

# هارمونیک های بالا با استفاده از تابش لیزر فمتوثانیه بر روی پلاسمای چگال تولید شده از هدف جامد

رسول صدیقی بنایی<sup>۱</sup> فریبا فرزندی ارجمندی بناب<sup>۲</sup>

تاریخ ارسال ۹۵، پذیرش بهمن ۹۵

**چکیده:** در این مقاله به بررسی نظری تولید هارمونیک های بالا در اندر کنش لیزر پر شدت با اهداف جامد و پلاسمای فوق چگال پرداخته شده است. مشاهده می شود که بازده اشعه ایکس تولیدی در این حالت بیشتر از تولید آن با استفاده از هدف های گازی می باشد. تاثیر پارامترهای مختلف لیزر و پلاسمای در شدت هارمونیک های تولید شده توسط کد شبیه سازی ذره در سلول بررسی شده است. به بررسی تاثیر عوامل مختلف بر روی پهنای زمانی تپ های آتو ثانیه حاصل از هارمونیک های بالا پرداخته شده است. همچنین راندمان تولید اشعه ایکس در شدت های مختلف لیزر در ناحیه غیر نسبیتی و شدت های نسبیتی را بررسی شده است. این شبیه سازی را در قطبش های مختلف نیز انجام داده و دامنه بدست آمده را نیز مقایسه کردیم و به این نتیجه رسیدیم که دامنه نوسانات سطح پلاسمای در قطبش  $P$  بیشتر از قطبش  $S$  می باشد. علاوه بر آن طول بهینه پلاسمای را برای هارمونیک های هشتم با مطالعه طول رمپ های مختلف را بدست آوردیم.

**واژه های کلیدی:** لیزر پر توان تپی، پلاسمای لیزری پر چگال، تولید هارمونیک های بالا

مولکول یا ماده جامد) شدت مورد نیاز لیزر فرودی و پاسخ متفاوت خواهد بود. لیزرهای فمتو ثانیه ای، دارای اندازه کوچک و شدت بالا می باشند. میدان الکتریکی این لیزرها می تواند ضخامت مشخصی از اتم ها را یونیزه کرده و پلاسمای تشکیل دهد. تپ بعدی این لیزرها توسط الکترون های موجود در پلاسمای جذب شده و الکترون ها شتاب می گیرند. یون ها نیز بخاطر سنگین تر بودنشان ثابت در نظر گرفته می شوند. در سال ۱۹۷۹ تاجیما و داوسون به این نتیجه رسیدند که تپ های لیزری شدت بالا با عبور از پلاسمای، موجهای پلاسمای الکترونی تولید می کنند. امروزه دو مکانیزم شناخته شده برای بر هم کنش لیزر فمتو ثانیه و پلاسمای فوق

## ۱. مقدمه:

با گسترش علوم مربوط به ساخت لیزر افزایش دامنه کاربردهای آن نیاز به وجود تابشهای لیزری با طول موج هایی در محدوده ی اشعه UV و X و همچنین با پهنای زمانی کوتاهتر از فمتوثانیه بیش از پیش احساس می شد. پدیده تولید هارمونیک های بالا یک فرآیند کاملاً غیر خطی [۱] است که در رژیم میدان قوی رخ می دهد. کمترین شدت تپ مورد نیاز در این فرآیند  $10^{13} W/cm^{-2}$  است که در نتیجه تمرکز یک باریکه فمتو ثانیه پر شدت بر روی سطحی با ابعاد میکرون به دست می آید. بسته به محیط هدف (شامل گاز، اتم و

<sup>۱</sup> استاد تمام گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد تهران شمال

