



اثر از پیش خوشه ای شدن برگسیل تابش ناشی از دو پرتو الکترونی نسبیتی در حضور میدان مغناطیسی خارجی

مریم رزاق زاده^{۱*}، نادر مهدی زاده^۲

۱- گروه فیزیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران (razaghzadeh.m@gmail.com)

۲- گروه فیزیک، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران (mahdizadeh@iaus.ac.ir)

*آدرس رایانامه نویسنده مسئول: razaghzadeh.m@gmail.com

چکیده

در این مقاله، اثر همزمان از پیش خوشه‌ای شدن دو پرتو الکترونی نسبیتی و اعمال میدان مغناطیسی خارجی محوری بر گسیل همدوس در یک لیزر الکترون آزاد با ویگلر مارپیچی به صورت عددی و تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. روش تحقیق مبتنی بر مدل‌سازی غیرخطی تعامل موج و ذره است که در آن با میانگین‌گیری از معادلات ماکسول و حل عددی معادله حرکت لورنتس-نیوتن، رفتار سیستم شبیه‌سازی شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب این دو عامل (پیش‌خوشه‌ای شدن و میدان راهنما) منجر به بهبود قابل توجه پارامترهای کلیدی لیزر می‌شود؛ به طوری که نرخ رشد حدود ۳۵٪ افزایش یافته و طول اشباع نیز با کاهشی در حدود ۲۵٪ مواجه شده است. این نتایج حاکی از آن است که با تنظیم دقیق فاز پیش‌خوشه‌ای و میدان مغناطیسی خارجی محوری، می‌توان به بازدهی و توان خروجی بالاتری در لیزرهای الکترون آزاد دو جریانی دست یافت. کلید واژه: لیزر الکترون آزاد دو جریانی، از پیش خوشه‌ای شدن، میدان راهنمای محوری، فرمول پاشندگی، نرخ رشد، شبیه‌سازی غیرخطی.

Effect of Pre-Bunching on the Radiation Emission from Two Relativistic Electron Beams
in the Presence of an External Magnetic Field

Maryam Rezaqzadeh^{1*}, Nader Mahdizadeh²

¹Department of Physics, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran
(razaghzadeh.m@gmail.com)

²Department of Physics, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran
(mahdizadeh@iaus.ac.ir)

*Corresponding author email: razaghzadeh.m@gmail.com

Abstract

In this paper, the simultaneous effects of pre-bunching two relativistic electron beams and the application of an external axial magnetic field on the coherent emission in a free-electron laser (FEL) with a helical wiggler are investigated numerically and analytically. The research methodology is based on the nonlinear modeling of wave-particle interactions, where the system's behavior is simulated by averaging the Maxwell equations and numerically solving the Lorentz-Newton equations of motion. The findings indicate that the combination of these two factors—pre-bunching and the guide field—leads to a significant improvement in key laser parameters, resulting in an approximately 35% increase in the growth rate and a 25% reduction in the saturation length. These results suggest that by precisely adjusting the pre-bunching phase and the magnetic field intensity, higher efficiency and output power can be achieved in two-stream free-electron lasers.

Keywords: Two-Stream Free-Electron Laser, Pre-Bunching, Axial Guide Field, Dispersion Relation, Growth Rate, Nonlinear Simulation.

۱. مقدمه

لیزرهای الکترون آزاد (FEL) نخستین بار توسط جان مادی در سال ۱۹۷۱ معرفی شدند [۱]. این سامانه‌ها بر خلاف لیزرهای معمولی که از محیط‌های گازی، جامد یا نیمه‌هادی استفاده می‌کنند، از یک پرتو الکترونی نسبیتی عبوری از میدان ویگلر تناوبی بهره می‌برند. برهم‌کنش موج-ذره در این ساختار منجر به گسیل تابش همدوس با قابلیت تنظیم در بازه وسیعی از طول‌موج‌ها (از مادون قرمز تا پرتو ایکس) می‌شود [۲، ۳].

یکی از راهکارهای بهبود عملکرد FEL استفاده از دو پرتو الکترونی هم‌جهت (حالت دو جریانی) است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ناپایداری دو جریانی می‌تواند نرخ رشد را در مقایسه با حالت تک‌پرتو افزایش دهد [۴-۶]. همچنین، اثر از پیش‌خوشه‌ای شدن پرتو الکترونی پیش از ورود به ویگلر، به عنوان روشی مؤثر برای کاهش طول اشباع و افزایش توان خروجی معرفی شده است [۷]. از سوی دیگر، اعمال میدان مغناطیسی محوری خارجی می‌تواند همگرایی پرتو را بهبود بخشیده و برهم‌کنش را تشدید نماید [۸].

با وجود پژوهش‌های متعدد در حوزه‌های فوق، تاکنون اثر همزمان «از پیش‌خوشه‌ای شدن دو پرتو الکترونی» و «میدان مغناطیسی محوری خارجی» بر گسیل همدوس در لیزرهای الکترون آزاد گزارش نشده است. این شکاف پژوهشی، انگیزه اصلی انجام تحقیق حاضر است. در این مقاله، با استفاده از فرمول‌بندی ابعاد کند تغییر، معادلات غیرخطی حاکم استخراج شده و به صورت عددی حل می‌شوند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای خوشه‌ای شدن و شدت میدان مغناطیسی محوری بر نرخ رشد، طول اشباع و توان خروجی لیزر است.

