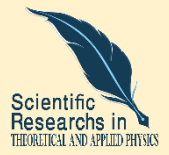


Research Paper



Investigating the effect of intensity and direction of external magnetic field on the distribution of electron density in magnetized plasma under the influence of laser pulse and introducing the determining parameters of plasma dielectric



Hamid Karimian*¹



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:
[10.22034/STRAP.2024.17951](https://doi.org/10.22034/STRAP.2024.17951)

Reference to this article: Karimian, H; (2024). Investigating the effect of intensity and direction of external magnetic field on the distribution of electron density in magnetized plasma under the influence of laser pulse and introducing the determining parameters of plasma dielectric. *Scientific Researches in Theoretical and Applied Physics*, 2 (1): 29-35

Keywords

A B S T R A C T

Received: 2023/09/19
Accepted: 2023/10/25
Available: 2024/05/12

* Corresponding Author: Hamid Karimian
E-mail: h.karimian@urmia.ac.ir

1. Urmia University, Urmia, Iran.

مقاله پژوهشی



بررسی اثر شدت و جهت گیری میدان مغناطیسی خارجی در توزیع چگالی الکترون های پلاسمای مغناطیده تحت تاثیر پالس لیزر و معرفی پارامترهای تعیین کننده دی الکتريک پلاسمای

حمید کریمیان*¹

این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کریتیو کامنز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: کریمیان ، حمید ؛ (1403). بررسی اثر شدت و جهت گیری میدان مغناطیسی خارجی در توزیع چگالی الکترون های پلاسمای مغناطیده تحت تاثیر پالس لیزر و معرفی پارامترهای تعیین کننده دی الکتريک پلاسمای. پژوهش‌های علمی در فیزیک نظری و کاربردی، 2(1): 29-35

DOI: [10.22034/STRAP.2024.17951](https://doi.org/10.22034/STRAP.2024.17951)

چکیده

در این مقاله اثر میدان مغناطیسی چرخشی در توزیع چگالی الکترون های پلاسمای مغناطیده بررسی شده است. در اندرکنش لیزر پرتوان با یک محیط پلاسمایی همواره پدیده های قابل توجهی روی می دهد تاثیراتی که پرتو لیزر پرتوان در یک محیط پلاسمایی ایجاد می کند بسته به میزان شدت لیزر متفاوت خواهد بود. لیزر های پرتوان همواره در اندرکنش با محیط سبب یونش محیط شده و باعث می شود محیط شبه پلاسمایی را ایجاد کند که اگر شدت بالاتر رود محیطی با ویژگی های یک محیط پلاسمایی را ایجاد می کند. همچنین اثرات غیر خطی ناشی از اندرکنش لیزر با محیط پلاسمایی نیز مشاهده می شود. در سال های اخیر شتابدهی الکترون ها به کمک لیزر و بررسی جذب و انتشار امواج الکترومغناطیسی در داخل محیط پلاسمایی بررسی گردیده همچنین خواص اپتیکی محیط های پلاسمایی مورد مطالعه قرار گرفته است یکی از موارد مورد مطالعه تاثیر چگالی بر ضریب دی الکتريک محیط می باشد که سبب ایجاد خواص اپتیکی متفاوتی می گردد پدیده های اپتیکی شامل جذب و انتشار پرتو در داخل محیط های پلاسمایی در حوزه اپتیک خطی در دهه های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته اما با توجه به گستره کاربرد لیزر در زمینه های متفاوت و با توجه به توان بالای لیزر می توان به حوزه غیر خطی نیز وارد شد و پدیده های غیر خطی را در چنین محیط هایی مشاهده کرد. یکی از کارهای انجام گرفته در این زمینه بررسی تاثیر لیزر در نحوه آرایش الکترون ها در محیط پلاسمایی می باشد که نحوه توزیع الکترون ها و در واقع چگالی الکترون ها در اثر اندرکنش لیزر با محیط تغییر می کند و این تغییرات باعث می شود که شکل امواج داخل محیط نیز تغییر پیدا کند با استفاده از معادله انتقال حرکت در پلاسمای و معادله پیوستگی اثر یک میدان مغناطیسی چرخشی را مورد بررسی قرار داده و تغییرات توزیع چگالی در اثر چرخش میدان مغناطیسی را بدست آورده ایم. نتایج به دست آمده نشان می دهد میدان مغناطیسی چرخشی سبب توزیع چگالی بصورت نوسانی می شود بطوریکه میدان مغناطیسی قوی جهت توزیع چگالی الکترون پلاسمای را که تحت میدان الکتريکی اعمالی قرار گرفته است را تغییر می دهد. بنابراین با تعریف پارامترهای متغیر می توانیم تغییرات چگالی را کنترل کرده و در ادامه پدیده های وابسته به چگالی پلاسمای را نیز کنترل کرد. یکی از موارد وابسته به چگالی پلاسمای ضریب شکست وابسته به شدت می باشد که در پدیده های غیر خطی اپتیکی نقش اساسی را ایفا می کند.