### ۳. روش محاسبات

کاربرد قوانین موجود فیزیکی در دنیای واقعی که اغلب شامل مجموعه هایی از تعداد زیادی از ذرات در یک سیستم هستند به دلیل تعداد محاسبات بسیار زیاد و غیر خطی شدن معادلات غیر ممکن است. یکی از قدرتمند ترین ابزارها برای مطالعه اندر کنش لیزر و پلاسما کد شبیه سازی ذره در سلول  $PIC$  است. کد  $PIC$  می تواند بر هم کنش میان موج الکترومغناطیسی و ذرات باردار را شبیه سازی کند. روش ذره در جعبه  $PIC$  از جمله روش هایی است که برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی مورد استفاده قرار می گیرد و روش موفق در کارهای شبیه سازی ذره ای پلاسما به حساب می آید این روش در اواخر دهه ۱۹۵۰ و اوایل دهه ۱۹۶۰ توسط بونمن، داسون، هاکنی، بردسال و موریس فراگیر شد. اصول کار این گونه کدها همانند سایر کدهای شبیه سازی بدین صورت است که فضا به سلول های مختلفی تقسیم می شوند  $(x_i = x_0 + i \Delta x)$  بطوریکه هر سلول شامل ذرات بزرگ<sup>۱</sup> است. در حقیقت یک ذره بزرگ مجموعه ای از تعداد زیادی (۱۰۰ تا ۱۰۰۰) ذره باردار الکترون یا پروتون است که در شبیه سازی به منظور ساده سازی و صرفه جویی در زمان، بعنوان یک تک ذره که در مکان  $(x_j)$  قرار دارد در نظر گرفته می شود. مطابق شکل ۱ در مرحله اول چگالی بار  $\rho(x_j)$  و جریان  $j(x_j)$  ذرات باردار توسط درون یابی در هر سلول  $x_i$  محاسبه شده و با کمک این چگالی ها، میدان های الکترومغناطیسی  $E(x_i)$  و  $B(x_i)$  درون سلول با حل عددی معادلات ماکسول به دست می آیند. سپس این میدان ها برای محاسبه توزیع جریان و بار در سلول بعدی مورد استفاده قرار می گیرند و این چرخه برای

چگال وجود دارد: تابش همدوس دنباله ای  $CWE$ <sup>۱</sup> و دیگری آینه نوسانی نسبیتی<sup>۲</sup>  $[2] ROM$ . در حالیکه فرآیند  $ROM$  برای شدت های نسبیتی  $a > 1$  از لیزر فرودی نیز مورد استفاده قرار می گیرد ولی پدیده  $CWE$  برای بررسی مکانیزم تولید هارمونیک ها در شدت های غیر نسبیتی مناسب است. هنگامی که میدان الکترومغناطیسی به سطح یک پلاسما ی فوق چگال نزدیک می شود میدان الکتریکی و نیروی پاندر ماتیو تپ موجب نوسان الکترون ها و خارج شدن آنها از جاذبه یون ها می شود. یون های درون پلاسما در بازه زمانی فمتو ثانیه حرکت نمی کنند و ثابت هستند در نتیجه الکترون های خارج شده توسط نیروی جاذبه کولمبی یون ها و به اصطلاح نیروی باز گرداننده به درون پلاسما کشیده می شوند. در نتیجه ی تعادل بین نیروی تپ فرودی و جاذبه یون ها، الکترون ها در سطح پلاسما دارای نوسانات دوره ای با فرکانس میدان الکتریکی فرودی  $(\omega)$  و نیروی پاندر ماتیو  $(2\omega)$  خواهند شد که این نوسانات همانند حرکت یک الکترون تنها در حضور یک میدان الکترومغناطیسی و شبیه به ۸ است. اگر شدت لیزر فرودی بالا باشد  $(a > 1)$  بیشینه سرعت نوسان الکترونها در سطح به سرعت حرکت نور در خلأ  $(c)$  نزدیک خواهد شد و حرکت الکترون ها نسبیتی خواهد شد. چون تپ فرودی از سطحی که با سرعت نسبیتی در حال نوسان است باز تاب می گردد به دلیل رخداد پدیده جابجایی داپلری، فرکانسی بیشتر از فرکانس لیزر فرودی در باز تاب تولید می شود. به دلیل متفاوت بودن صفحه نوسانات میدان الکتریکی در قطبش های مختلف، مکانیزم تولید هارمونیک ها، کاملاً به قطبش لیزر فرودی وابسته است.