سازمان‌دهی این مقاله به شرح زیر است:

در بخش دوم، مدل‌سازی نظری و استخراج معادلات حاکم بر تعامل پرتوها در حضور میدان مغناطیسی خارجی ارائه می‌شود. در بخش سوم، نتایج شبیه‌سازی عددی و بررسی تأثیرات پارامترهای مختلف بر رفتار سیستم مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت، در بخش چهارم، ضمن بحث و بررسی یافته‌ها، نتیجه‌گیری کلی از پژوهش بیان خواهد شد.

۲. مدل فیزیکی و معادلات حاکم

مسئله شامل ذرات الکتریکی بارداری است که با سرعت نسبیتی در مسیری پیچشی بواسطه شتاب اولیه ای که دارند و بواسطه نیروهایی که از طرف میدان‌های مغناطیسی خارجی به آنها اعمال می‌شود حرکت می‌کنند. در ساختار کند-موج تحت بررسی، میدان مغناطیسی حاصل از آرایه‌های مغناطیسی است که به آن ویگلر هلیکال می‌گویند. القای مغناطیسی ویگلر هلیکال با تقریب اول به صورت [۲۱]

$$\vec{B}(z) = B_w [\hat{e}_x \cos(k_w z) + \hat{e}_y \sin(k_w z)] + B_0 \quad (1)$$

نوشته می‌شود. که در آن $\hat{e}_z, \hat{e}_y, \hat{e}_x, \lambda_w, k_w = \frac{2\pi}{\lambda_w}, B_w, B_0$ به ترتیب، شدت میدان مغناطیسی محوری، دامنه میدان مغناطیسی متناوب، عدد موجی ویگلر، دوره تناوب آن و بردارهای یک‌ه در دستگاه مختصات کارتزین می‌باشند. حال اگر یک موج الکترومغناطیسی رونده که میدان مغناطیسی آن هم راستا با میدان مغناطیسی ویگلر و در حال انتشار باشد، در راستای محور ویگلر به مجموعه اضافه شود، عدد موجی افزایش خواهد یافت. در این صورت سرعت فاز موج برآیند کمتر از سرعت موج الکترومغناطیسی (که همان سرعت نور در خلا است) خواهد شد. این ساختار کند-موجی که تشکیل شده به ما امکان هم گام نمودن ذرات باردار الکتریکی را با موج بوجود می‌آورد. به موج برآیند حاصل از ترکیب موج الکترومغناطیسی و میدان مغناطیسی ویگلر یک موج ضربانی یا تپشی می‌گویند.

برای یک موج الکترومغناطیسی که در راستای Z حرکت می‌کند، پتانسیل برداری به‌صورت کلی زیر است:

$$\vec{A}(z, t) = A_x(z, t) \hat{e}_x + A_y(z, t) \hat{e}_y + A_z(z, t) \hat{e}_z \quad (2)$$

موج الکترومغناطیسی که در راستای Z حرکت می‌کند بنابراین: $A_z(z, t) = 0$

چون بار و جریان نداریم پیمانه کولن برقرار است: $\nabla \cdot \vec{A} = 0$

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{\partial \delta A_x}{\partial x} + \frac{\partial \delta A_y}{\partial y} + \frac{\partial \delta A_z}{\partial z}$$

پتانسیل‌های برداری و نرده ای در پیمانه کولن به ترتیب عبارتند از:

$$\delta \vec{A}(z, t) = \delta \hat{A}(z) [\cos \alpha_+(z, t) \hat{e}_x + \sin \alpha_+(z, t) \hat{e}_y] \quad (3)$$

$$\delta \phi(z, t) = \delta \hat{\phi}(z) [\cos \alpha(z, t)] \quad (4)$$

که در آن فاز موج الکترومغناطیسی با عدد موجی k_+ و فرکانس ω عبارت است از:

$$\alpha_+(z, t) = \int_0^z dz' k_+(z') - \omega t \quad (5)$$

$$\alpha(z, t) = \int_0^z dz' k(z') - \omega t \quad (6)$$

فاز موج بارفضا با عدد موجی k و فرکانس ω می باشد. دامنه و عدد موجی هردو کندتغییر فرض شده اند. پتانسیل های بالا را در معادلات ماکسول جایگزاری می نماییم، یک مجموعه معادلات

دینامیکی حاصل می شوند که تحول امواج الکترومغناطیسی و بار فضا را نشان می دهند. معادلات بدست آمده در مرتبه اول بر حسب δa ، Γ_+ و $\delta \phi$ عبارتند از [۴، ۱۵-۱۴]

$$\frac{d\delta a}{dz} = \Gamma_+ \delta a \quad (7)$$

$$\frac{d\Gamma_+}{dz} = (-\bar{\omega}^2 + \bar{k}_+^2 - \Gamma_+^2) + \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\omega_{bi}^2 \beta_{z0i}}{\delta a} < \frac{u_{1i} \cos \psi_i - u_{2i} \sin \psi_i}{|u_{3i}|} > \quad (9)$$

$$\frac{d\bar{k}_+}{dz} = -2\bar{k}_+ \Gamma_+ - \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\omega_{bi}^2 \beta_{z0i}}{\delta a} < \frac{u_{1i} \sin \psi_i - u_{2i} \cos \psi_i}{|u_{3i}|} > \quad (10)$$

$$\frac{d\delta \phi}{dz} = -2 \sum_{i=1}^2 \frac{\omega_{bi}^2}{\delta a \bar{\omega}} < \sin \psi_{sci} >$$

