
Investigation of Length Reduction and Radiation Power enhancement of the Short-Wavelength Free Electron Laser

E. Nouri*, H. Voosouqian

* Assistant Professor, Plasma and Nuclear Fusion Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

(Received: 24/10/2020; Accepted: 15/06/2021)

Abstract

The free electron laser technology is one of the most suitable options to achieve high power, coherent radiation in the range of short wavelengths, especially XUV and X. One of the most important challenges in the construction of short-wavelength free electron lasers is the large dimension of the system. Therefore a significant part of free electron laser researches is concentrated on length reduction and radiation enhancement of the system. In this paper, the performance of free electron lasers in the range of XUV or soft X is investigated and some techniques for length minimization and radiation enhancement of the system are presented. For this purpose, methods such as higher harmonics production of the radiation field and pre-bunched injection of the electron beam into the wiggler are studied. The wiggler tapering method is used to amplify the radiation field in order to compensate for the decrease in the radiation power of the third harmonic. Based on three-dimensional simulations performed using the MEDUSA code, it is observed that wiggler tapering can increase the radiation power significantly. It is also shown that using a pre-bunched electron beam can amplify the saturation power and accelerate the growth process of the radiation field and thus reduce the saturation length of the free electron laser. Therefore, tapering of the wiggler field along with the beam pre-bunching method can play a very important role in length reduction and amplification of the radiation field of short-wavelength free electron laser.

Keywords: Free Electron Laser, Radiation Harmonics, Electron Beam Pre-bunching, Wiggler Field Tapering.

مطالعه امکان کاهش ابعاد و افزایش توان تابشی لیزر الکترون آزاد در محدوده طول موج‌های کوتاه

احسان‌اله نوری^{۱*}، حسن وثوقیان^۲

۱- استادیار، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، ۲- استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران
(دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱)

چکیده

فناوری لیزر الکترون آزاد، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها جهت دستیابی به تابش همدوس با توان و کیفیت بالا در محدوده طول موج‌های کوتاه به ویژه XUV و X به شمار می‌رود. یکی از مهم‌ترین مشکلات در ساخت لیزرهای الکترون آزاد طول موج X، بزرگ و حجیم بودن سامانه لیزر الکترون آزاد می‌باشد. از این رو، بخش قابل توجهی از تحقیقات لیزر الکترون آزاد طول موج کوتاه، در ارتباط با توسعه روش‌های کوچک‌سازی و افزایش توان تابشی سامانه می‌باشد. در این مقاله، عملکرد لیزر الکترون آزاد در محدوده طیف تابشی XUV یا X نرم مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهایی در جهت کاهش طول و افزایش توان تابشی آن ارائه شده است. بدین منظور، روش‌هایی مانند تولید هماهنگ‌های بالاتر تابشی و پیش‌دسته‌بندی باریکه الکترونی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای جبران کاهش توان تابشی هماهنگ سوم، از روش کشیدگی دامنه میدان ویگلر جهت تقویت و افزایش توان میدان تابشی استفاده شده است. بر اساس شبیه‌سازی‌های سه بعدی صورت گرفته با استفاده از کد MEDUSA، مشخص شد که در صورت استفاده از روش کشیدگی میدان ویگلر، توان تابش اشباع به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. همچنین نشان داده شد که پیش‌دسته‌بندی پرتو الکترونی، علاوه بر تقویت توان تابشی می‌تواند باعث تسریع در فرآیند رشد میدان تابشی و در نتیجه کاهش طول اشباع در لیزر الکترون آزاد شود. بنابراین، استفاده از روش پیش‌دسته‌بندی باریکه الکترونی به همراه کشیدگی میدان ویگلر می‌تواند نقش بسیار مهمی در کوچک‌سازی و تقویت توان تابشی لیزر الکترون آزاد داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: لیزر الکترون آزاد، هماهنگ تابشی، پیش‌دسته‌بندی باریکه الکترونی، کشیدگی میدان ویگلر

۱- مقدمه

گسترده‌ای از طول موج‌ها و محدودیت در ارتباط با کانونی‌سازی ابزارهای اپتیکی در محدوده طول موج کوتاه، روبه‌رو است. در این میان، لیزر الکترون آزاد^۱ (FEL) به‌عنوان یک گزینه مناسب و مقرون به صرفه جهت تولید تابش همدوس در گستره وسیعی از طیف الکترومغناطیس از جمله طول موج‌های کوتاه به شمار می‌رود. در ابتدای ساخت لیزر الکترون آزاد، به دلیل مشکلات ناشی از کیفیت پایین دسته‌بندی الکترون‌ها، خروجی اپتیکی تابش همدوس با توان مناسب قابل دسترسی نبود. از این رو، مطالعات گسترده‌ای بر روی رژیم‌های عملیاتی و بهبود سازوکار عملکرد الکترون آزاد انجام گرفته است. از جمله مهم‌ترین این تحقیقات عبارت بودند از: مطالعه هدایت‌گر اپتیکی تابش، سازوکار خود همگرایی باریکه لیزر توسط میدان تابشی، تولید غیر خطی هماهنگ‌های بهره بالا جهت گسترش کوک‌پذیری لیزر به طول موج‌های کوتاه‌تر، ارائه نظریه تقویت تابش بر اساس تابش خودبه‌خودی خود تقویت شونده^۲ (SASE) برای تقویت تابش در رژیم‌های طول موج کوتاه، ارائه روش‌هایی مانند پیش‌دسته‌بندی باریکه الکترونی^۴ و کشیدگی میدان ویگلر^۱ جهت کاهش طول

استفاده از تابش لیزر در طول موج‌های مختلف، در حوزه‌های گوناگونی از علوم و فناوری کاربرد دارد. به‌عنوان مثال، استفاده از تداخل‌سنج‌های لیزری، به‌عنوان یک روش دقیق و معتبر در مشخصه‌یابی پلاسما و مواد سخت، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱] و [۲]. در این میان، استفاده از تابش‌های همدوس الکترومغناطیس با توان و شدت بالا در محدوده طول موج‌های کوتاه مانند UV و XUV، کاربردهای بسیار وسیعی از جمله، تصویربرداری از مولکول‌های پیچیده مانند پروتئین‌ها و آنزیم‌ها به‌منظور حفظ ساختار آن‌ها و پراش و طیف‌نگاری دارند [۳] و [۴]. در تحقیقات گداخت هسته‌ای نیز اخیراً مطالعاتی در زمینه امکان استفاده از میدان الکترونیکی لیزرهای بسیار پرتوان مانند لیزر الکترون آزاد اشعه X با شدتی در حدود 10^{20} W/cm² جهت غلبه بر سد پتانسیل دافعه کولونی ذرات در واکنش گداخت هسته‌ای انجام گرفته است [۵]. با این وجود، تولید تابش همدوس طول موج کوتاه با استفاده از لیزرهای رایج مبتنی بر گذار ترازهای اتمی با چالش‌های فراوانی مانند عدم کوک‌پذیری در طیف

^۱ Free Electron Laser (FEL)

^۲ Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE)

^۴ Electron Beam Prebunching

اشباع و تقویت میدان تابشی در لیزر الکترون آزاد [۱۲-۶].