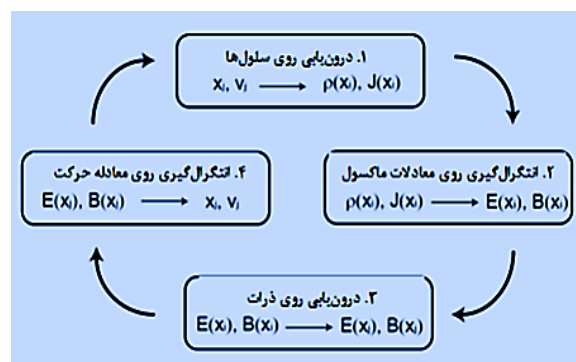
<sup>1</sup> Coherent Wake Emission

<sup>2</sup> Relativistic Oscillating Mirror

#### ۴. نتایج محاسبات

در این قسمت به بررسی عوامل مختلف تاثیر گذار در تولید طیفی از هارمونیک های بالا در ناحیه اشعه X ثانیه می پردازیم. از عوامل مورد بررسی قرار گرفته می توان به پارامترهای مختلف از لیزر فرودی همانند شدت تپ، قطبش، زاویه فرودی، پهنای زمانی و... و از پارامترهای مختلف پلازما نظیر چگالی الکترونی، انرژی الکترون ها، ضخامت هدف جامد و ... نام برد. همچنین نقش فیلترهای مختلف در تولید تپ آتو ثانیه بهینه نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا به بررسی شدت لیزر فرودی در تولید طیف اشعه X می پردازیم. طیف تابش X از امواج الکترومغناطیسی در بازه طول موجی  $10\text{nm} - 0.01$  قرار دارد و دارای فرکانس بین  $3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19} \text{HZ}$  و فوتون هایی با انرژی  $100\text{eV} - 100\text{keV}$  می باشد. تابش های X با طول موج بین  $10\text{nm} - 0.1$  را اشعه X نرم<sup>۵</sup> و طول موج های پایین تر از  $0.1\text{nm}$  را اشعه X سخت<sup>۶</sup> نامند. با توجه به اینکه در این پژوهش و شبیه سازی ها از لیزری با طول موج  $800\text{nm}$  استفاده شده است بنابراین هارمونیک هشتماد و بالاتر از این طول موج در ناحیه تابش X قرار می گیرد. پس در بررسی ها، هارمونیک هشتماد طیف های تولید شده مورد توجه بوده و با یکدیگر مقایسه شده اند. در این بررسی ها از نتایج شبیه سازی PIC یک بعدی استفاده شده است. تپ فرودی با دامنه  $(1-5)$  با شکل زمانی  $(\sin^2(\pi t / \Delta t))$  و پهنای  $\Delta t$   $20T = 53 \text{ fs}$  که  $T = 2.5\text{fs}$  یک دوره کامل میدان الکتریکی لیزر Ti:Sapphire با طول موج مرکزی  $\lambda = 800\text{nm}$  است، در قطبش های مختلف تحت زاویه  $\alpha$  بر روی سطح پلازما تابانده می شود.

تمام سلول ها تکرار می گردد. همان طور که بیان شد کد PIC تنها از حل عددی معادلات اساسی الکترومغناطیس و معادله حرکت استفاده می کند و فرض دیگری ندارد. در این قسمت برای مطالعه پدیده تولید هارمونیک های بالا از کد شبیه سازی PIC با نام ++LPIC<sup>۴</sup> استفاده شده است. این کد یک بعدی در مکان و با قابلیت در نظر رفتن سه بعد سرعت، به منظور شبیه سازی برهم کنش تپ لیزری با طول موج  $\lambda = 800\text{nm}$  و پلازما در زوایای فرودی مختلف با قطبش های متفاوت است.