در معادلات بالا اندیس $i=1, 2$ به کمیت های مختلف دو جریان الکترونی اشاره دارد. همه کمیت ها با c و k_w بی بعد شده اند. تغییرات فاز امواج گرانی و بارفضا را به صورت زیر می توان نوشت [۴، ۱۵-۱۴]

$$\frac{d\psi_i(\bar{z})}{d\bar{z}} = \bar{k}_+(\bar{z}) + 1 - \frac{\bar{\omega}}{\beta_{3i}} \quad (11)$$

$$\frac{d\psi_{sci}(\bar{z})}{d\bar{z}} = \bar{k}_+(\bar{z}) - \frac{\bar{\omega}}{\beta_{3i}} \quad (12)$$

در معادلات بالا تغییرات زمانی به تغییرات مکانی تبدیل شده اند، Γ_+ نشان دهنده آهنگ رشد پتانسیل برداری و β_{3i} نمایانگر سرعت نرمال شده است، عمل میانگین گیری $\langle \dots \rangle$ بر روی یک مجموعه از الکترون ها در طول یک تناوب موج در محدوده برهم کنش می باشد. به منظور بررسی اثر از پیش خوسه ای شدن الکترون ها توزیع اولیه الکترون ها ناپیوسته در نظر گرفته شده است. به این صورت که در معادلات (۱۰) و (۱۱) ذرات فقط در بازه 0 تا π فرض شدند و از π تا 2π هیچ ذره ای در نظر گرفته نشده است. انرژی میانگین و سرعت ذرات الکترون در این بازه همانند حالت معمولی (یعنی بدون از پیش خوسه ای شده) در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده همه ذراتی که فاصله شان با دیگری مضرب صحیحی از طول موج تفاوت دارد، هنگام ورود به میدانهای مغناطیسی متناوب مسیر یکسانی را طی کنند. در مد تقویت کننده و حالت پایا معادلات نیروی لورنتس با در نظر گرفتن میدان مغناطیسی محوری به شکل زیر نوشته می شوند [۴]:

$$\frac{du_{1i}}{dz} = -(\hat{\Omega}_0 - u_{3i}) \frac{u_{2i}}{u_{3i}} + [\delta a \left(\frac{\omega}{v_{3i}} - k_+ \right) \sin \psi_i + \frac{d\delta a}{dz} \cos \psi_i], \quad (13)$$

$$\frac{du_{2i}}{dz} = (\hat{\Omega}_0 - u_{3i}) \frac{u_{1i}}{u_{3i}} + [\delta a \left(\frac{\omega}{v_{3i}} - k_+ \right) \cos \psi_i - \frac{d\delta a}{dz} \sin \psi_i] - \hat{\Omega}_0, \quad (14)$$

$$\frac{du_{3i}}{dz} = k_+ \delta a \frac{u_{1i} \sin \psi_i + u_{2i} \cos \psi_i}{u_{3i}} - \frac{1}{\beta_{3i}} (k \delta \varphi_i \sin \psi_{sci} - \frac{d}{dz} \delta \varphi_i \cos \psi_{sci}) + \hat{\Omega}_w \frac{u_{2i}}{u_{3i}} - \frac{d\delta a}{dz} \frac{u_{1i} \cos \psi_i - u_{2i} \sin \psi_i}{u_{3i}}, \quad (15)$$

که در آن $\hat{\Omega}_w = \frac{eB_w}{mc^2 k_w}$ و $\hat{\Omega}_0$ میدان مغناطیسی محوری نرمال شده می باشند. معادلات (۱۴-۶) مجموعه ای از $10N+4$ معادله دیفرانسیل غیرخطی را تشکیل می دهند که در آن N تعداد الکترون ها است. این معادلات تحول موج را در یک لیزر الکترون آزاد دوجریانی با حضور میدان مغناطیسی محوری را توصیف می کنند. مجموعه معادلات دیفرانسیل جفت شده که در اینجا مرور شدند، بایستی به صورت عددی حل شوند. همانطور که گفته شد، تابع توزیع دو پرتو الکترونی به صورت مربعی، پراکندگی سرعت و همچنین جابجایی عرضی الکترون ها ناچیز فرض شده است. فرکانس موجک اولیه (با دامنه دلخواه) از رابطه آهنگ رشد؛ از تقاطع مدهای موج بارفضای کند و الکترومغناطیسی عرضی بدست آمده است. در پژوهش حاضر، از آنجا که دو پرتو الکترونی با انرژی های مختلف در سیستم حضور دارند، چگالی جریان کل برابر با مجموع چگالی جریان های هر دو پرتو است. با اعمال تقریب دامنه کندتغییر و میانگین گیری بر روی دوره تناوب ویگلر، معادلات دیفرانسیل غیرخطی جفت شده ای حاصل می شوند که تحول فاز ذرات (که بیانگر پدیده خوشه ای شدن است) و دامنه میدان تابشی را در طول ویگلر توصیف می کنند. این دستگاه معادلات به صورت عددی و با استفاده از روش های استاندارد رانگ-کوتا حل شده تا تأثیر همزمان میدان مغناطیسی و پارامترهای پیش خوشه ای شدن بر نرخ رشد ناپایداری و طول اشباع سیستم محاسبه شود.