کلیدواژه‌ها

پلاسمای کم چگال، اندرکنش لیزر- پلاسمای، چگالی پلاسمای.

دریافت شده: 1402/06/28

پذیرفته شده: 1402/08/03

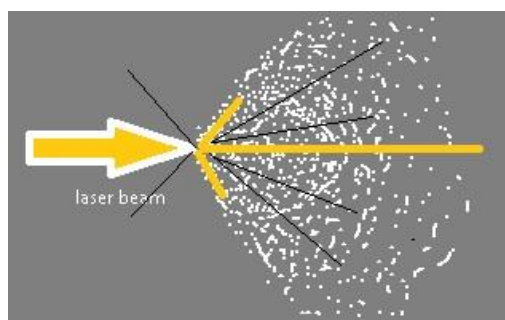
منتشر شده: 1403/02/23

* نویسنده مسئول: حمید کریمیان

رایانامه: h.karimian@urmia.ac.ir

مقدمه

اندرکنش پالس های پرتو لیزر با هر محیطی در حالت کلی سبب یونیده شدن محیط می شود [1-5] بنابراین با ایجاد ناهمگنی در محیط همراه خواهد بود این ناهمگنی به دلیل تغییر چگالی الکترون های داخل محیط ایجاد می شود. علاوه بر میدان الکتریکی پر قدرت لیزر می توان عوامل مختلف دیگری



شکل 1 هنگامی که پرتو لیزر با شدت بالا به یک محیط پلاسمایی می تابد سبب شتاب دهی الکترون های داخل محیط شده در نتیجه توزیع چگالی الکترون ها را تغییر می دهد این تغییرات بسته به شدت لیزر متفاوت خواهد بود. در تغییر چگالی الکترون ها نیز مطرح کرد. تغییرات چگالی الکترون ها که در اثر شتابدهی الکترون ها در داخل محیط صورت می گیرد بعنوان عامل مهم در تغییر چگالی الکترون ها مورد مطالعه زیادی قرار گرفته است. موارد بررسی شده همواره بدون در نظر گرفتن شرایط محیط از نظر عوامل خارجی تاثیر گذار انجام شده است و حالت های نسبیتی و غیر نسبیتی سرعت الکترون ها مورد توجه قرار گرفته است اما می توان شرایطی برای محیط ایجاد کرد که علاوه بر خود لیزر عوامل دیگری را در تغییر چگالی الکترون های محیط در نظر گرفت عوامل خارجی تاثیر گذار بر محیط که می توان آن ها را تحت کنترل بر روی محیط اعمال کرد و شرایط اندرکنش را پیش ببریم کارهای قبلی صورت گرفته معطوف به بررسی توان لیزر و تغییرات توان آن به منظور شتابدهی و تغییر نحوه توزیع الکترون ها انجام گرفته است. هرچه توان لیزر بالاتر باشد در نتیجه آن الکترون ها شتاب بیشتری گرفته و در راستای میدان الکتریکی قرار می گیرند و چگالی بعد از گذشت زمانی به بیشینه مقدار خودش می رسد. این

