10] A. Ghaffar and M. a. S. Alkanhal, "Power flux distribution in chiroplasma- filled perfect electromagnetic conductor circular waveguides," *Radio Science*, vol. 51, no. 3, pp. 231–240, Mar. 2016, doi: 10.1002/2015rs005736.
- [11] I. V. Lindell and A. H. Sihvola, "The PEMC resonator," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 20, no. 7, pp. 849–859, Jan. 2006, doi: 10.1163/156939306776149824.
- [12] I. V. Lindell and A. H. Sihvola, "Losses in the PEMC boundary," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 9, pp. 2553–2558, Sep. 2006, doi: 10.1109/tap.2006.880740.
- [13] J. R. Sohn, K. Y. Kim, H.-S. Tae, and H. J. Lee, "COMPARATIVE STUDY ON VARIOUS ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTORS FOR LOW-PROFILE ANTENNA," *Electromagnetic Waves*, vol. 61, pp. 27–37, Jan. 2006, doi: 10.2528/pier06011701.
- [14] A. Ghaffar and M. A. S. Alkanhal, "Propagation through chiroplasma waveguide using perfect magnetic conductor boundary conditions," *Canadian Journal of Physics*, vol. 93, no. 12, pp. 1460–1465, Jun. 2015, doi: 10.1139/cjp-2015-0050.
- [15] M. A. Baqir and P. K. Choudhury, "On the energy flux through a uniaxial chiral metamaterial made circular waveguide under PMC boundary," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 26, no. 16, pp. 2165–2175, Sep. 2012, doi: 10.1080/09205071.2012.729299.
- [16] M. X. Gao, B. Guo, L. Peng, and X. Cai, "Dispersion relations for electromagnetic wave propagation in chiral plasmas," *Physics of Plasmas*, vol. 21, no. 11, Nov. 2014, doi: 10.1063/1.4901349.
- [17] B. Guo, "Chirality-induced negative refraction in magnetized plasma," *Physics of Plasmas*, vol. 20, no. 9, Sep. 2013, doi: 10.1063/1.4821981.
- [18] J. Gong, "Electromagnetic wave propagation in a chiroplasma-filled waveguide," *Journal of Plasma Physics*, vol. 62, no. 1, pp. 87–94, Jul. 1999, doi: 10.1017/s0022377899007692.
- [19] M. Alizadehfar, Z. Rahmani, A. Abdoli Arani, "Excitation and amplification of hybrid modes in circular-elliptic combined plasma waveguides including relativistic electron beam", *Journal of Applied Electromagnetism*, vol. 11, Issue 1, pp. 61-73, 2023. [In Persian], 20.1001.1.26455153.1402.11.1.7.8
- [20] B. Abrahami, A. Abdoli Arani, "The effect of a strong uniform axial magnetic field on the TE and TM modes fields and the injected electron dynamics in a plasma waveguide with Piet Hein cross section",

۴- نتیجه گیری

در این کار ارائه شده، یک موج برهم محور شامل هسته و پوسته ی از جنس رسانای الکترومغناطیسی کامل در نظر گرفتیم که فضای بین هسته و پوسته با کایروپلازما پر شده بود . مؤلفه های میدان های الکترومغناطیسی را به صورت تحلیلی محاسبه کردیم . با استفاده از شرایط مرزی مناسب در مرز رسانای الکترومغناطیسی کامل، رابطه ی پاشندگی مدهای هیبریدی را محاسبه نمودیم. رابطه ی پاشندگی را برای مدهای مختلف رسم کردیم . تأثیر پارامترهای کایرالیته، پذیرفتاری رسانایی الکترومغناطیسی کامل و شعاع داخلی و خارجی موج بر هم محور مذکور را بر روی عدد موج بررسی کردیم. نشان داده شد که عدد موج با تغییر پارامترهای مختلف تغییر می کند. در پایان لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در محدوده بسامد و پارامترهای در نظر گرفته شده است. اثرات مختلفی ممکن است در کاربردهای عملی ظاهر شود. ما برخی از اثرات را حذف کردیم . با این حال ، نتایج خوب و قابل قبول است.

۵- مراجع

- [1] D. L. Jaggard, A. R. Mickelson, and C. H. Papas, "On electromagnetic waves in chiral media," *Applied Physics*, vol. 18, no. 2, pp. 211–216, Feb. 1979, doi: 10.1007/bf00934418.
- [2] N. Engheta and P. Pelet, "Modes in chirowaveguides," *Optics Letters*, vol. 14, no. 11, p. 593, Jun. 1989, doi: 10.1364/ol.14.000593.
- [3] I. V. Lindell and A. H. Sihvola, "Perfect electromagnetic conductor," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 19, no. 7, pp. 861–869, Jan. 2005, doi: 10.1163/156939305775468741.
- [4] I. V. Lindell and A. H. Sihvola, "Realization of the PEMC boundary," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 9, pp. 3012–3018, Sep. 2005, doi: 10.1109/tap.2005.854524.
- [5] S. Ahmed and Q. A. Naqvi, "Electromagnetic scattering from a perfect electromagnetic conductor circular cylinder coated with a metamaterial having negative permittivity and/or permeability," *Optics Communications*, vol. 281, no. 23, pp. 5664–5670, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.optcom.2008.09.011.
- [6] A. Ghaffar, M. Z. Yaqoob, M. A. S. Alkanhal, S. Ahmed, Q. A. Naqvi, and M. A. Kalyar, "Scattering of electromagnetic wave from perfect electromagnetic conductor cylinders placed in un-magnetized isotropic plasma medium," *Optik*, vol. 125, no. 17, pp. 4779–4783, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.ijleo.2014.04.061.
- [7] A. Ghaffar, M. Z. Yaqoob, M. A. S. Alkanhal, M. Sharif, and Q. A. Naqvi, "Electromagnetic scattering from anisotropic plasma-coated perfect electromagnetic conductor cylinders," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 68, no. 8, pp. 767–772, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.aeue.2014.03.001.

- [22] Golnaz Khojeh, Abbas Abdoli Arani , (2021). Calculation of the resonance frequency of a toroidal plasma, *Journal of Applied Electromagnetic*, 9(2), 63-70. magiran.com/p2321901. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1400.9.2.8.7>
- [21] Somayeh Pirizad Hejrandoost, Abbas Abdoli Arani , Zeinab Rahmani Nooshabadi, (2023). Calculation of radar cross section of the magnetized plasma antenna with elliptical cross-section, *Journal of "Radar"*, 10(1), 0-0. magiran.com/p2697259 . [In Persian] *Journal of Applied Electromagnetism*, vol.10, Issue 2, pp. 125-138, 2022. [In Persian] dor/20.1001.1.26455153.1401.10.2.11.7