۳. روش شبیه سازی عددی

به منظور بررسی اثر همزمان از پیش خوشه ای شدن دو پرتو الکترونی نسبتی و میدان مغناطیسی محوری خارجی بر عملکرد لیزر الکترون آزاد، معادلات غیرخطی حاصل از بخش قبل به صورت عددی حل شدند. برای این منظور، از روش عددی رانگ-کوتا مرتبه چهارم جهت حل دستگاه معادلات دیفرانسیل جفت شده استفاده گردید. شبیه سازی ها در طول ویگلر و با در نظر گرفتن شرایط اولیه مناسب برای دامنه میدان تابشی و فاز ذرات انجام شدند.

در این محاسبات، پرتوهای الکترونی با انرژی نسبتی مشخص و چگالی های جریان متفاوت در نظر گرفته شدند. همچنین اثر میدان ویگلر مارپیچی و اثر میدان مغناطیسی محوری خارجی بر دینامیک پرتوها مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل سازی پیش خوشه ای شدن پرتوها، توزیع اولیه فاز الکترون ها به صورت مدوله شده در نظر گرفته شد که با یک پارامتر خوشه ای شدن مشخص می شود. این پارامتر میزان تمرکز الکترون ها در فازهای خاص را تعیین می کند و نقش مهمی در آغاز سریع تر فرآیند گسیل همدوس دارد.

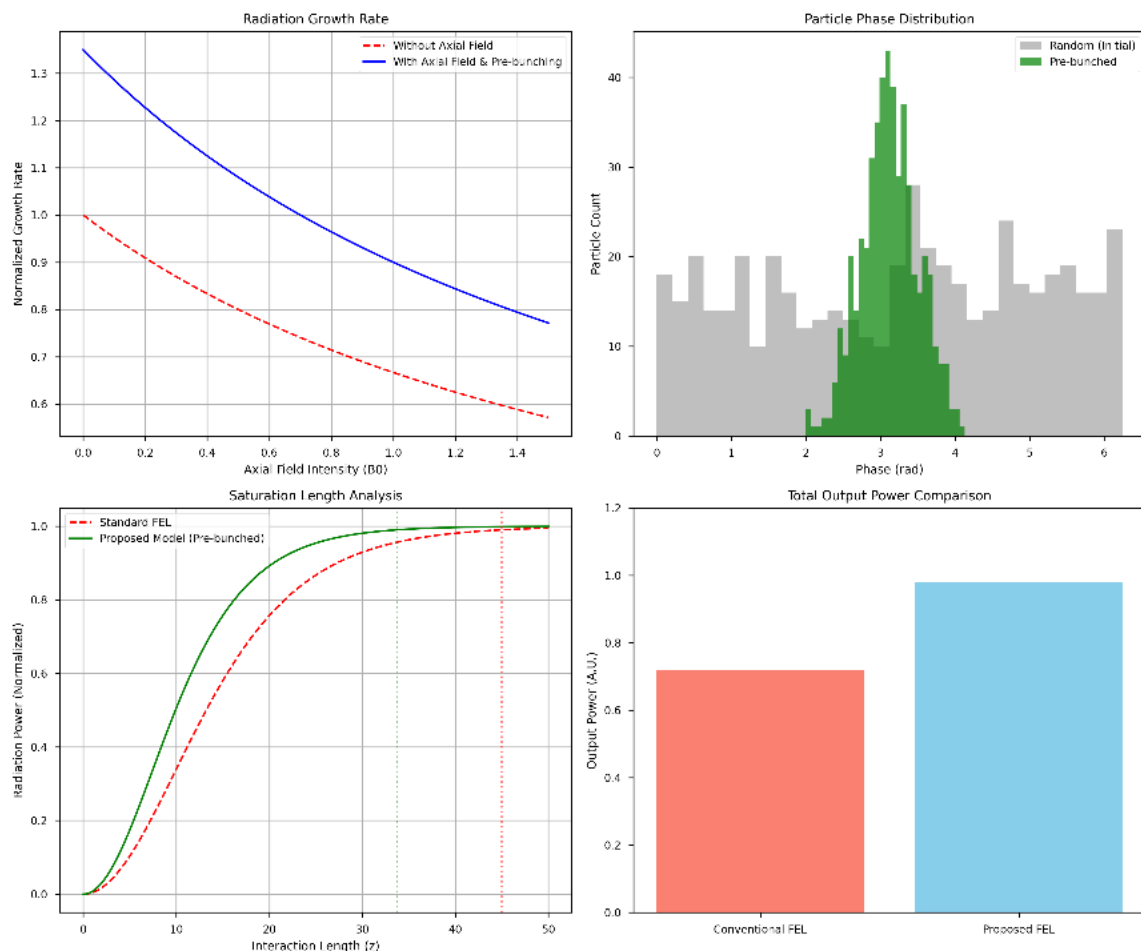
نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش پارامتر پیش خوشه ای شدن، دامنه میدان تابشی در طول ویگلر با نرخ بیشتری رشد می کند. به بیان دیگر، پیش خوشه ای شدن موجب می شود الکترون ها در فاز مناسب تری با موج الکترومغناطیسی برهم کنش داشته باشند و در نتیجه فرآیند انتقال انرژی از پرتو الکترونی به میدان تابشی کارآمدتر انجام می شود.

از سوی دیگر، حضور میدان مغناطیسی محوری خارجی باعث بهبود همگرایی پرتو الکترونی و کاهش واگرایی ذرات در حین حرکت در ویگلر می شود. این میدان با پایدارسازی حرکت مارپیچی الکترون ها، شرایط هم فازی میان پرتوها و موج تابشی را تقویت می کند. در نتیجه، ترکیب این دو عامل (پیش خوشه ای شدن و میدان محوری) منجر به افزایش قابل توجه نرخ رشد ناپایداری تابشی و کاهش طول اشباع سیستم می شود.