تغییرات بر اساس معادلات تحول چگالی که قبلا بدست آمده نتیجه گیری شده است [6-9] می توان گفت بعد از خاموش کردن لیزر محیط تقریبا به توزیع الکترونی اولیه خود بر می گردد حالت های نسبیتی و غیر نسبیتی به ترتیب می توانند شرایط ویژه ای در داخل پلازما ایجاد کنند و می توانند موجب تغییر پارامترهای اپتیکی محیط شوند اما به منظور کنترل برخی شرایط ایجاد شده تحت تاثیر اندرکنش می توان عوامل خارجی تعریف کرد که بتوان با کمک آن ها برخی از پارامترهای محیط را کنترل کرد با توجه به وجود ذرات باردار داخل محیط پلازما و تاثیر پذیری آن ها از میدان های مغناطیسی خارجی می توان گفت که یک میدان مغناطیسی با شدت مناسب می تواند بعنوان کنترل کننده و اصلاح کننده توزیع الکترون ها در داخل محیط باشد، با توجه به قابلیت تغییر شدت میدان مغناطیسی، می توان یک کنترل کننده خارجی را برای اندرکنش لیزر با محیط پلازما تعریف کنیم، از دیگر عوامل خارجی کنترل کننده، معرفی یک میدان الکتریکی دیگر یا به عبارتی یک لیزر دیگر در راستای خاص می باشد که می تواند با ایجاد یک نیروی پاندرماتیک سبب نوسان الکترون ها در راستای دلخواه شد که این راستای دلخواه با تغییر زاویه تابش لیزر دوم امکان پذیر می باشد. از پارامترهای اپتیکی که می تواند با تغییر چگالی تغییر کند ضریب کر محیط می باشد که در نتیجه تغییر چگالی و در ادامه سبب تغییر ضریب دی الکتریک محیط می گردد. تغییر ضریب دی الکتریک بعنوان پارامتر اپتیکی محیط در پدیده های غیر خطی از اهمیت زیادی برخوردار می باشد پدیده های غیر خطی مرتبه سوم که در نتیجه تغییر ضریب دی الکتریک ظاهر می شوند و گستره کاربرد زیادی دارند را می توان با معرفی این پارامترها کنترل کرد. فرآیندهایی نظیر خودکانونی و رشته ای شدن پرتو نور در محیط به دلیل تغییرات ضریب دی الکتریک محیط. ما در این مقاله نقش یک میدان مغناطیسی خارجی و چرخش آن را در تغییر نحوه توزیع چگالی الکترون بررسی کرده ایم و شکل میدان های الکتریکی داخل محیط پلازما را بدست

(4)

با تعریف پارامترهای زیر:

$$\xi = \frac{e^2 E^2}{m \omega^2}, \quad \zeta = \frac{eVB \sin \theta}{KT} \quad (5)$$

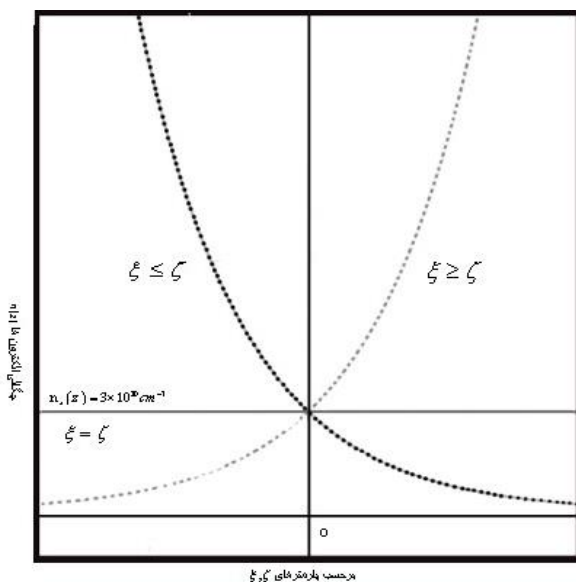
عبارت (4) به شکل زیر در می آید

$$n_e(z) = n_e(z_0) \exp((-\xi + \zeta)(z - z_0)) \quad (6)$$

با توجه به اینکه فرض کردیم تغییرات سرعت حرکت الکترون آهسته می باشد بنابراین رابطه (6) با تغییر شدت میدان مغناطیسی در حالتی که زاویه بین میدان مغناطیسی خارجی با جهت حرکت الکترون ها عمود باشد سه حالت را نتیجه خواهد داد. این حالت ها عبارتند از:

$$\xi \geq \zeta \quad \xi = \zeta \quad \xi \leq \zeta \quad (7)$$

با رسم حالت های بالا چگالی بر حسب پارامترهای تعریف شده به شکل زیر در خواهد آمد.