به طور کلی، برای تولید تابشی همدوس در محدوده طول موج X در لیزر الکترون آزاد، انرژی زیادی جهت تزریق باریکه الکترونی به داخل ویگلر مورد نیاز می‌باشد که معمولاً توسط شتاب دهنده‌های خطی با اندازه‌های بزرگ تأمین می‌گردد. علاوه بر آن، معمولاً دسته‌شدگی باریکه الکترونی در نتیجه برهم‌کنش با میدان‌های تابشی و ویگلر پس از گذشت چند دوره تناوب از طول ویگلر اتفاق می‌افتد که باعث افزایش طول ناحیه اشباع و در نتیجه بزرگ شدن اندازه کلی سامانه لیزر الکترون آزاد طول موج کوتاه و افزایش هزینه‌های ساخت آن می‌گردد. از این رو، تلاش‌های زیادی از جمله تولید هماهنگ‌های تابشی، استفاده از سازوکارهای نوین در نحوه شتاب‌دهی باریکه الکترونی و همچنین تزریق غیر یکنواخت باریکه الکترونی به داخل ویگلر، در جهت کوچک‌سازی سامانه لیزر الکترون آزاد طول موج کوتاه در سراسر جهان در حال انجام است [۱۵-۱۲]. در این مقاله، با بررسی فرآیند رشد و اشباع میدان تابشی بر مبنای تولید و تقویت هماهنگ‌های بالاتر تابش و در نظر گرفتن باریکه الکترونی پیش‌دسته‌بندی شده با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی انجام شده توسط کد محاسباتی MEDUSA، امکان کاهش طول اشباع و کوچک‌سازی لیزر الکترون آزاد در محدوده طول موج XUV مورد بررسی گرفته است. در بخش دوم مقاله، راهکارهایی جهت کاهش طول سامانه لیزر الکترون آزاد ارائه می‌گردد. در بخش سوم، پس از معرفی کد MEDUSA، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده بر پایه روش‌های پیشنهادی مورد بحث قرار گرفته و با نتایج تجربی و دیگر شبیه‌سازی‌های انجام شده با کد MEDUSA مقایسه شده است. بخش چهارم مقاله نیز به نتیجه‌گیری و بحث اختصاص دارد.

۲. بررسی راهکارهایی جهت کوچک‌سازی لیزر

الکترون آزاد

۲-۱. تولید و تقویت هماهنگ‌های تابشی

یکی از چالش‌های اساسی در لیزرهای الکترون آزاد در محدوده طول موج‌های کوتاه، پیدا کردن فرآیند یا فرآیندهایی جهت تأمین بذر (دانه) اولیه تابش و ارائه راهکارهایی جهت تقویت میدان تابشی لیزر می‌باشد. مهم‌ترین سازوکار پیشنهاد شده جهت تقویت تابش در لیزرهای الکترون آزاد طول موج کوتاه، تابش خود به خودی خود-تقویت شونده (SASE) نام دارد. مبنای روش SASE، تقویت بذر اولیه میدان تابش در طول یک بار عبور باریکه الکترونی از داخل ویگلر می‌باشد [۱۰ و ۱۱].

جهت تولید بذر اولیه در لیزر الکترون آزاد مبتنی بر سازوکار SASE، از دو روش استفاده از نویز شلیکی^۲ یا تولید هماهنگ‌های بالاتر تابش استفاده می‌شود [۱۵].

به دلیل تناوب بودن میدان مغناطیسی ویگلر، در نتیجه زنش میدان ویگلر و میدان تابشی، نیرویی طولی با نام نیروی پاندرموتیو^۳ (گران‌رو) به وجود می‌آید. بدین ترتیب، حرکت طولی باریکه الکترونی نیز به صورت نوسانی می‌باشد که باعث ایجاد دسته‌شدگی‌هایی در باریکه الکترونی می‌شود که این دسته‌شدگی، مبنای رشد غیر خطی هماهنگ‌های بالاتر تابشی می‌باشد. برای ویگلری با عدد موج $k_w = \frac{2\pi}{\lambda_w}$ ، حرکت عرضی الکترون‌ها در داخل ویگلر با بسامد نوسانی k_w انجام می‌شود در حالی که نوسان طولی با بسامد $2k_w$ صورت می‌گیرد. به طور کلی، در لیزر الکترون آزاد، بسامدهای زوج باعث تولید هماهنگ‌های فرد تابش می‌شود [۸ و ۱۱]. بنابراین، اگر حرکت طولی دارای جملات نوسانی با بسامد فرد باشد، هماهنگ‌های زوج بالاتر تابش خواهند شد. رشد میدان تابشی لیزر الکترون آزاد در بسامد تشدید پایه (هماهنگ اصلی)، نه تنها باعث ایجاد دسته‌شدگی باریکه الکترونی در بسامد تشدید پایه می‌شود، بلکه باعث ایجاد دسته‌شدگی در بسامدهای بالاتر نیز می‌شود. بنابراین، دو ویژگی یاد شده، یعنی حرکت طولی نوسانی و دسته‌شدگی در فرکانس‌های بالاتر ناشی از بسامد تشدید پایه، باعث تولید و رشد غیر خطی هماهنگ‌های بالاتر خواهد شد. طول موج تشدیدی هماهنگ m را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۸ و ۱۵]:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_w}{n} \frac{2\gamma_r^2}{(1 + \Omega_w^2)} \quad (1)$$

که در آن، λ_w و γ_r به ترتیب طول موج ویگلر و انرژی تشدیدی باریکه الکترونی هستند و پارامتر $\Omega_w = eB_w / (k_w m_e c^2)$ به عنوان دامنه میدان ویگلر بی‌بعد شده تعریف شده است. همانگونه که از معادله (۱) مشخص است، تابش به وجود آمده از هماهنگ‌های سوم و پنجم، به ترتیب $\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{5}$ طول موج تشدید پایه (هماهنگ اصلی) را کاهش می‌دهند. برای مثال، اگر طول موج تشدید پایه ۵۰۰ nm باشد، انتظار می‌رود که تابش هماهنگ‌های سوم و پنجم به ترتیب دارای طول موج‌های ۱۶۶/۶ nm و ۱۰۰ nm باشند. در این صورت، با وجود اینکه طول موج تشدید پایه در محدوده طیف مرئی قرار گیرد، تابش‌های هماهنگ‌های سوم و پنجم به ترتیب در ناحیه‌های UV