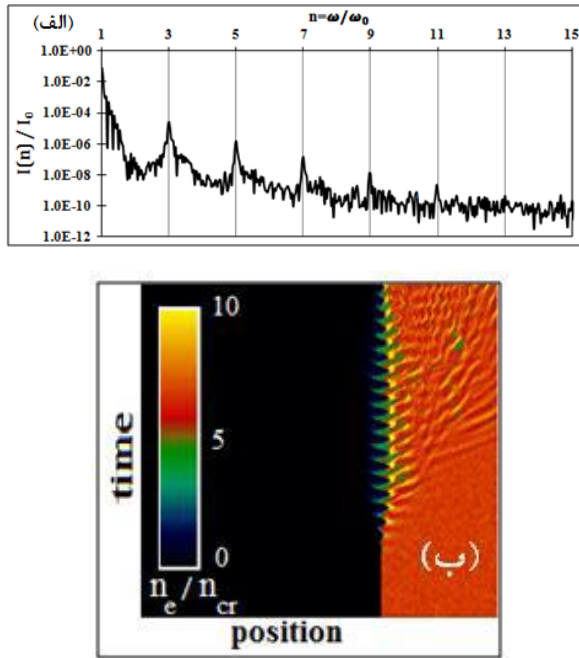


شکل ۱: الگوریتم شبیه سازی PIC

از مزیت های این کد یک بعدی در مقایسه با کد های دو بعدی و سه بعدی دیگر در مدت زمان پایین تر انجام محاسبات می باشد که یک پارامتر مهم در شبیه سازی محسوب می شود [۳]. برای در نظر گرفتن زوایای فروید در این کد، ابتدا معادلات در چهار چوب متحرکی که با سرعتی برابر با سرعت مؤلفه عمود بر سطح لیزر است، حل شده و سپس با استفاده از تبدیلات لورنتس جواب معادلات در دستگاه لخت آزمایشگاه به دست می آید.

5 Soft X-ray  
6 Extreme X-ray

<sup>4</sup> Laser particle-in-cell



شکل ۲: (الف) طیف هارمونیک ها و (ب) نوسانات روی سطح در نمودار توزیع چگالی الکترونی در حالت ۱ غیر نسبیتی

در نتایج زیر تپ با شدت های نسبیتی مختلف و قطبش به صورت عمود به سطح پلاسمایی با چگالی الکترونی و پیش پلاسمای خطی با طول مشخصه تابانده می شود. مقادیر پارامترهای انتخاب شده جز مقادیر بهینه شده و مربوط به مطالعات پیشین در این زمینه هستند. [۴] و [۵]

$$-1a = 1$$

مطابق نتایج حاصل از شبیه سازی لیزر با شدت به پلاسمایی با چگالی بالا برخورد می کند و طیف هارمونیکهای تولید شده و توزیع الکترونی سطح در شکل ۴ نشان داده شده است.

پلاسمای فوق چگال با چگالی های الکترونی  $n_e/n_c$  متفاوت بعنوان هدف در نظر گرفته شده است تا تاثیر آنها در شدت هارمونیک های تولید شده بررسی شود. لازم به ذکر است که در تمام شبیه سازی ها، بدلیل کوتاه بودن تپ ها، یون در نظر گرفته شده اند چون حرکت قابل توجه ای ندارند که این فرض مطابق با اصول مدل آینه نوسانی است. در این قسمت تاثیر تغییر شدت برای پلاسمایی با چگالی یکسان بررسی می شود.

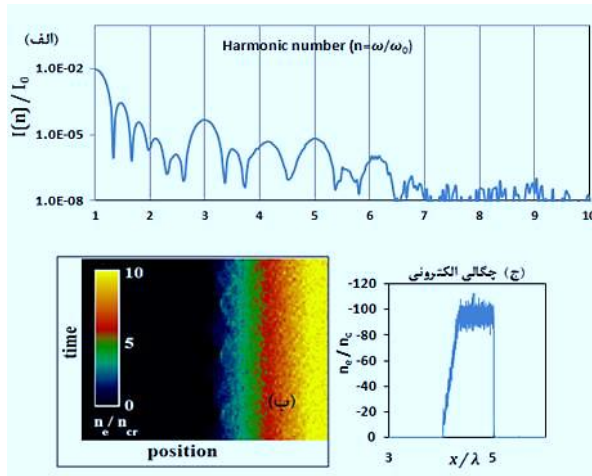
$$-1 \quad a = 0.5 \quad \text{و} \quad n_e/n_c = 7 \quad \text{تحت تاثیر} \quad \alpha = 0$$

نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است که مطابق آن فرکانس قطعی در هارمونیک یازدهم از فرکانس اصلی وجود دارد. فرکانس تولید شده دارای شدتی معادل با  $10^8$  برابر کمتر از شدت لیزر فرودی است.