شکل 2 نمودار تغییرات چگالی بر اساس پارامترهای تعریف شده را نشان می دهد چرخش میدان مغناطیسی نسبت به حرکت الکترون ها که در راستای میدان الکتریکی اعمالی قرار گرفتند باعث می شود با حالت های مشخص شده در رابطه مواجه شویم در اینصورت چگالی

می آوریم. ما برای این کار حالت غیر نسبیتی را در نظر گرفته همچنین تغییرات ناشی از چگالی و تأثیری که بر روی ضریب دی الکتریک دارد را بررسی کردیم. نتایج بدست آمده نشان می دهد اعمال عوامل خارجی می تواند نتایج را تغییر داده و بعنوان پارامترهای قابل کنترل مورد استفاده قرار گیرد.

2- معادلات اساسی

برای این کار ما از معادله انتقال الکترون که برای یک محیط پلاسما صادق می باشد بهره می بریم برای یک محیط پلاسما معادله حرکت به شکل زیر تعریف می گردد.

$$mn_e \frac{\partial V_e}{\partial t} = -n_e e (E + V_e \times B_z) + \nabla P - n_e F_{pe} \quad (1)$$

در این رابطه P ، F و B به ترتیب فشار داخل محیط پلاسما $P = n_e kT$ و نیروی پاندروماتو $F_{pe} = \frac{-e^2 \nabla |E|^2}{m \omega^2}$ و میدان مغناطیسی

تعریف می شود [1-2]. برای توصیف این معادله از تغییرات سرعت الکترون ها صرف نظر می کنیم (تغییرات زمانی سرعت کم و غیر نسبیتی) همچنین فشار داخل محیط را فشار گاز ایده آل در نظر گرفته و طول مشخصه را نیز بزرگتر از طول

موج دبابی انتخاب می کنیم (تقریب مناسب در اندرکنش لیزر با محیط) در نتیجه شکل معادله بالا بصورت زیر در می آید [2-5].

$$-n_e e (V_e \times B_z) + \nabla P - n_e F_{pe} = 0 \quad (2)$$

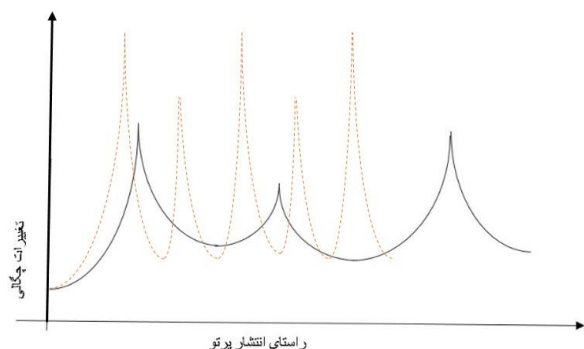
در رابطه (2) می توانیم عبارت اول را بصورت زیر باز نویسی کنیم

$$-n_e eVB \sin \theta + \nabla P - n_e F_{pe} = 0 \quad (3)$$

با حل معادله، تغییرات چگالی در محیط به شکل زیر در می آید.

$$n_e(z) = n_e(z_0) \exp \left(\frac{-e^2 E^2}{m \omega^2} + \frac{eVB \sin \theta}{KT} \right) (z - z_0)$$

همچنین دامنه تغییرات بیشتر از حالتی است که میدان مغناطیسی ثابت بود و زاویه میدان تغییر می کرد.



شکل 5 مقایسه نمودارهای رسم شده برای حالت میدان مغناطیسی ثابت و تغییر زاویه میدان (خط) و میدان مغناطیسی متغیر با زاویه ثابت (نقطه چین). حال با توجه به معادله موج ماکسول شکل میدان الکتریکی در داخل محیط را بدست می آوریم. ابتدا ضریب دی الکتریک پلاسما با وجود میدان مغناطیسی خارجی را بدست آورده و سپس در معادله موج ماکسول قرار می دهیم تا شکل میدان داخل محیط بدست بیاید.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \quad (8)$$

در رابطه (8)، ω_{pe} فرکانس پلاسما می باشد که بصورت

$$\omega_{pe} = 4\pi n_{e0}(z) e^2 / m.$$

الکتریکی می باشد با قرار دادن عبارت (6) چگالی در رابطه (8) شکل دی الکتریک بصورت زیر در می آید