^۲ Shot Noise

^۳ Pondermotive Force

^۱ Wiggler Field Tapering

تقویت توان تابشی هماهنگ‌های بالاتر به کار گرفته شوند. به‌طور کلی، رشد میدان تابشی در لیزر الکترون آزاد به سه ناحیه بهره سیگنال کوچک، رشد نمایی و اشباع تقسیم می‌گردد. در ناحیه بهره سیگنال کوچک، رشد قابل ملاحظه‌ای در دامنه میدان تابشی اتفاق نمی‌افتد و مقدار کمی از انرژی طولی باریکه الکترونی به میدان تابشی منتقل می‌شود. همانگونه که اشاره شد، پس از طی چند دوره تناوب از طول ویگلر، برهم‌کنش میدان مغناطیسی متناوب ویگلر و موج الکترومغناطیس خارجی (که به‌عنوان بذریه یا تابش اولیه مورد استفاده قرار گرفته است) باعث به وجود آمدن نیروی طولی پاندرموتیو می‌شود. وجود نیروی پاندرموتیو باعث دسته‌شدگی باریکه الکترونی و در نتیجه رشد قابل ملاحظه میدان تابشی می‌شود که با نام ناحیه رشد نمایی شناخته می‌شود. در این ناحیه، به دلیل برقراری شرط تشدید بین باریکه الکترونی و موج تابشی، مقدار قابل توجهی از انرژی الکترون‌ها به میدان تابشی منتقل می‌گردد. انتقال پیوسته انرژی الکترون‌ها به میدان تابشی، باعث کاهش سرعت طولی الکترون‌ها و در نتیجه، عدم برقراری شرط تشدید می‌گردد. در این حالت تعداد قابل توجهی از الکترون‌ها در پتانسیل پاندرموتیو به دام می‌افتند و باعث وقوع پدیده اشباع می‌شوند. در این شرایط، الکترون‌ها در یک نیمه از چرخه نوسانی، انرژی خود را به میدان تابشی می‌دهند که باعث خارج شدن پرتو الکترونی از شرط تشدید می‌گردد. در نیمه دوم چرخه، الکترون‌ها برای اینکه دوباره به شرایط تشدید بازگردند، انرژی از دست داده را از میدان تابشی می‌گیرند و این چرخه (انتقال انرژی از الکترون‌ها به میدان تابشی و برعکس) ادامه می‌یابد که باعث نوسان (نه ادامه تقویت و رشد) میدان تابشی می‌گردد [۱۵].

در صورت برقراری دوباره شرط تشدید پیش از وقوع اشباع، تقویت و رشد دامنه میدان تابشی ادامه پیدا کرده و در فرآیند اشباع تأخیر ایجاد خواهد شد. در همین راستا، روش‌های متنوعی جهت تقویت توان تابشی و افزایش بازدهی لیزرهای الکترون آزاد مبتنی بر SASE توسعه داده شده‌اند. یکی از مؤثرترین این راهکارها، استفاده از ویگلری با پارامترهای متغیر می‌باشد که با نام روش کشیدگی ویگلر^۱ شناخته می‌شود. به‌طور کلی، روش کشیدگی ویگلر مبتنی بر کاهش سرعت فاز موج تابشی و یا افزایش سرعت طولی باریکه الکترونی است که بر اساس آن، تغییراتی خطی در پارامترهای ثابت ویگلر مانند عدد موج (طول موج ویگلر) و یا دامنه میدان مغناطیسی ویگلر ایجاد می‌شود [۱۵] و [۱۶]. برای کاهش سرعت فاز موج تابشی، عدد موج ویگلر با شیب کمی افزایش داده می‌شود. جهت افزایش سرعت طولی

و XUV قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، از معادله (۱) می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که تابش‌های هماهنگ‌های بالاتر در نظر گرفته نشوند، برای تولید تابش در طول موج‌های $166/6 \text{ nm}$ و 100 nm به‌عنوان تابش تولید شده از تشدید پایه، مقدار انرژی مورد نیاز باریکه الکترونی باید به ترتیب به میزان $\sqrt{3}$ و $\sqrt{5}$ برابر انرژی لازم جهت تولید تابش با همان طول موج‌ها از هماهنگ‌های سوم و پنجم، باشد. بنابراین، به ازای یک طول موج مشخص تابش، انرژی مورد نیاز باریکه الکترونی در تشدید پایه به مراتب بیشتر از انرژی باریکه الکترونی جهت تولید تابش با همان طول موج، در هماهنگ‌های بالاتر است. به بیان بهتر، استفاده از هماهنگ‌های بالاتر به منظور تولید تابش‌هایی با طول موج کوتاه‌تر، می‌تواند باعث کاهش انرژی مورد نیاز باریکه الکترونی جهت تولید تابشی با همان طول موج در تشدید پایه شود که نتیجه اصلی آن، کاهش طول شتاب دهنده‌های خطی مورد استفاده در ساختار لیزر الکترون آزاد و در نتیجه، کاهش مستقیم اندازه کلی سامانه لیزر الکترون آزاد خواهد بود. از این رو، تولید هماهنگ‌های بالاتر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین روش‌های کوچک‌سازی (به دلیل نیاز به باریکه الکترونی با انرژی کمتر) در لیزر الکترون آزاد مورد توجه قرار گرفته است.

به‌طور کلی، تولید هماهنگ‌های بالاتر تابشی در لیزرهای الکترون آزاد مبتنی بر دو سازوکار خطی و غیر خطی می‌باشد. یکی از چالش‌های مهم در تولید هماهنگ‌های بالاتر تابشی در محدوده طول موج X، وجود ناپایداری‌های مختلف ناشی از کیفیت باریکه الکترونی است. اینگونه ناپایداری‌ها عمدتاً به دلیل اثرات گرمایی (پخش انرژی باریکه الکترونی) و کاهش دسته‌شدگی باریکه الکترونی به وجود می‌آیند [۱۵]. از سوی دیگر، معمولاً در هماهنگ‌های تابشی لیزر الکترون آزاد از بذریه اولیه استفاده نمی‌شود و رشد میدان تابشی هماهنگ بر پایه دسته‌شدگی مبتنی بر تشدید پایه (هماهنگ اصلی) اتفاق می‌افتد. به همین دلیل، معمولاً رشد خطی هماهنگ تابشی (به دلیل وجود ناپایداری‌های اشاره شده) در مقایسه با تشدید پایه کندتر است ولی رشد غیر خطی آن با شیب بیشتری نسبت به تشدید پایه اتفاق می‌افتد که همین مسئله باعث می‌شود رشد میدان تابشی هماهنگ بالاتر، زودتر از تشدید پایه به اشباع برسد. علاوه بر آن، یکی دیگر از مشکلات هماهنگ‌های بالاتر این است که با افزایش تعداد هماهنگ‌ها، شدت و توان تابشی هماهنگ‌های بالاتر (در مقایسه با تشدید پایه) کاهش می‌یابد. از این رو، تولید هماهنگ‌های بالاتر به تنهایی نمی‌تواند روشی مناسب جهت تولید تابش X همدوس با شدت و توان بالا در لیزر الکترون آزاد قلمداد شود و لازم است تا روش‌های مکملی نیز جهت افزایش و

¹ Wiggler Tapering

ویگلر قبل از وقوع اشباع ثابت است ولی پس از اشباع به صورت خطی و با یک شیب ملایم کاهش می‌یابد.