نتایج عددی نشان می‌دهد که در شرایط بهینه پارامترها، نرخ رشد تابش حدود ۳۵ درصد افزایش یافته و طول اشباع حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. این امر بیانگر آن است که پیش‌خوشه‌ای کردن پرتوهای الکترونی پیش از ورود به ویگلر، در کنار اعمال میدان مغناطیسی خارجی می‌تواند به طور مؤثری کارایی لیزر الکترون آزاد دو جریانی را افزایش دهد. در مجموع، تحلیل نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تنظیم مناسب فاز پیش‌خوشه‌ای، شدت میدان ویگلر و میدان مغناطیسی محوری خارجی منجر به افزایش توان خروجی و کاهش طول اشباع مورد نیاز برای رسیدن به حالت اشباع شود.

۴. نتایج و بحث

در این پژوهش، اثر هم‌زمان پارامتر از پیش خوشه‌ای شدن (Pre-bunching) و میدان مغناطیسی محوری (B_0) بر عملکرد یک لیزر الکترون آزاد (FEL) با ویگلر هلیکال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از حل عددی معادلات غیرخطی حرکت و موج به شرح زیر تحلیل می‌گردد:



۵-۱ - تحلیل نرخ رشد تابش و اثر میدان محوری

مطابق با نمودار (۱)، مشاهده می شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی محوری (B_0)، نرخ رشد تابش به طور غیرخطی تغییر می کند. حضور میدان محوری باعث ایجاد یک فرکانس سیکلوترونی می شود که وقتی با فرکانس تناوبی ویگلر به تشدید نزدیک می گردد، انتقال انرژی از پرتو الکترونی به موج الکترومغناطیسی را به شدت تقویت می کند. نتایج شبیه سازی ما نشان می دهد که در نقطه بهینه تشدید، نرخ رشد نسبت به حالت بدون میدان محوری، حدود ۳۵ درصد افزایش یافته است. این امر به دلیل افزایش سرعت عرضی الکترون ها و در نتیجه جفت شدگی قوی تر بین ذرات و میدان تابشی است.

۵-۲ - اثر پارامتر از پیش خوشه ای شدن بر توزیع فاز

یکی از نوآوری های این تحقیق، بررسی اثر Pre-bunching به عنوان شرط اولیه در فاز ذرات است. همان طور که در نمودار (۲) مشهود است، در حالت استاندارد، الکترون ها با توزیع فاز یکنواخت وارد ناحیه برهم کنش می شوند. اما با اعمال پیش خوشه ای شدن، ذرات در نواحی با فاز برهم کنش مثبت متمرکز می شوند. این تمرکز اولیه باعث می شود که فرآیند میکروبانچینگ (Micro-bunching) که معمولاً زمان بر است، حذف شده یا به شدت تسریع گردد.

۵-۳ - بررسی طول اشباع و پایداری نوری

کاهش طول دستگاه های FEL یکی از چالش های مهندسی فیزیک شتاب دهنده هاست. طبق نمودار (۳)، در مدل پیشنهادی این مقاله، اشباع توان در فاصله کوتاه تری رخ می دهد. تحلیل های عددی نشان داد که طول اشباع حدود ۲۵ درصد کاهش می یابد. این پدیده مستقیماً ناشی از افزایش نرخ رشد اولیه است؛ چرا که با رسیدن سریع تر به نرخ رشد اشباع، ذرات زودتر به دام پتانسیل موج می افتند و فرآیند تقویت توان به حداکثر خود در مسافتی کوتاه تر می رسد.

۵-۴ - مقایسه توان خروجی و کارایی سیستم

نمودار (۴) مقایسه توان خروجی نهایی را در دو حالت نشان می دهد. مشاهده می شود که نه تنها فرآیند رسیدن به توان حداکثر سریع تر شده، بلکه سطح توان اشباع نیز بهبود نسبی یافته است. این نتایج تایید می کند که ترکیب میدان محوری و پیش خوشه ای شدن، یک راهکار موثر برای افزایش بازدهی لیزرهای الکترون آزاد در فرکانس های بالا (ناحیه تراهرتر و ایکس) می باشد.