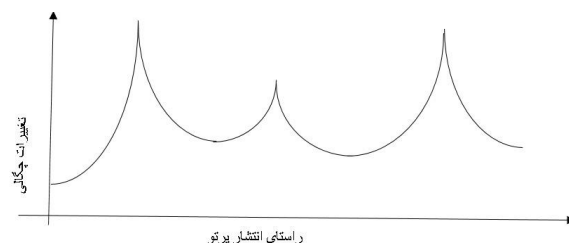
$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2}{m\omega^2} n_e(z_0) \exp(-\xi + \zeta) \quad (9)$$

و با در نظر گرفتن $\omega_0 = \frac{4\pi e^2}{m} n_e(z_0)$ رابطه (9) بصورت زیر در می آید:

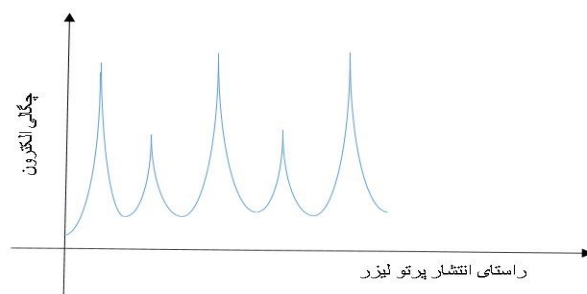
$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp(-\xi + \zeta) \quad (10)$$

رابطه (10)، نشان می دهد ضریب دی الکتریک تحت تاثیر عوامل خارجی میتواند تغییر کند به بیان دیگر محیط نسبت به عامل خارجی از خود عکس العمل نشان داده و سبب تغییراتی در توزیع ذرات در درون محیط گردد. بنابراین بین یک حالت ماکسیمم و مینیمم تغییر

بر اساس سه حالت ممکن می تواند تغییر کند همچنین مشخص می شود چنین حالتی یک تغییر جهت در توزیع چگالی الکترون ها ایجاد کند. این حالت برای حالتی که میدان مغناطیسی به اندازه ای قوی باشد که بتواند پارامترهای $\zeta = \zeta'$ را نتیجه دهد در اینصورت چرخش میدان مغناطیسی می تواند سه حالت رابطه (7) را بیان کند.



شکل 3 نمودار کیفی تغییرات چگالی را با فرض ثابت بودن میدان مغناطیسی و تغییرات زاویه میدان مغناطیسی نشان می دهد. نمودار بصورت پیوسته برای سه حالت متغیر از زاویه صفر میدان مغناطیسی نسبت به انتشار الکترون ها و زاویه عمود بر انتشار و همچنین زوایای بین صفر تا 90 درجه با استفاده از رابطه (6) رسم شده است. تغییرات برای حالت هایی که محیط همگن و یا غیر همگن باشد متفاوت خواهد بود، تغییرات در محیط همگن در تمامی جهات به یک نسبت خواهد بود ولی در حالتی که محیط ناهمگن باشد در نقاطی چگالی بیشتر و در نقاطی چگالی کمتر دیده خواهد شد. همچنین مشاهده می شود که تغییرات چگالی در حالتی که میدان مغناطیسی ثابت می باشد دارای یک ماکسیمم تغییر نسبت به حالت اولیه دارد و با تغییر زاویه بین حالت ماکسیمم و مینیمم یک افزایش نسبی کم تر مشاهده می شود. حال با در نظر گرفتن یک زاویه خاص و ثابت نگهداشتن آن و تغییرات میدان از حالت صفر تا یک حالت بیشینه تغییرات چگالی را در طول انتشار دوباره از رابطه (6) رسم میکنیم.

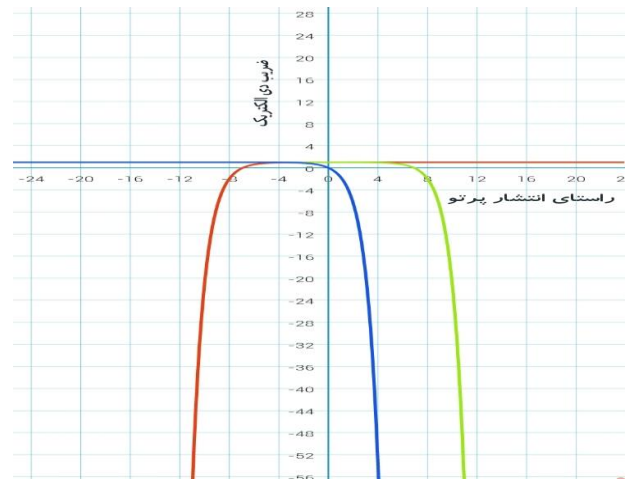


شکل 4 نمودار کیفی تغییرات چگالی بر اساس تغییرات میدان مغناطیسی با ثابت بودن زاویه میدان مغناطیسی با جهت الکترون های پلاسما می باشد. آنچه که از نمودار همامشخص شد در بازه های کوتاه زمانی در حالتی که زاویه میدان با راستای حرکت الکترون ها ثابت است و میدان تغییر می کند. تغییرات چگالی سریع اتفاق می افتد