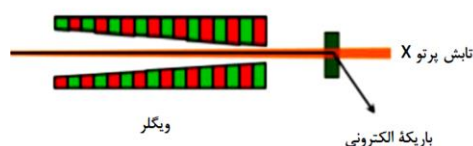
۲-۲. پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی

یکی از مهم‌ترین نگرش‌ها در کوچک‌سازی لیزر الکترون آزاد، بررسی فرآیند دسته‌شدگی باریکه الکترونی و تأثیر آن بر سازوکار اشباع می‌باشد. در این میان، استفاده از روش پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها جهت کاهش ابعاد لیزر الکترون آزاد، مطرح است. مبنای روش پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی این است که الکترون‌ها بر پایه الگوی یک تابع توزیع مشخص و به صوت غیر یکنواخت وارد ویگلر شوند [۱۴ و ۱۵]. در شرایط معمول و در حالتی که باریکه الکترونی پیش دسته‌بندی نشده باشد، الکترون‌ها به صورت یکنواخت به ویگلر تزریق می‌شوند. بنابراین در لحظه ورود پرتو الکترونی به داخل ویگلر، دسته‌شدگی اولیه در پرتو الکترونی وجود ندارد و الکترون‌ها به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. پس از طی مسافتی معادل چند طول موج ویگلر، الکترون‌ها در اثر نیروی پاندرموتیو به وجود آمده در اثر زنش میدان ویگلر و موج تابشی خارجی اعمال شده، شروع به دسته شدن می‌کنند و در نتیجه فرآیند تقویت میدان تابشی آغاز می‌شود. در صورت تزریق الکترون‌ها به صورت غیر یکنواخت (مطابق الگوی پیشنهادی پیش دسته‌بندی)، دسته‌شدگی باریکه الکترونی در ابتدای ورد به داخل ویگلر اتفاق می‌افتد که باعث می‌شود تا ناحیه بهره سیگنال کوچک حذف شده و فرآیند رشد میدان تابشی سریع‌تر شروع شود. به بیان دیگر، اعمال پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی، رشد میدان تابشی را به سه ناحیه جدید رشد فوق نمایی، رشد نمایی و اشباع تقسیم می‌کند و در نهایت، باعث کاهش طول اشباع و ویگلر و در نتیجه، کوچک‌تر شدن اندازه لیزر الکترون آزاد می‌شود. جهت پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی، فاز طولی اولیه الکترون‌ها به صورت یک تابع ساده پله‌ای خطی تعریف می‌شود [۱۲ و ۱۵].

$$\sigma_{||}(\psi_0) = \begin{cases} \left(\frac{2\pi}{\psi_{width}} \right), & 0 \leq \psi_0 \leq \psi_{width} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

که در آن، پارامتر ψ_{width} به‌عنوان مرتبه (درجه) پیش دسته‌بندی تعریف شده است. دلیل انتخاب الگوی خطی پله‌ای برای پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی، نزدیک‌تر بودن آن به توزیع یکنواخت و ساده‌تر بودن آن از نظر آزمایش‌های تجربی می‌باشد. همانگونه که از معادله (۶) مشخص است، به ازای $\psi_{width} = 2\pi$ ، تابع توزیع فاز طولی اولیه الکترون‌ها به صورت

انرژی طولی) باریکه الکترونی و بازگشت الکترون‌ها به شرایط تشدید نیز دامنه میدان مغناطیسی ویگلر با شیب کمی کاهش می‌یابد. معمولاً در ارتباط با تابش‌های طول موج‌های کوتاه، از روش کشیدگی دامنه میدان مغناطیسی ویگلر استفاده می‌شود [۱۵]. در شکل (۱) نحوه ایجاد کشیدگی دامنه میدان ویگلر (افزایش انرژی طولی باریکه الکترونی) به صورت نمادین نشان داده شده است.



شکل (۱): نمایی از نحوه اعمال روش افزایش و کاهش خطی دامنه میدان ویگلر جهت افزایش بازدهی میدان تابشی

در روش کشیدگی دامنه میدان ویگلر، دامنه میدان مغناطیسی ویگلر به صورت تابعی خطی از موقعیت طولی باریکه الکترونی در داخل ویگلر و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_w(\bar{z}) = \bar{\Omega}_w f_b(\bar{z}) \quad (3)$$

که در آن، $\bar{\Omega}_w$ دامنه بدون بعد شده میدان ویگلر ثابت (کشیده نشده) است. پارامتر $f_b(\bar{z})$ به‌عنوان تابع کشیدگی ویگلر تعریف شده است که بر حسب فاصله طولی بدون بعد ($\bar{z} = z/k_w$) بیان می‌شود. در این صورت، انرژی تشدید را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۵]:

$$\gamma(z) = \left(\frac{k}{2k_w} [1 + \bar{\Omega}_w^2(z)] \right)^{1/2} \equiv \bar{\gamma}_r f_r(z) \quad (4)$$

که در آن، $\bar{\gamma}_r$ مقدار انرژی تشدید بدون کشیدگی ویگلر است و عامل کشیدگی تشدید نیز به صورت زیر تعریف شده است:

$$f_r(z) = \left(\frac{1 + \bar{\Omega}_w^2 f_b^2(z)}{1 + \bar{\Omega}_w^2} \right) \quad (5)$$

تابع کشیدگی ویگلر در رژیم‌های مرتبط با طول موج کوتاه، معمولاً به صورت خطی و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$f_b(\bar{z}) = \begin{cases} 1 & \bar{z} < \bar{z}_s \\ 1 + m(\bar{z} - \bar{z}_s) & \bar{z} \geq \bar{z}_s \end{cases} \quad (6)$$

در معادله (۶)، \bar{z}_s و m به ترتیب به‌عنوان نقطه اشباع و شیب کشیدگی تعریف شده‌اند. مطابق معادله (۶)، دامنه میدان