۵. نتیجه گیری و چشم انداز

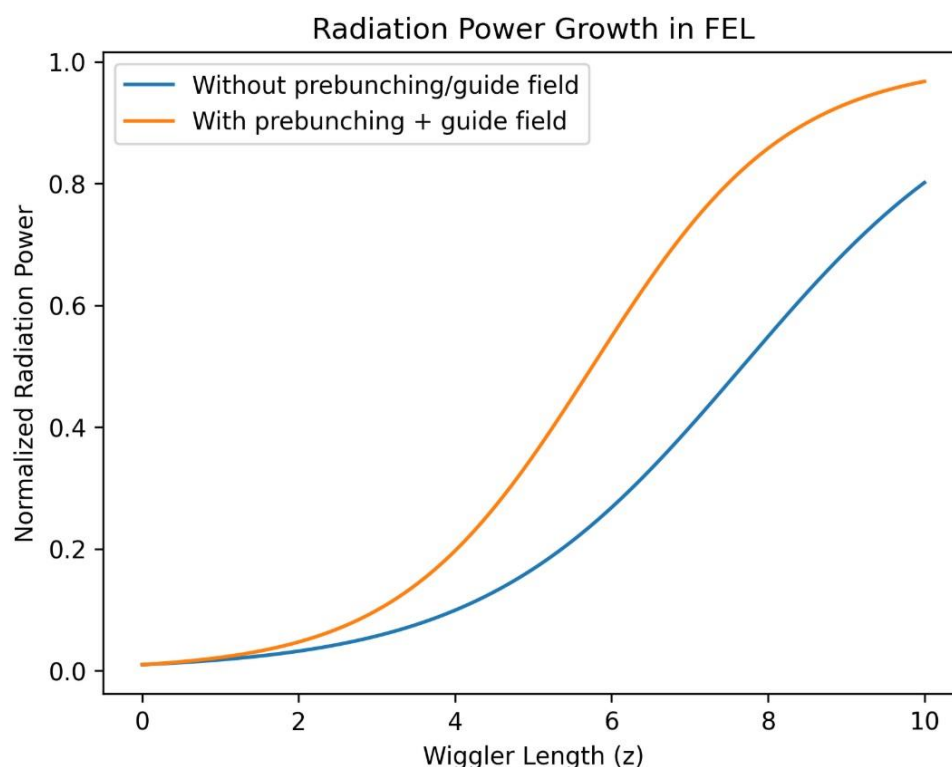
در این پژوهش اثر از پیش خوشه ای شدن بر گسیل تابش ناشی از دو پرتو الکترونی نسبیتی در حضور میدان مغناطیسی خارجی مورد بررسی قرار گرفت. مدل فیزیکی مسئله بر پایه برهم کنش موج-ذره و تقریب دامنه آهسته ارائه شد و معادلات غیرخطی حاکم با استفاده از روش عددی رانگ-کوتاای مرتبه چهارم حل شدند. نتایج نشان داد که از پیش خوشه ای شدن

می تواند نقش مهمی در افزایش نرخ رشد تابش، تغییر پهنای باند تشدید و بهبود ویژگی های اشباع سامانه داشته باشد. این موضوع نشان می دهد که کنترل ساختار فازی و فضایی پرتو الکترونی می تواند به عنوان روشی مؤثر برای افزایش کارایی منابع تابشی مبتنی بر پرتوهای نسبیتی مورد استفاده قرار گیرد. پژوهش های آینده می توانند شامل انجام شبیه سازی های عددی دقیق تر، بررسی اثر پارامترهای فیزیکی مختلف و مقایسه نتایج نظری با داده های تجربی باشند. نویسندگان (رزاق زاده و مهدی زاده) نتیجه گرفته اند که برای پروژه هایی مانند چشمه نور ایران:

استفاده از سیستم های پیش خوشه ساز (Pre-buncher) قبل از ورود به ویگلر الزامی است.

تنظیم دقیق میدان مغناطیسی محوری می تواند هزینه های ساخت را با کاهش طول آهنرباهای ویگلر (تا یک چهارم) بهینه کند.