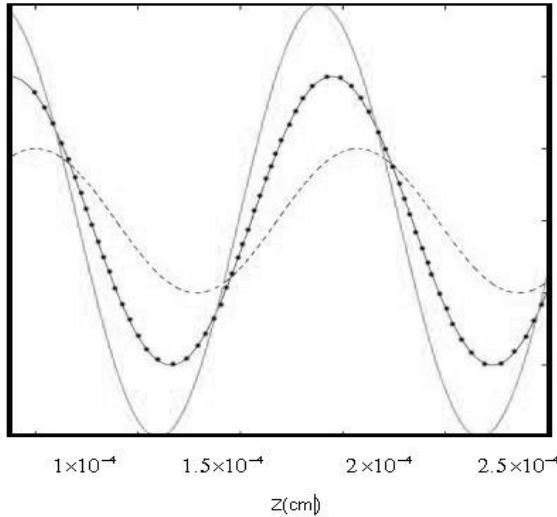
می‌کند.

$$\frac{d^2 E}{dz^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right) \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp(-\xi + \zeta)\right) E = 0. \quad (12)$$

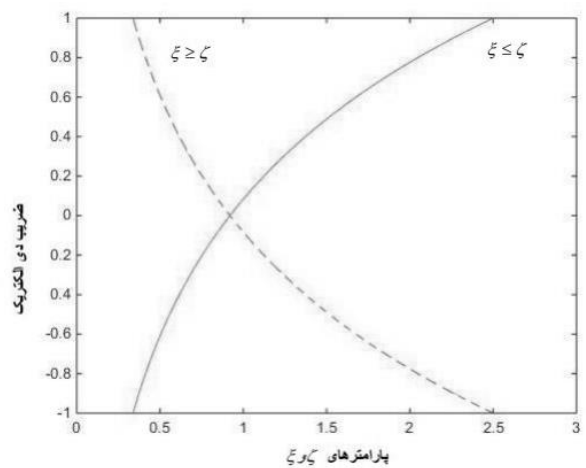
معادله بدست آمده یک معادله غیر خطی می باشد که بصورت عددی قابل حل می باشد. بنابراین با حل عددی آن و رسم نمودار آن شکل میدان‌ها بدست می آید. در شکل 7 نتیجه محاسبه عددی آمده است.



شکل 6 تغییرات ضریب دی الکتریک را برای دو حالت با میدان مغناطیسی ثابت و میدان مغناطیسی متغیر را نشان می دهد نمودار سبز رنگ مربوط به حالتی است که میدان مغناطیسی متغیر بوده و زاویه ثابت می باشد و نمودار قرمز رنگ برای حالتی می باشد که میدان ثابت بوده و زاویه تغییر می کند. نمودار آبی رنگ حد میانگین برای دو حالت را نشان میدهد. با افزایش میدان مغناطیسی تغییرات دز الکتریک در ناحیه چگال تر افزایش چشمگیری پیدا خواهد کرد.