نمی‌شود. بنابراین توان اولیه هماهنگ سوم صفر می‌باشد و رشد هماهنگ سوم از دسته‌بندی تصادفی در پرتوی الکترونی آغاز می‌شود. شعاع پرتوی تابش تزریق شده به سامانه 0.05 cm می‌باشد. با توجه به مقادیر انتخاب شده برای ویگلر و پرتوهای الکترونی، تشدید پایه در 123 nm اتفاق می‌افتد و بنابراین هماهنگ سوم آن دارای طول موج 41 nm (31 eV) می‌باشد که در محدوده طیف XUV قرار می‌گیرد. به منظور ساده‌سازی در مسئله، از پخش انرژی اولیه باریکه الکترونی صرف نظر شده است ولی به دلیل برهم‌کنش خودسازگار الکترون‌ها با میدان تابشی، همراه با تحول میدان تابشی و آغاز فرآیند دسته‌شدگی باریکه الکترونی، پخش انرژی الکترون‌ها نیز اتفاق می‌افتد. جهت انجام روش کشیدگی دامنه میدان ویگلر، پارامترهای بهینه \bar{z}_s و m با اجرای پی در پی کد شبیه‌سازی و بر اساس روش تصنیف، مشخص می‌گردند. در شکل (۲) توان تشدید هماهنگ سوم برای حالت میدان ویگلر کشیده شده و بدون کشیدگی دامنه میدان ویگلر، برای الکترون‌های با توزیع یکنواخت و سپس با اعمال فرض پیش دسته‌بندی پرتو الکترونی، نشان داده شده است. در حالتی که باریکه الکترونی یکنواخت است، در $z = 9/6 \text{ m}$ از طول ویگلر و به ازای توان تابشی $3/1 \times 10^9 \text{ W}$ ، اشباع اتفاق می‌افتد. پس از اعمال پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی مطابق الگوی پله‌ای-خطی، مشاهده می‌شود که طول اشباع به مقدار $7/2 \text{ m}$ کاهش پیدا می‌کند. بیان دیگر، با تزریق غیر یکنواخت باریکه الکترونی، دسته‌شدگی الکترون‌ها در ابتدای ورود باریکه الکترونی به داخل ویگلر اتفاق می‌افتد و در نتیجه، با حذف مرحله رشد سیگنال کوچک، رشد میدان تابشی سریع‌تر انجام می‌گیرد. علاوه بر آن، استفاده از باریکه پیش دسته‌بندی شده باعث تقویت و افزایش رشد میدان تابشی به مقدار $7/7 \times 10^9 \text{ W}$ شده است که نشان دهنده این است که به کار بردن باریکه الکترونی پیش دسته‌بندی شده باعث کاهش طول اشباع و افزایش بازدهی توان تابشی می‌شود. پس از اعمال کشیدگی میدان ویگلر برای دو حالت باریکه یکنواخت و پیش دسته‌بندی شده، مشاهده می‌شود که فرآیند رشد میدان تابشی پس از اشباع ادامه یافته و دامنه میدان تابشی به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. بنابراین استفاده هم‌زمان دو روش پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی و کشیدگی میدان ویگلر، باعث کاهش طول اشباع و افزایش بازدهی میدان تابشی خواهد شد.

$\sigma_{||}(\psi_0) = 1$ خواهد شد که نشان دهنده باریکه یکنواخت و عدم پیش دسته‌بندی است.

۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

به طور کلی، جهت در نظر گرفتن اثرات عرضی تابش از جمله کانونی‌سازی تابش ناشی از بهره و بررسی نحوه تحول شعاع تابش و نحوه غلبه پراش تابش الکترومغناطیس بر کانونی‌سازی میدان تابشی در لیزر الکترون آزاد مبتنی بر SASE، نیاز به شبیه‌سازی سه بعدی است. در این مقاله، به منظور بررسی راهکارهای پیشنهاد شده در امکان کوچک‌سازی لیزر الکترون آزاد با استفاده از روش‌های تولید و تقویت هماهنگ‌های تابشی و پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی، شبیه‌سازی سه بعدی لیزر الکترون آزاد بر مبنای کد MEDUSA توسعه داده شده است. کد MEDUSA نخستین بار جهت بررسی امکان تولید غیر خطی هماهنگ‌های بالاتر در لیزر الکترون آزاد معرفی شده است [۸]. در کد MEDUSA، از روش بسط وابسته به منبع^۱ (بسط باریکه الکترونی) جهت شبیه‌سازی سه بعدی لیزر الکترون آزاد استفاده می‌شود و انتگرال‌گیری از مسیر الکترون‌ها با استفاده از معادله مستقیم لورنتس انجام می‌گیرد. علاوه بر آن، در کد MEDUSA می‌توان نحوه تزریق باریکه الکترونی به داخل ویگلر را تعریف نمود و امکان در نظر گرفتن خطاهای ویگلر و تغییر پارامترهای ویگلر نیز وجود دارد. جهت بررسی اثرات پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی و کشیدگی دامنه میدان ویگلر، تغییراتی در کد MEDUSA ایجاد شده است. مشخصات باریکه الکترونی و ویگلر در شبیه‌سازی‌های انجام شده، مطابق جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱): مشخصات باریکه الکترونی و ویگلر در شبیه‌سازی

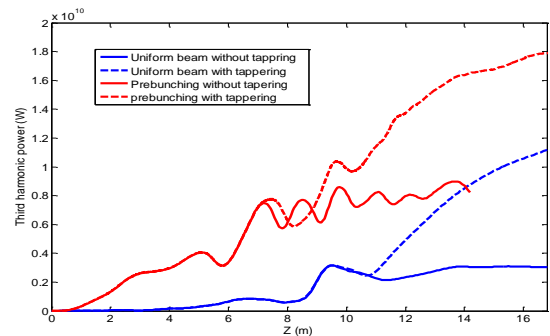
انجام گرفته بر مبنای کد MEDUSA

مشخصات الکترونی		مشخصات ویگلر	
انرژی	385 MeV	دامنه میدان ثابت	10.06 kG
جریان	240 A	دوره تناوب ویگلر	3/3 cm
شعاع اولیه	0.02 cm	نسبت طول ناحیه تزریق به دوره تناوب ویگلر	10

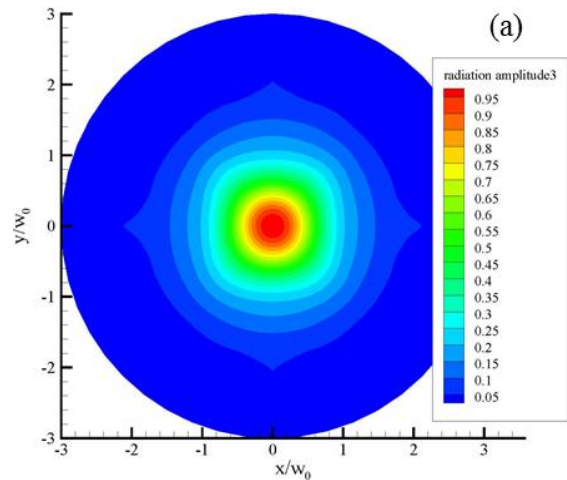
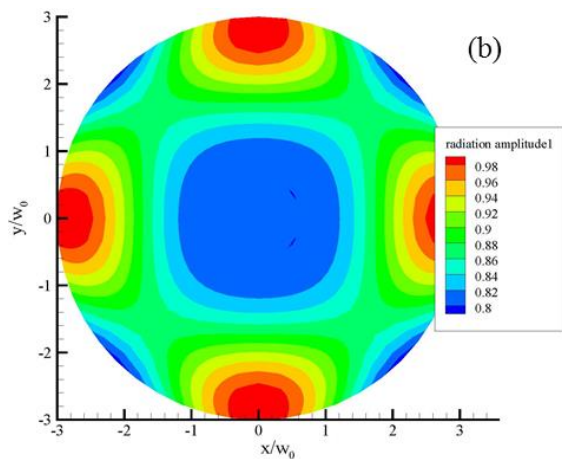
در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، فرکانس تشدید پایه و هماهنگ سوم تابش در نظر گرفته شده است. بذر (دانه) اولیه برای فرکانس تشدید پایه دارای توان اولیه 10 W می‌باشد و برای فرکانس تشدید هماهنگ سوم بذری به سامانه تزریق

^۱ Source Dependent Expansion

در شکل (۳) تغییرات توزیع عرضی تابش هماهنگ سوم در دو نقطه اشباع و $z = 12/5 \text{ m}$ ، برای باریکه‌های الکترونی یکنواخت نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در نقطه اشباع پرتو تابشی به‌طور نسبی کانونی است ولی پس از وقوع اشباع و با دور شدن از نقطه اشباع، به دلیل عدم برقراری شرایط تشدید و برهم خوردن دسته‌شدگی باریکه الکترونی، توزیع عرضی پرتو تابشی دچار واگرایی می‌شود و کیفیت کانونی بودن آن از دست می‌رود.