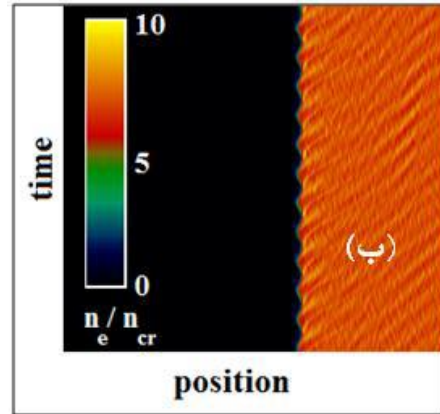
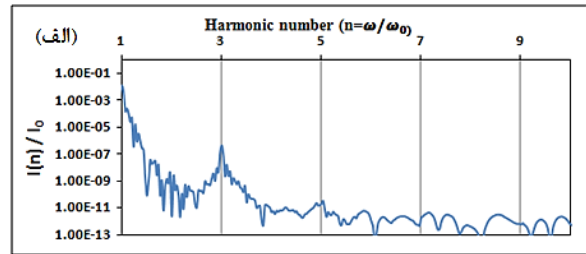
$$-2 \quad a = 0.2 \quad \text{و} \quad n_e/n_c = 7 \quad \text{تحت زاویه} \quad \alpha = 0$$

$$a = \frac{eE}{mc\omega_L} = \left( \frac{I \lambda^2}{1.37 \times 10^{18} \text{ w cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^2} \right)^{1/2}$$

در این حالت شدت لیزر فرودی تقریباً برابر  $I = 10^{16} \text{ w cm}^{-2}$  است که مطابق شکل ۳ دارای فرکانس قطعی در هارمونیک سوم با شدت  $10^7$  برابر کمتر از شدت تپ فرودی است. مطابق شکل های در شدت های غیر نسبیتی تولید هارمونیک هشتم برای استخراج اشعه X به هیچ عنوان دارای بازده مناسبی نیست به طوری که شدت هارمونیک ها نسبت به شدت اولیه بسیار کاهش می یابد. با توجه به اینکه تپ فرودی دارای قطبش بود طبق پیش بینی مدل آینه نوسانی تنها هارمونیک های فرد از هارمونیک اصلی تولید شده اند. اگر دامنه نرمال شده لیزر فرودی باشد الکترون های سطح پلاسمای دارای سرعت نسبیتی شده و در تمام معادلات جایگزین می شود.



شکل ۴: طیف هارمونیک ها و (ب) و (ج) توزیع چگالی الکترونی در مکان و زمان در حالت ۱ نسبیتی



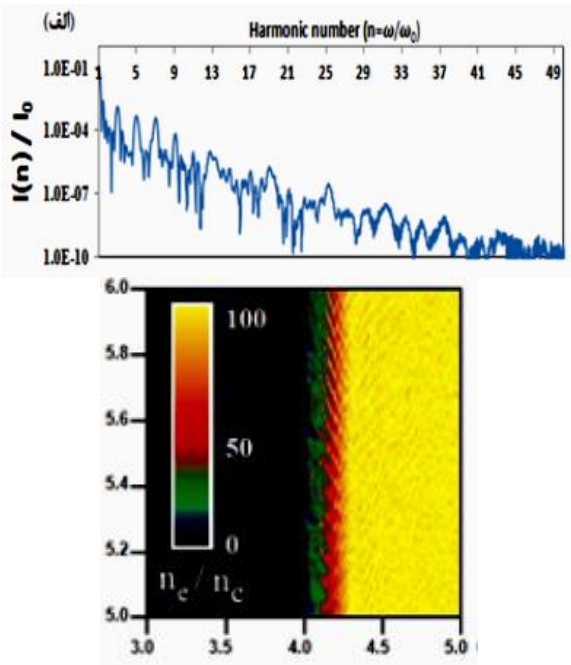
شکل ۳: طیف تولید شده و نوسانات سطح در حالت ۲ غیر نسبیتی