شکل 8 میدان الکتریکی را برای شدت‌های مختلف نشان می دهد در این نمودار منحنی مربوط به شدت 4×10^{17} وات بر سانتی متر مربع بصورت خط ممتد نشان داده شده منحنی‌های نقطه و خط و نقطه چین به ترتیب برای شدت‌های 10^{17} و 4×10^{16} وات بر سانتی متر مربع رسم شده است. با توجه به رابطه (11) و (12) می توان تاثیر پارامترهای معرفی شده بر شکل میدان‌های داخل محیط را مشاهده کرد. با فرض ثابت بودن میدان و تغییر زاویه، شکل میدان‌های الکتریکی داخل محیط به گونه ای است که دارای دامنه ای بیشتر نسبت به حالتی است که زاویه میدان ثابت و میدان مغناطیسی متغیر می باشد. میدان مغناطیسی متغیر سبب ایجاد تغییرات بیشتر چگالی می شود بنابراین میدان‌های الکتریکی با جذب بیشتر الکترون‌ها در ناحیه چگال تر سبب جذب انرژی می شوند بنا بر این انتظار می رود دامنه میدان‌های داخل محیط کمتر شوند. اگر تغییرات چگالی در محیط بصورت همگن اتفاق بیفتد میتوان شکل مشخص و قابل پیش بینی از میدان‌های الکتریکی را مشاهده کرد ولی با توجه به پراکندگی تصادفی الکترون‌ها در نقاط مختلف ما تنها قادر به تشخیص دامنه‌هایی متفاوت از میدان‌ها خواهیم بود که با دامنه میدان ورودی متفاوت خواهد بود. علت این امر وجود برخوردهای بین ذره ای می باشد که در نتیجه آن ذرات مسیریابی متفاوت را در فضای خواهند کرد.



شکل 7 نمودار ضریب دی الکتریک را بر اساس پارامترهای ξ و ζ رسم شده است. ضریب دی الکتریک همانند چگالی تغییراتی به شکل متقارن خواهد داشت. همچنین با استفاده از معادلات ماکسول شکل میدان الکتریکی بدست می آید

$$\frac{d^2 E}{dz^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right) \varepsilon E = 0 \quad (11)$$

3- نتیجه گیری

در این بررسی ما نقش میدان مغناطیسی خارجی را در اندرکنش لیزر با محیط پلاسمای کم چگال بررسی کردیم و با معرفی پارامترهای میدان الکتریکی و مغناطیسی تاثیر مقادیر آن ها را نسبت به هم در نظر گرفتیم با توجه به فرضیات مساله معادلات را ساده سازی نموده و توزیع چگالی و ضریب دی الکتریک را بدست آوردیم مشخص شد که پارامترهای معرفی شده در حالت های مختلف سبب تغییرات در توزیع چگالی الکترون و همچنین ضریب دی الکتریک محیط می گردد در نتیجه مشاهده شد توزیع چگالی الکترون ها و همچنین ضریب دی الکتریکی بصورت متناوب تغییر علامت داده به این معنی که جهت گیری آن ها قرینه می گردد این نتیجه گیری با ثابت ماندن شدت میدان مغناطیسی خارجی و چرخش میدان نیز اتفاق می افتد به طوریکه با ثابت نگهداشتن زاویه و تغییر میدان مغناطیسی مشاهده گردید تغییرات چگالی سریع تر و در دامنه بیشتری اتفاق افتاد در حالی که با ثابت نگهداشتن میدان و تغییر زاویه آن این تغییرات به نسبت کمتر اتفاق افتاد.

منابع و مراجع

- [1] Harilal, S., & Tillack, M. S. (2004). Laser plasma density measurements using interferometry. Fusion Division, Center for Energy Research, University of California, San Diego, La Jolla, CA, October.
- [2] Iwata, N., Kojima, S., Sentoku, Y., Hata, M., & Mima, K. (2018). Plasma density limits for hole boring by intense laser pulses. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02829-5>.
- [3] Aragón, C., & Aguilera, J. A. (2008). Characterization of laser induced plasmas by optical emission spectroscopy: A review of experiments and methods. In *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy* (Vol. 63, Issue 9). <https://doi.org/10.1016/j.sab.2008.05.010>
- [4] Campanella, B., Legnaioli, S., Pagnotta, S., Poggialini, F., & Palleschi, V. (2019). Shock waves in laser-induced plasmas. In *Atoms* (Vol. 7, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/ATOMS7020057>.
- [5] Yu, J. Y., Chen, M., Liu, W. Y., Weng, S. M., & Sheng, Z. M. (2020). Radiation reaction induced harmonics generation in ultra-relativistic intense laser interaction with plasmas. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 62(5). <https://doi.org/10.1088/1361-6587>.
- [6] E. M. CAMPBELL, *PHYS. Fluids*, B.4,3781 (1992).
- [7] A. couairon, and L. Berge, *physics of plasma*, 7,193(2000).
- [8] P. Sprangle, E. Esarey, and J. Krall, *phys. Rev* E.45,4211(1996).
- [9] N. B. Delone, and V. P. Krainov, *multiphoton processes in Atom* (Berlin, New York, springer-verlag, 1999).