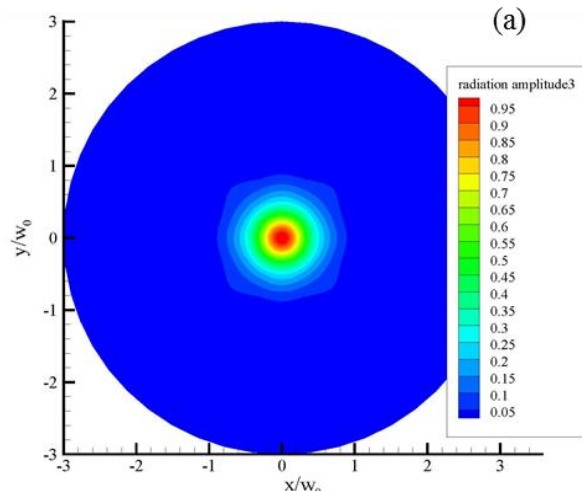
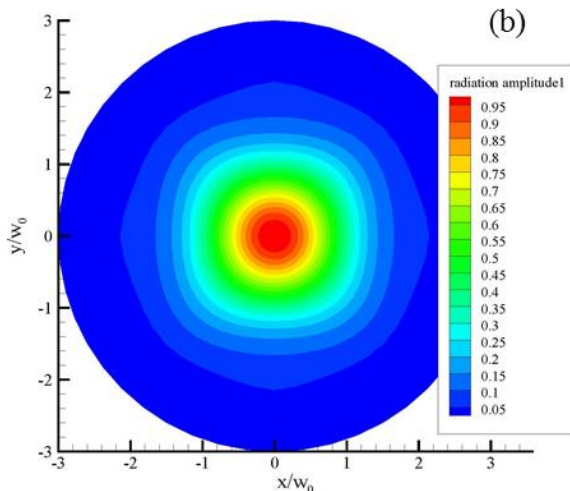
شکل (۲): نحوه تغییرات هماهنگ سوم تابشی برای باریکه‌های الکترونی یکنواخت و پیش دسته‌بندی شده با فرض ویگلر ساده (خط پر) و ویگلر کشیده (خط چین)



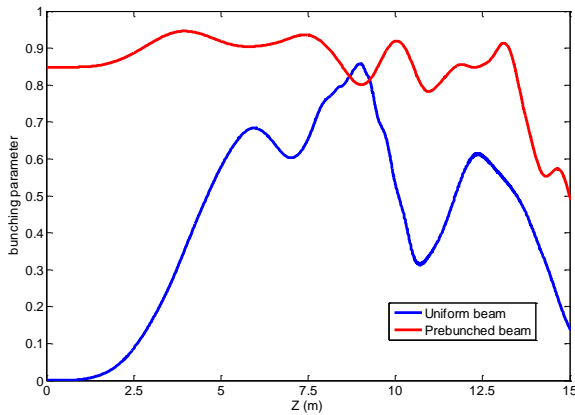
شکل (۳): توزیع عرضی تابش هماهنگ سوم تابش برای باریکه‌های یکنواخت در دو نقطه اشباع (شکل a) و $z = 12/5 \text{ m}$ (شکل b)

توزیع تابشی باریکه پیش دسته‌بندی شده در نقطه اشباع و پس از آن، نسبت به تابش باریکه یکنواخت از کیفیت بالاتری برخوردار است که علت اصلی آن، حفظ دسته‌شدگی باریکه الکترونی (حتی پس از وقوع اشباع) به دلیل تزریق غیر یکنواخت الکترون‌ها به داخل ویگلر است.

شکل (۴)، توزیع عرضی تابش هماهنگ سوم باریکه پیش دسته‌بندی شده در دو نقطه اشباع و $z = 10/1 \text{ m}$ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مقایسه با تابش باریکه یکنواخت (شکل (۳))، شعاع پرتو تابشی در نقطه اشباع بسیار کوچک‌تر است و با دور شدن از نقطه اشباع، توزیع تابش دچار واگرایی نشده و کانونی بودن آن حفظ می‌شود. بنابراین کانونی بودن



شکل (۴): توزیع عرضی تابش هماهنگ سوم برای باریکه‌های پیش دسته‌بندی شده در دو نقطه اشباع (شکل a) و (شکل b)



شکل (۵): نحوه تغییرات پارامتر دسته‌شدگی هماهنگ سوم تابشی برای باریکه‌های الکترونی یکنواخت و پیش‌دسته‌بندی شده

۴- اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در ارتباط با استفاده از روش‌های کشیدگی ویگلر و پیش‌دسته‌بندی باریکه الکترونی، لازم است تا نتایج به دست آمده در مقاله حاضر با دیگر مطالعات تجربی و شبیه‌سازی‌های انجام شده، مقایسه و راستی آزمایی شوند.

در ارتباط با تأثیر کشیدگی میدان ویگلر بر توان تابشی لیزر الکترون آزاد، مطالعات نظری و شبیه‌سازی‌های متنوعی در رژیم‌های عملیاتی مرتبط با طول موج بلند و طول موج کوتاه انجام گرفته است. با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی کد MEDUSA، تأثیر کشیدگی میدان ویگلر بر افزایش توان تابشی لیزر الکترون آزاد مبتنی بر تابش خودبه‌خودی خودتقویت شونده (SASE) و مقایسه آن با سازوکار تقویت کننده همراه با بذر اولیه، در محدوده طول موج فروسرخ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط کد MEDUSA نشان داده است که استفاده از روش کشیدگی میدان ویگلر می‌تواند باعث افزایش قابل توجه بازدهی لیزر الکترون آزاد بر پایه سازوکار SASE شود. البته افزایش بازدهی در سازوکار تقویت کننده همراه با بذر اولیه بیشتر خواهد بود [۱۷].