$$a = 3^{-1}$$

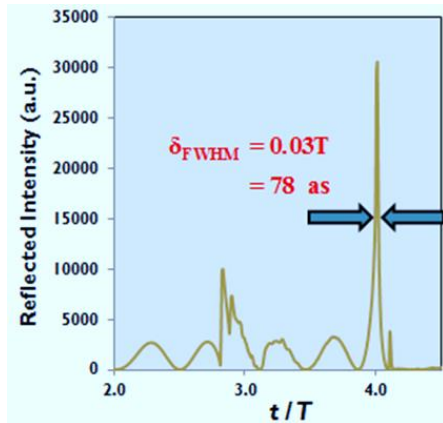
طیف هارمونیکها و توزیع چگالی الکترونی در مکان و با گذشت زمان در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می شود تعداد هارمونیک های تولید شده در این حالت از حالت ۱ نسبیتی بیشتر است.

$$a = 10^{-3}$$

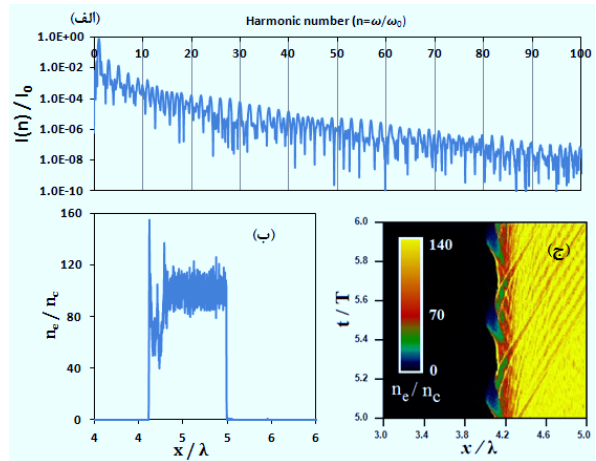
مطابق شکل (۵-۵) تولید طیف هارمونیک ها در شدت حدود  $10^{20} \text{ W/cm}^2$  دارای بازده قابل قبولی نسبت به حالتهای قبل است بطوریکه هارمونیک صدم از فرکانس اولیه دارای شدتی معادل  $10^8$  برابر کمتر از شدت لیزر اولیه است. چگالی الکترونی در لحظه تولید تابش ها در شکل (۶ ب) نشان داده شده است.



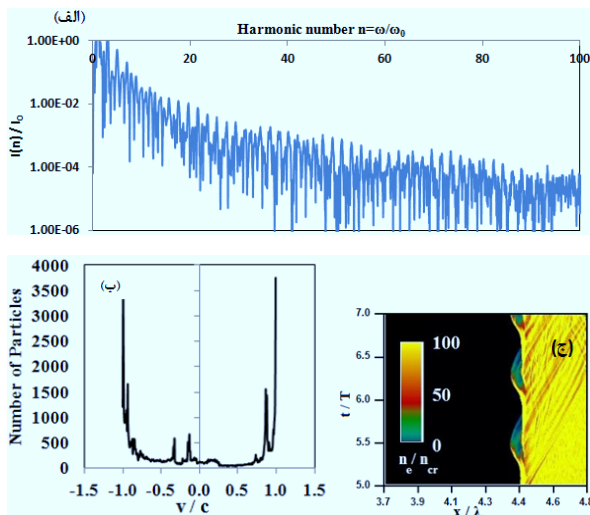
شکل ۵: طیف هارمونیک ها و توزیع چگالی الکترونی در حالت ۲ نسبیتی