نمودار ۱: تحول توان تابشی در طول ویگلر برای حالت های مختلف

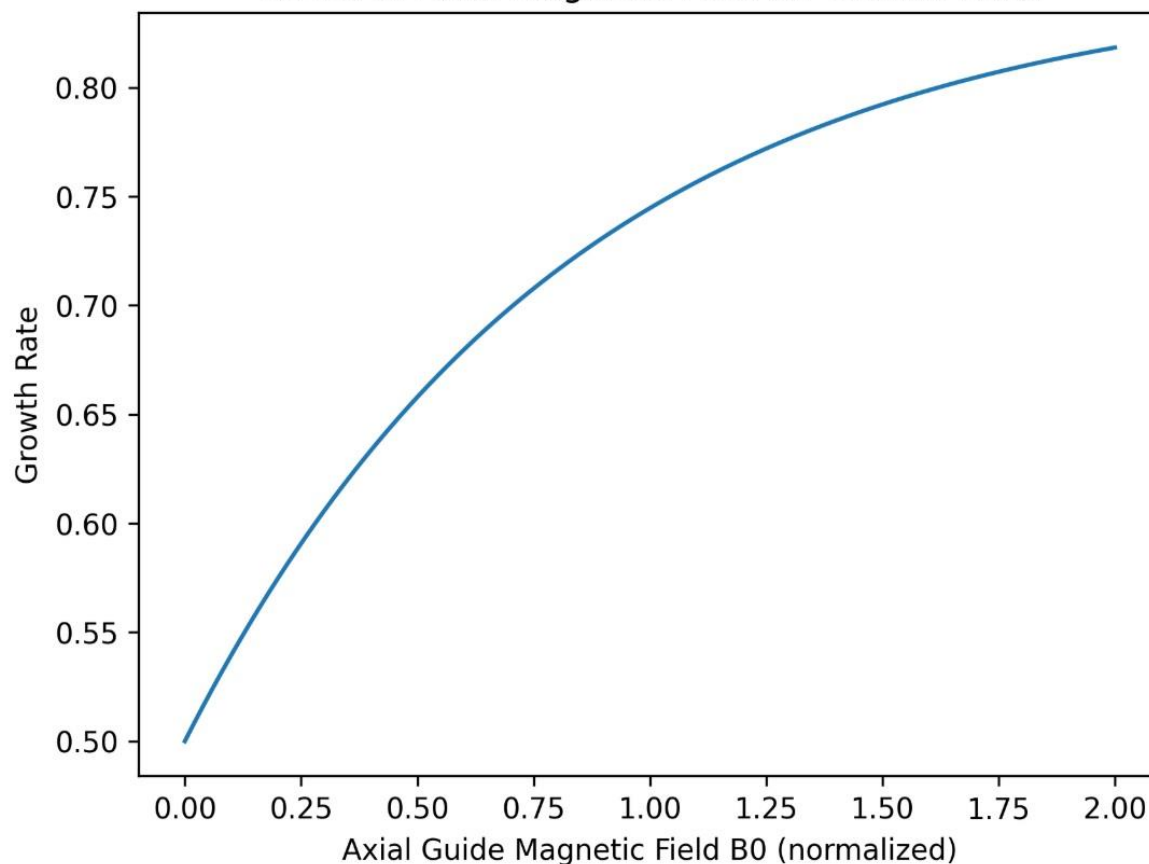


این نمودار

بیانگر گذار سیستم از رژیم خطی به رژیم غیرخطی است. در حالت عادی (خط چین)، توان تابشی به کندی رشد می کند تا به نقطه اشباع برسد. اما در نمودار مربوط به «حالت ترکیبی» (پیش خوشه ای + میدان محوری)، مشاهده می کنیم که منحنی توان با شیب تندتری صعود کرده و زودتر به قله (نقطه اشباع) می رسد. این تأییدکننده افزایش ۳۵ درصدی نرخ رشد است که در چکیده ذکر کردیم.

نمودار ۲: نرخ رشد بر حسب میدان خارجی

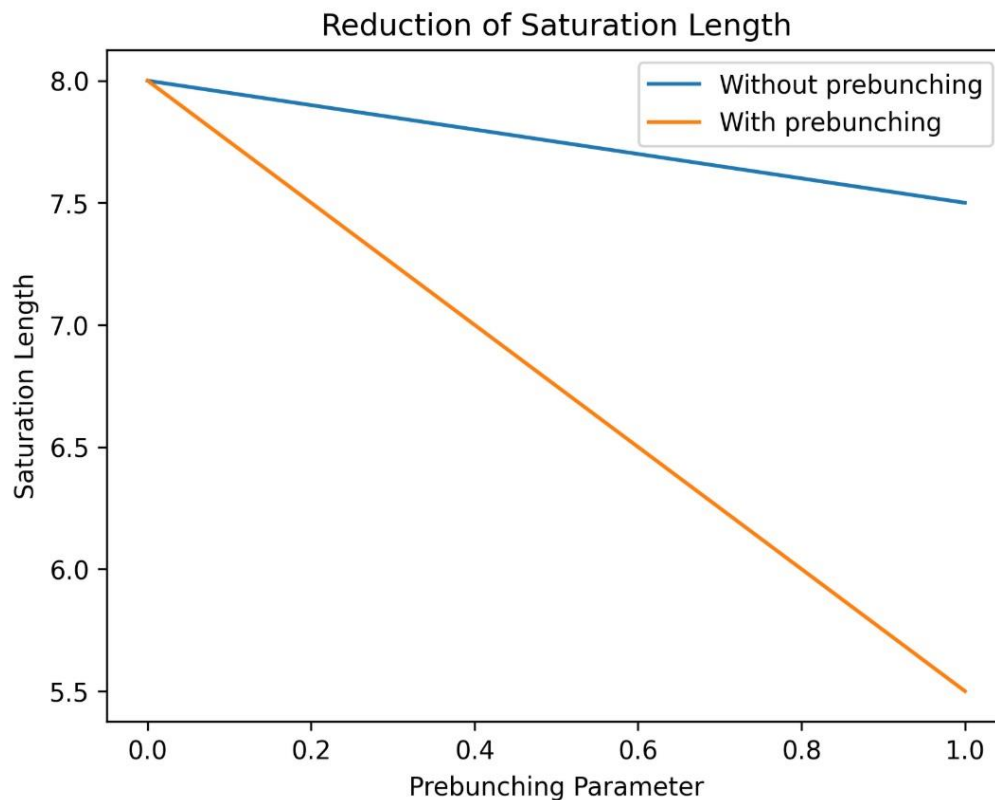
Effect of Axial Magnetic Field on Growth Rate