مطالعات تجربی استفاده از روش کشیدگی میدان ویگلر برای اولین بار جهت مطالعه بازدهی طیف‌های تابشی تشدید پایه و هماهنگ سوم لیزر الکترون آزاد مبتنی بر تقویت کننده و نوسان-ساز، در محدوده طول موج فروسرخ و نور مرئی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از کشیدگی میدان ویگلر می‌تواند بازدهی لیزر الکترون آزاد را تا میزان ۳۶٪ افزایش دهد [۱۸]. به منظور بررسی نتایج شبیه‌سازی، مقایسه‌ای میان شبیه‌سازی سه بعدی انجام شده توسط کد محاسباتی

به منظور بررسی بیشتر فرآیند دسته‌شدگی باریکه الکترونی در هنگام رشد میدان تابشی، پارامتر دسته‌شدگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$b = \langle \exp(-i\psi_h) \rangle \quad (۸)$$

که در آن، ψ_h فاز پاندرموتیو باریکه الکترونی برای هماهنگ h ام تعریف شده است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\psi_h = \alpha_h + hk_w z = h(k_0 + k_w)z - h\omega t \quad (۹)$$

و عملگر میانگین‌گیری به صورت زیر تعریف شده است:

$$\langle (\dots) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\psi_0 \sigma_{\parallel}(\psi_0) (\dots) \quad (۱۰)$$

در معادله (۸)، $\alpha_h = h(k_0 z - \omega t)$ بیانگر نوسانات فاز مربوط به هماهنگ h ام باریکه الکترونی است. با توجه به اینکه $0 < |b| < 1$ است، هر چه اندازه پارامتر دسته‌شدگی به مقدار واحد نزدیک‌تر باشد، به معنی افزایش کیفیت دسته‌شدگی در باریکه الکترونی و مشخص بودن مرز دسته‌های الکترونی می‌باشد که در نتیجه آن فرآیند رشد میدان تابشی سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در شکل (۵) تغییرات مکانی پارامتر دسته‌شدگی برای دو باریکه یکنواخت و پیش‌دسته شده نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، برای باریکه یکنواخت، پارامتر دسته‌شدگی از صفر شروع می‌شود و به تدریج افزایش پیدا می‌کند که مترادف با دسته دسته شدن الکترون‌ها و شروع فرآیند رشد میدان تابشی است. به بیان دیگر پس ورود باریکه یکنواخت الکترونی به داخل ویگلر، در اثر برهم‌کنش با میدان ویگلر و تابش، دسته‌شدگی باریکه الکترونی اتفاق می‌افتد. افزایش پارامتر دسته‌شدگی تا حدود ناحیه اشباع (۷/۲ m) ادامه پیدا کرده و در نقطه اشباع به بیشینه مقدار خود می‌رسد. پس از اشباع نیز تغییرات پارامتر دسته‌شدگی به صورت نوسانی می‌باشد. در حالتی که باریکه الکترونی به صورت غیر یکنواخت و مطابق با یک الگوی خاص، به صورت پیش‌دسته‌بندی شده به ویگلر تزریق شود، پارامتر دسته‌شدگی از ابتدای ورود باریکه الکترونی به داخل ویگلر دارای مقدار مشخصی خواهد بود (در مسئله شبیه‌سازی شده در حدود ۰/۸۵) و به دلیل برهم‌کنش با میدان‌های ویگلر و تابش، مقدار پارامتر دسته‌شدگی از مقدار اولیه آن بیشتر خواهد شد. پس از اشباع نیز پارامتر دسته‌شدگی کاهش یافته و به صورت نوسانی تغییر می‌کند.

سازوکار رشد هماهنگ‌های تابشی در محدوده‌های مختلف طول موج‌های عملیاتی، اعمال هم‌زمان کشیدگی میدان ویگلر و پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی و استفاده از الگوی متفاوت در پیش دسته‌بندی می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲)، در اثر تزریق غیر یکنواخت باریکه الکترونی، نسبت طول اشباع پیش

دسته‌بندی شده به طول اشباع یکنواخت $\frac{Z_{\text{Sat-pre}}}{Z_{\text{Sat-Uni}}} < 1$ است که

به معنی کاهش طول اشباع در اثر پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی می‌باشد. علاوه بر آن، پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی

باعث افزایش توان تابشی اشباع می‌گردد ($\frac{P_{\text{Sat-pre}}}{P_{\text{Sat-Uni}}} > 1$) که

نشان می‌دهد روش پیش دسته‌بندی را می‌توان در کنار کشیدگی میدان ویگلر، به‌عنوان یک روش پیشنهادی برای افزایش بازدهی در لیزر الکترون آزاد نیز به‌کار برد. در مقاله حاضر توان تابشی، پس از اعمال پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی ۲/۵ برابر شده و از سوی دیگر، طول اشباع ۲۵٪ کاهش یافته است که با توجه به متفاوت بودن در محدوده طول موج تشدید و سازوکار رشد میدان تابشی، کاملاً قابل رقابت با نتایج ارائه شده در مراجع [۱۲] و [۲۰] می‌باشد. در ارتباط با نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در شکل‌های (۵ و ۷) مقاله حاضر در ارتباط با کانونی سازی میدان تابشی و افزایش پارامتر دسته‌شدگی، پس از اعمال پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی، نتایج به‌دست آمده در مرجع [۲۰]، با وجود تفاوت در نوع مسئله (شبیه‌سازی هماهنگ-بالا در لیزر الکترون آزاد دو باریکه با انرژی‌های مختلف) و همچنین عدم در نظر گرفتن کشیدگی میدان ویگلر، نتایج مقاله حاضر را از نظر کیفی تأیید می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

امکان تقویت تابش در محدوده طول موج‌های کوتاه مانند XUV و نیز کاهش طول لیزر الکترون آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور کاهش انرژی باریکه الکترونی مورد نیاز و همچنین کاهش طول سامانه لیزر الکترون آزاد، دو روش تولید هماهنگ-های بالاتر تابشی (هماهنگ سوم تابش) و تزریق باریکه الکترونی به‌صورت پیش دسته‌بندی شده جهت تسریع در فرآیند رشد میدان تابشی و نیز کاهش طول اشباع پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه شدت میدان تابشی تولید شده در هماهنگ سوم در مقایسه با تشدید پایه بسیار کمتر است، جهت تقویت و همچنین ایجاد تأخیر در اشباع میدان تابشی هماهنگ سوم، از روش کشیدگی میدان ویگلر استفاده شده است که در این روش، به‌منظور افزایش انرژی طولی باریکه الکترونی و برقراری دوباره شرایط تشدید پس از اشباع، دامنه میدان ویگلر در هنگام وقوع

MEDUSA و نتایج تجربی صورت گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مشخص شد که نتایج شبیه‌سازی اعمال کشیدگی میدان ویگلر در کد محاسباتی MEDUSA، توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد [۱۹]. با توجه به نتایج تجربی مرجع [۱۹]، انرژی پالس تابشی در طول موج پایه $793/5 \text{ nm}$ (محدوده فرورسرخ)، برای دو حالت ویگلر ثابت و کشیده شده به ترتیب $123 \pm 28 \mu\text{J}$ و $283 \pm 68 \mu\text{J}$ اندازه‌گیری شده است. با انجام شبیه‌سازی با استفاده از کد MEDUSA، انرژی پالس تابشی تشدید پایه برای ویگلرهای ثابت و کشیده شده به ترتیب $100 \mu\text{J}$ و $336 \mu\text{J}$ به‌دست آمده است که نشان می‌دهد نتایج تجربی استفاده از روش کشیدی میدان ویگلر توافق بسیار خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی کد MEDUSA دارد. در رابطه با شدت طیف تابشی نیز نتایج به‌دست آمده در مرجع [۱۹] از نظر کیفی نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های (۵ و ۶) مقاله حاضر را تأیید می‌کنند.

