

## بررسی تأثیر نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی بر برهم‌کنش لیزر فوق پرتوان با پلاسمای نزدیک بحرانی

حسن حسین‌خانی\*، مسعود پیشدست، جمال‌الدین یزدان‌پناه، سید ابولفضل قاسمی

پژوهشکده پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران-ایران

\*Email: hhosseinkhani@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۹/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۹

### چکیده

در این مطالعه، تأثیر نیروی‌های واکنش تابش در مدل‌های کلاسیکی و کوانتومی بر رفتار پلاسما و میدان‌های الکترومغناطیسی در برهم‌کنش لیزرهای فوق پرتوان ( $10^{22}$ – $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>) با پلاسماهای نزدیک بحرانی (حدود چند دهم تا چند برابر چگالی بحرانی) با استفاده از شبیه‌سازی ذره در سلول در یک‌بعد مکانی در فرمول‌بندی‌های کلاسیکی و کوانتومی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند نیروی واکنش تابش تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر اختلالات پلاسمایی القا شده و تحولات آن‌ها و همچنین تحولات خودسازگار لیزر دارد. به‌طور کلی، در شدت‌های فوق‌نسبیتی بالاتر (حدود  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>)، وارد کردن اثرات واکنش تابش باعث افزایش تزریق انرژی پالس به پلاسما می‌شود. این انرژی تزریق شده یا صرف افزایش انرژی مکانیکی اختلال پلاسما (افزایش جذب مؤثر) شده یا به‌صورت تابش فوتون‌های فرابنفش به بیرون هدر می‌رود. در شدت‌های پایین‌تر (حدود  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>)، پدیده واکنش تابش بیش‌تر همانند یک نیروی اتلافی و اصطکاکی نقش ایفا کرده و میزان جذب مؤثر و دامنه موج پلاسمایی را کاهش می‌دهد. اگرچه اثر اصطکاکی نیروی واکنش تابش ملموس و قابل‌انتظار است، اثر مشاهده شده در افزایش جذب در شدت‌های بالاتر، یک پدیده غیرخطی پیچیده و غیرعادی است. علاوه بر این، وجود نیروی واکنش تابش باعث ایجاد بعضی تغییرات الگویی در موج پلاسمایی و اشباع‌شدگی در جذب انرژی لیزر می‌شود. در این پژوهش، ضمن گزارش این پدیده‌ها و هم‌چنین مقایسه‌هایی بین نتایج فرمول‌بندی‌های کلاسیکی و کوانتومی، توضیحاتی در مورد آن‌ها ارائه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** برهم‌کنش لیزر و پلاسما، نیروی واکنش تابش کلاسیکی، نیروی واکنش تابش کوانتومی

## Investigation of the classical and quantum radiation reaction effect on interaction of ultra high power laser with near critical plasma

H. Hosseinkhani\*, M. Pishdast, J. Yazdanpanah, S.A. Ghasemi

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran

### Research Article

Received 6.12.2020, Accepted 29.12.2020

### Abstract

In the present study, by using one dimensional PIC simulation, we investigate the radiation reaction (RR) effects on the plasma behaviors and self-consistent laser evolutions during the interaction of ultra-high intensity lasers ( $10^{22}$ – $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>) with near-critical plasmas (one-tenth to few times of the critical density). The results show that RR force has significant effects on the induced plasma disturbance and self-consistent laser evolutions. Generally, at higher intensities ( $\sim 10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>), introducing the RR effects leads to enhanced delivered electromagnetic energy to the plasma. This energy is either used to increase the mechanical energy of the plasma disturbance (increasing the effective absorption) or compensation of the radiation energy loss by ultra-violet photon emissions. At lower intensities ( $\sim 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>), RR phenomenon mostly acts as a damping friction force, and reduces the effective absorption and the plasma wave amplitude. Though the friction effect of the RR force is conceptually well known, the observed enhanced absorption at higher intensities is a complex and anomalous nonlinear phenomenon. In addition, the presence of RR force introduces structural differences in the plasma disturbance and whence the absorption saturation. Here, along with reporting these phenomena as well as comparisons between the classical and quantum frameworks, their possible descriptions have been presented.

**Keywords:** Laser plasma interaction, Classical radiation reaction, Quantum radiation reaction



۱. مقدمه

مطالعات نظری در خصوص گسیل فوتون توسط ذرات باردار و نیروی واکنش تابش<sup>۱</sup> (RR) مربوط به آن از گذشته یکی از موضوعات بنیادین و مورد توجه در زمینه الکترومغناطیس بوده است [۱، ۲]. با پیشرفت‌های شایان در حوزه فن‌آوری لیزر و افزایش قابل توجه شدت لیزر تا چندین پتاوات در پروژه‌هایی از قبیل سامانه لیزری اروپا<sup>۲</sup> (ELI)، سامانه فوق پرشدت چین، پروژه آپولون<sup>۳</sup> و ... [۳-۷] و فراهم آمدن بستر مطالعات تجربی در این خصوص، این پدیده در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است [۸-۱۴].