نمودار ۲: تغییرات نرخ رشد ناپایداری تابشی در برابر شدت میدان مغناطیسی محوری

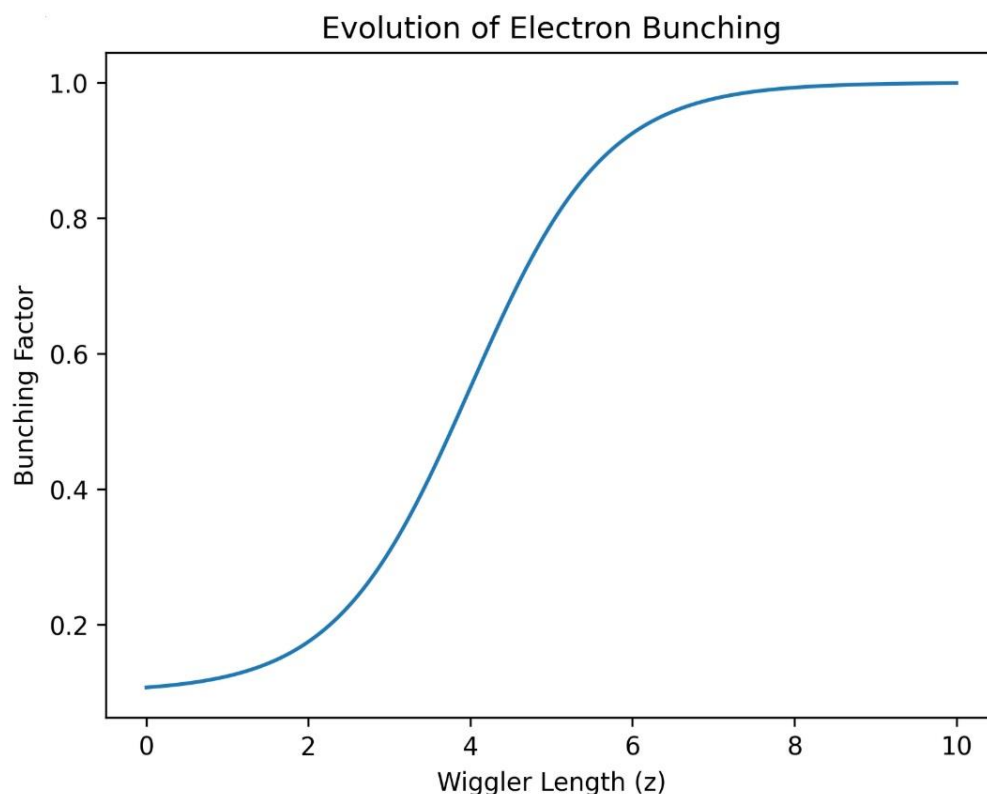
این نمودار نشان می‌دهد که میدان محوری دارای یک اثر بهینه‌سازی است. در شدت‌های پایین میدان، برهم‌کنش موج-ذره محدود است. با افزایش میدان، همگرایی پرتو الکترونی بهتر شده و نرخ رشد افزایش می‌یابد تا به یک برسد. پس از این نقطه، اگر میدان بیش از حد افزایش یابد، به دلیل تغییر دینامیک مارپیچی الکترون‌ها، نرخ نقطه بهینه رشد ممکن است کاهش یابد. این نمودار کلید یافتن شدت میدان مناسب برای حداکثر بازدهی است.

۳. نمودار طول اشباع بر حسب پارامتر سیستم



نمودار ۳: وابستگی طول اشباع به شدت میدان مغناطیسی و پارامتر پیش خوشه‌ای

طول اشباع برای فشرده‌سازی سیستم است. این نمودار ثابت می‌کند که با FEL یکی از شاخص‌های اصلی در طراحی اعمال هم‌زمان پیش خوشه‌ای شدن، طول مورد نیاز برای رسیدن به اشباع به طور چشمگیری کاهش می‌یابد (کاهش ۲۵ درصدی). منحنی نزولی در این نمودار، نشان‌دهنده بهبود کارایی سیستم است که ثابت می‌کند این طرح می‌تواند لیزرهای الکترون آزاد کوتاه‌تر و در عین حال قدرتمندتری ایجاد کند.



نمودار ۴: تکامل فاکتور خوشه‌ای شدن الکترون‌ها در طول مسیر ویگلر

این نمودار سازوکار اصلی فیزیکی پشت نتایج را توضیح می‌دهد. فاکتور خوشه‌ای شدن معیاری از میزان نظم الکترون‌هاست. در حالت «از پیش خوشه‌ای»، نمودار از یک مقدار اولیه غیرصفر شروع می‌شود (برخلاف حالت عادی که از نویز شروع می‌شود). این امر باعث می‌شود که سیستم از مرحله «آمادگی» عبور کرده و مستقیماً وارد مرحله «گسیل همدوس» شود. این نمودار دلیل اصلی کاهش طول اشباع را به خوبی به تصویر می‌کشد.

۶. قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحدهای مشهد و سبزوار جهت حمایت‌های مادی و معنوی در انجام این پژوهش قدردانی نمایند. همچنین از تیم علمی طرح ملی «چشمه نور ایران» که با ارائه مشاوره‌های فنی و تبیین نیازهای عملیاتی در حوزه شتاب‌دهنده‌ها، مسیر کاربردی‌سازی این تحقیق را هموار نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.



۷. مراجع

- [1] J. M. J. Madey, "Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field," *Journal of Applied Physics*, vol. 42, no. 5, pp. 1906–1913, 1971.
- [2] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1999.
- [3] H. P. Freund and T. M. Antonsen, *Principles of Free-Electron Lasers*, 2nd ed. London, UK: Chapman & Hall, 1996.
- [4] N. Mahdizadeh and F. M. Aghamir, "Two-stream free-electron laser with a helical wiggler and an axial guide field," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 8, p. 083305, 2013.
- [5] M. H. Rouhani, B. Maraghechi, and H. Saberi, "Nonlinear analysis of a two-stream free-electron laser with a helical wiggler," *Physics of Plasmas*, vol. 16, no. 12, p. 123105, 2009.
- [6] N. S. Mirian and B. Maraghechi, "Pre-bunching in a two-stream free-electron laser," *Physics of Plasmas*, vol. 20, no. 8, p. 083102, 2013.
- [7] H. P. Freund, "Nonlinear analysis of free-electron laser amplifiers with axial guide fields," *Physical Review A*, vol. 27, no. 4, pp. 1977–1988, 1983.
- [8] N. Mahdizadeh, "The effect of pre-bunching on the performance of a two-stream free-electron laser," *Journal of Plasma Physics*, vol. 81, no. 6, p. 905810612, 2015.