در ارتباط با تأثیر پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی در توان تابشی و طول اشباع لیزر الکترون آزاد، مطالعات نظری متعددی به همراه شبیه‌سازی انجام گرفته است. در یک مورد، شبیه‌سازی سه بعدی (با استفاده از کد MEDUSA) پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی مطابق الگوی سینوسی (شبه-گوسی) برای لیزر الکترون آزاد در محدوده طول موج فرورسرخ انجام شده است [۱۲]. در مورد مطالعاتی دیگر، در محدوده طول موج کوتاه، تأثیر پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی در هماهنگ تبدیل-بالا^۱ لیزر الکترون آزاد دو باریکه^۲، با استفاده از کد MEDUSA شبیه‌سازی شده است [۲۰]. مقایسه نتایج حاصل از دو مورد مطالعاتی معرفی شده و مقاله حاضر در ارتباط با استفاده از کد MEDUSA در پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی، در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): مقایسه نتایج حاصل از پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی بر

مبنای کد MEDUSA

نتایج شبیه‌سازی	الگوی پیش دسته‌بندی	$\frac{\psi_{\text{width}}}{\pi}$	$\frac{P_{\text{Sat-pre}}}{P_{\text{Sat-Uni}}}$	$\frac{Z_{\text{Sat-pre}}}{Z_{\text{Sat-Uni}}}$
مقاله حاضر	پله‌ای-خطی	۱	۲/۵	۰/۷۵
مرجع [۲۰]	سینوسی	۱	۱/۲	۰/۴۹
مرجع [۱۲]	سینوسی	۱	۲/۲	۰/۲۵

همانگونه که از جدول مشخص است، نتایج به‌دست آمده در مقاله حاضر، از نظر کیفی نتایج مراجع [۱۲] و [۲۰] را تأیید می‌کند و تفاوت‌های کمی موجود، عمدتاً به دلیل تفاوت در

^۱ Harmonic Up-conversion

^۲ Two-beam Free Electron Laser

- [9] G. Stupakov, "Using the Beam-echo Effect for Generation of Short Wavelength Radiation," *Physical Review Letters*, vol. 102, pp. 074801, 2009.
- [10] K. J. Kim, "An Analysis of Self-amplified Spontaneous Emission," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 250, pp. 396-403, 1986.
- [11] J. Andruszkow et al., "First Observation of Self-Amplified Spontaneous Emission in a Free-Electron Laser at 109 nm Wavelength," *Physical Review Letters*, vol. 85, pp. 3825, 2000.
- [12] H. P. Freund et al., "Simulation of Prebunching in Free-electron Lasers," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 507, pp. 400-403, 2003.
- [13] C.A. Brau, "High-brightness Electron Beams – small Free-electron Lasers," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 407, pp. 1-7, 1998.
- [14] W. A. Barletta et al., "Free Electron Lasers: Present Status and Future Challenges," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 618, pp. 69-96, 2010.
- [15] H. P. Freund and J. M. Antonsen, "Principle of Free Electron Laser," Springer (2018).
- [16] H. P. Freund and S. H. Gold, "Efficiency Enhancement in Free-Electron Lasers Using a Tapered Axial Guide Field," *Physical Review Letters*, vol. 52, pp. 926, 1984.
- [17] H. P. Freund and W. H. Miner Jr., "Efficiency Enhancement in Seeded and Self-amplifier Spontaneous Emission Free-electron Lasers by Means of a Tapered Wiggler," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, pp. 113106, 2009.
- [18] H. Boehmer et al., "Variable-Wiggler Free-Electron-Laser Experiment," *Physical Review Letters*, vol. 48, pp. 141, 1982.
- [19] X. J. Wang, et. al. "Efficiency and Spectrum Enhancement in a Tapered Free-Electron Laser Amplifier," *Physical Review Letters*, vol. 103, pp. 154801, 2010.
- [20] M. H. Rouhani and B. Maraghechi, "Three-Dimensional Simulation of Harmonic Up-Conversion In A Prebunched Two-Beam Free-Electron Laser," *Physical Review Accelerators and Beams*, vol. 13, pp. 080706, 2010.
- پدیده اشباع، با شیب بسیار ملایم کاهش می‌یابد. با انجام شبیه‌سازی‌های سه بعدی بر اساس کد MEDUSA، مشاهده شد که اعمال پیش دسته‌بندی پرتو الکترونی باعث کاهش قابل ملاحظه طول اشباع می‌شود که تأثیر بسیار مهمی در کاهش ابعاد لیزر الکترون آزاد خواهد داشت. علاوه بر آن، استفاده از روش کشیدگی میدان ویگلر برای باریکه‌های یکنواخت و پیش دسته‌بندی شده، باعث رشد قابل توجه توان تابشی هماهنگ سوم پس از اشباع شد. بنابراین، استفاده هم‌زمان از هماهنگ‌های بالاتر تابشی، پیش دسته‌بندی باریکه الکترونی و کشیدگی میدان ویگلر باعث کاهش طول سامانه لیزر الکترون آزاد و تقویت میدان تابشی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] L. C. Chen, S. L. Yeh, A. M. Tapilouw, and J. C. Chang, "3-D Surface Profilometry Using Simultaneous Phase-shifting Interferometry," *Optics Communications*, vol. 283, pp. 3376-3382, 2010.
- [2] N. Nabipour and M. Karimi, "The Effect of the Propagation Mode of a Laser Wave in an Interferometer Diagnostics in Determining of Electron Density of Damavand Tokamak Plasma and Calculation of the Measurement Error," *Journal of Applied Electromagnetic*, vol. 4, pp. 47-53, 2016 (In Persian).
- [3] N. H. Chapman et al., "Femtosecond Diffractive Imaging with a Soft-X-ray Free-electron Laser," *Nature Physics*, vol. 2, pp. 839-843, 2006.
- [4] J. Küpper et al., "X-Ray Diffraction from Isolated and Strongly Aligned Gas-Phase Molecules with a Free-Electron Laser," *Physical Review Letters*, vol. 112, pp. 083002, 2014.
- [5] F. Queisser and R. Schützhold, "Dynamically Assisted Nuclear Fusion," *Physical Review C*, vol. 100, pp. 041601(R), 2019.
- [6] E.T. Scharlemann et al, "Optical Guiding in a Free Electron Laser," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 239, pp. 29-35, 1985.
- [7] P. Sprangle et al., "Radiation Focusing and Guiding with Application to the Free Electron Laser," *Physical Review Letters*, vol. 59, pp. 202, 1987.
- [8] H. P. Freund et al., "Nonlinear Harmonic Generation In Free-Electron Lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 36, pp. 275-281, 2000.