شکل ۸: تپ آتو ثانیه تولید شده



شکل ۶: (الف) طیف هارمونیک های تولید شده و (ب) و (ج) توزیع چگالی الکترونی سطح در حالت ۳ نسبتی



شکل ۹: طیف هارمونیک های تولید شده (الف). توزیع سرعت (ب). و توزیع چگالی الکترونی (ج)، در حالت ۵ نسبتی

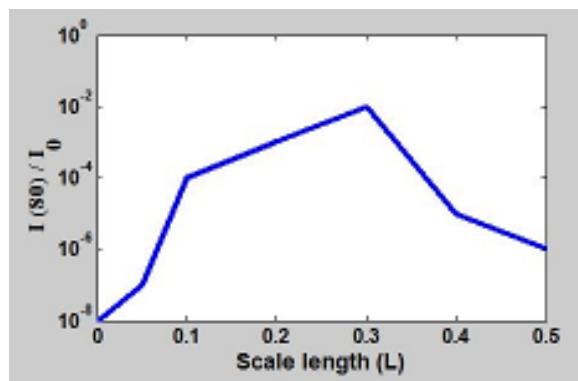
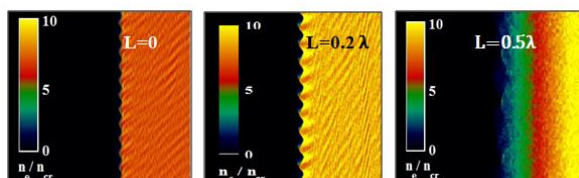
۴-۳۰ = a در این شدت مطابق شکل شدت هارمونیک صدم در حدود مطلوبی به اندازه  $10^5$  برابر کمتر از شدت لیزر فرودی است. میدان الکتریکی بازتابی نیز در شکل نشان داده شده است. شکل ۷: (الف) طیف هارمونیک های تولید شده (ب) توزیع چگالی و (ج) میدان الکتریکی بازتابی همچنین شدت تپ فرودی در شکل ۸ نشان داده شده است که منجر به تولید تپی با پهنای زمانی ۷۸ ns شده است. با استفاده از فیلتر شدت در مسیر این تپ، می توان تک تپ آتو ثانیه را استخراج نمود.

۵-۶۰ = a در شدت های کاملاً نسبتی شدت تولید هارمونیک صدم در حدود  $10^{14}$  کمتر از شدت هارمونیک اول است.

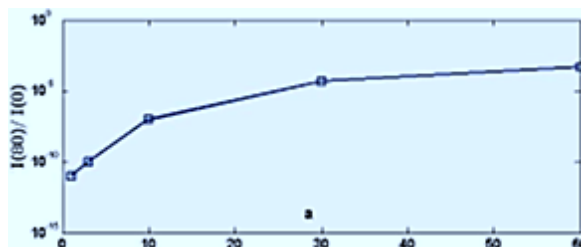
به منظور مقایسه طیف هارمونیک های تولید شده و بررسی تاثیر شدت لیزر فرودی بر روی تابش X خروجی، در این قسمت شدت هارمونیک هشتم از طیف های بدست آمده را با یکدیگر مقایسه می کنیم.



طوری که شدت هارمونیک ها نسبت به شدت اولیه بسیار کاهش می یابد و با توجه به اینکه تپ فرودی دارای قطبش بود طبق پیش بینی مدل آینه نوسانی تنها هارمونیک های فرد از هارمونیک اصلی تولید شده اند. اما در شدت های نسبی که در شدت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت تعداد هارمونیک های تولید شده بیشتر شد. در مقایسه هارمونیک های هشتماد در شدت های مختلف از فرکانس دامنه اشعه ایکس تولید شده به این نتیجه رسیدیم در شدت های بزرگتر از ۵۰ دیگر تولید هارمونیک بیشتر نخواهیم داشت. شبیه سازی را در قطبش های مختلف بررسی کرده و دامنه بدست آمده را نیز مقایسه کردیم و به این نتیجه رسیدیم که دامنه نوسانات سطح پلاسمای در قطبش  $P$  بیشتر از قطبش  $S$  می باشد. علاوه بر آن با مقایسه طول رمپ های مختلف هارمونیک های هشتماد، طول بهینه را بدست آوردیم.

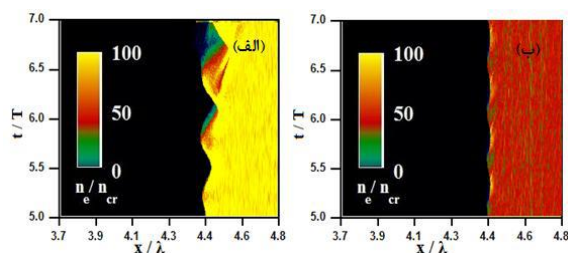


شکل ۱۲: مقایسه شدت هارمونیک هشتماد تولید شده (تابش  $X$ ) با شدت لیزر فرودی با  $L$  مختلف



شکل ۱۰: مقایسه شدت هارمونیک هشتماد تولید شده (تابش  $X$ ) با شدت لیزر فرودی

در شکل ۱۱ نتایج شبیه سازی در قطبش های مختلف از نشان داده شده است. همانطور که مشخص است دامنه نوسانات سطح پلاسمای در قطبش  $P$  بیشتر از حالت  $S$  است.



شکل ۱۱: تفاوت نوسانات سطح در قطبش  $P$  و  $S$  از لیزر فرودی

در این قسمت طول رمپ یعنی  $L$  را تغییر داده ایم و در هارمونیک هشتماد مقدار آنها را رسم نمودیم. مطابق شکل ۱۲ بهترین حالت بهینه طول رمپ که  $L = 0.3\lambda$  است، بهترین شدت خروجی را می دهد.

## ۵. نتیجه گیری

به بررسی نظری تولید هارمونیک های بالا در اندر کنش لیزر پر شدت با اهداف جامد و پلاسمای فوق چگال پرداخته شده است. شدت های غیر نسبیتی را با شدت های نسبیتی را بررسی کرده، با هم مقایسه کردیم. در شدت های غیر نسبیتی تولید هارمونیک هشتماد برای استخراج اشعه  $X$  به هیچ عنوان دارای بازده مناسبی نیست به

## ۶. منابع

- [1] Letokhov V. S and Chebotayev V. P, Nonlinear laser spectroscopy (Springer-Verlag, Berlin, 19770).
- [2] Lichters J. M.-t.-V. A. A. P. R , "Short-pulse laser harmonics from oscillating plasma surfaces driven at relativistic intensity," Phys. Plasmas, 1996 vol. 3(9).
- [3] Von der Linde K. R. D, "High-order optical harmonic generation from solid surfaces," Appl. Phys. 1996, B, vol. 63, pp. 499-506.
- [4] Alexander Tarasevitch K. L. C. W. a. D. v. d. L, "Transition to the Relativistic Regime in High Order Harmonic Generation," 2007. PHYSICAL REVIEW LETTERS, vol. 98, p. 103902.
- [5] Linde A. T. a. D. v. d, "High order harmonic generation from solid targets: Toward intense attosecond pulses. 2009," European Physical Journal, vol. 175, pp. 35-41.



## **High-order harmonic generation from over dense plasma by interaction of intense femtosecond laser pulses with solids**

R. Sadighy Bonab & F. Farzandy Arjmandy Bonab

### **Abstract**

**I**n this work high harmonic generations by interaction of intense lasers with solid targets and ultra-dense plasma is studied. It is notice that the X rays have produced with higher efficiencies with these targets in comparison with gas jets. In this thesis also the effect of various parameters on the width of generated atto-second pulses in high harmonic is investigated. The efficiency of produced x rays are calculated versus laser intensity both in relativistic and under relativistic regions. The current simulation is also carried out in various laser pulse polarizations and in this found that the amplitude of plasma oscillations are higher in p-polarization in comparison to the one with s-polarization. Furthermore, the optimum plasma length is defined by testing various plasma ramps.

**Keywords:** high power pulsed laser, laser plasma high-density, High-order harmonic generation.