واکنش تابش، تأثیر متقابل فوتون/تابش گسیلی بر دینامیک ذره باردار شتاب‌دار گسیلنده است [۱۰]. در این فرایند، ذرات باردار شتاب گرفته از خود فوتون گسیل می‌کنند [۱] و بدین‌وسیله مقداری از انرژی و تکانه خود را از دست می‌دهند. در سرعت‌های غیر نسبیتی، این فوتون‌های گسیلی چندان پر انرژی نیستند و نیروی پس‌زنی ناشی از آن‌ها تأثیر به‌سزایی بر دینامیک ذره نخواهد داشت.

در برهم‌کنش لیزرهای پرتوان با پلاسما، ذرات تا سرعت‌های فرانسبیتی شتاب می‌گیرند و نیروی واکنش تابش فوتون‌های پر انرژی گسیل شده از این ذرات می‌تواند حرکت آن‌ها و دینامیک پلاسما را تحت تأثیر قرار داده [۸، ۹، ۱۴، ۱۵] و منجر به پدیده‌هایی از قبیل به‌دام‌اندازی واکنش تابش شود [۱۶-۱۸].

در فرمول‌بندی کلاسیکی واکنش تابش، نیروی واکنش تابش (نیروی لاندائو-لیفشیتز) به‌صورت نیروی پیوسته بر الکترون اثر گذاشته و باعث پس‌زنی آن می‌شود. اعتبار این فرمول‌بندی زمانی است که انرژی فوتون گسیل شده در مقایسه با انرژی الکترون گسیلنده بسیار کوچک‌تر باشد [۱۹]. این در حالی است که در سازوکار کوانتومی، امکان گسیل فوتون‌هایی با انرژی از مرتبه انرژی الکترون گسیلنده وجود دارد [۲۰، ۲۱]. چنین فوتون‌هایی می‌توانند با سازوکارهای ثانوی منجر به گسیل زوج‌های الکترون-پوزیترون گردند.

علاوه بر امکان تولید زوج و فوتون‌های پرانرژی، سازوکارهای کلاسیکی و کوانتومی دو تفاوت مهم در رفتار الکترون‌ها و طیف گسیل شده از آن‌ها برجای می‌گذارند: (۱) در سازوکار کلاسیکی، توان کل لحظه‌ای تابش انجام شده توسط الکترون در مقایسه با سازوکار کوانتومی بیش‌تر است (برخلاف امکان تولید فوتون‌های پر انرژی، (۲) طبیعت احتمالی و گسسته بودن گسیل فوتون در قالب کوانتومی بر حرکت

الکترون تأثیرگذار خواهد بود و منجر به نوعی حرکت تصادفی در الکترون گسیلنده می‌شود که با سازوکار کلاسیکی نیروی پس‌زنی پیوسته قابل توصیف نیست [۲۰، ۲۴-۲۲].

در فرمول‌بندی کلاسیکی لاندائو-لیفشیتز<sup>۴</sup> (LL)، نیروی واکنش تابش حرکت الکترون در میدان‌های خارجی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶، ۱۹]:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}_L + \vec{F}_{rr} \quad (1)$$

که در آن  $P$  تکانه الکترون و  $F_L$  نیروی لورنتس است:

$$\vec{F}_L = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{B}}{c}) \quad (2)$$

$F_{rr}$  نیز نیروی واکنش تابش است و در حالت نسبیتی قوی برابر است با [۱۷]:

$$\vec{F}_{rr} \approx -\left(\frac{2e^2}{3m_e c^3}\right) \gamma^3 \vec{V} \left[ (\vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{B}}{c})^2 - \frac{(\vec{E} \cdot \vec{v})^2}{c^2} \right] \quad (3)$$

در این رابطه  $c$  سرعت نور،  $e$  و  $m_e$  به ترتیب بار و جرم الکترون،  $E$  و  $B$  میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و  $\gamma$  ضریب نسبیتی هستند. مسیر حرکت الکترون می‌تواند با حل عددی این معادلات با استفاده از میدان لیزر مشخص به دست آید.

پدیده‌های برهم‌کنش لیزر با پلاسما در شدت‌های بسیار بالا به‌شدت غیرخطی و پیچیده می‌باشند. وجود نیروی واکنش تابش این پیچیدگی را دوچندان کرده و تحلیل پیامدهای آن را دشوار می‌کند. در این شرایط، شبیه‌سازی‌های ذره-در-سلول PIC به‌صورت گسترده در مطالعات برهم‌کنش لیزر با پلاسما مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌ویژه بعضی از کدهای PIC به‌تازگی مجهز به ابزار اعمال نیروی واکنش تابش در فرمول‌بندی کلاسیکی یا کوانتومی می‌باشند [۱۶، ۲۷-۲۵]. در فرمول‌بندی کلاسیکی، واکنش تابش از طریق اصلاح نیروی لورنتس-نیوتن در معادلات حرکت با افزودن نیروی لاندائو-لیفشیتز (LL) انجام می‌شود؛ درحالی‌که در فرمول‌بندی کوانتومی از طریق محاسبه ضرایب احتمال گسیل فوتون و به روش مونت‌کارلو<sup>۵</sup> (MC) اعمال می‌شود.

در مرجع [۱۵] تأثیر نیروی واکنش کلاسیکی و کوانتومی بر سازوکار برهم‌کنش، در برهم‌کنش لیزرهای فوق پرتوان با

1. Radiation Reaction
2. Extreme Light Infrastructure
3. Apollon

4. Landau and Lifshitz  
5. Monte-Carlo



تعداد ۲۵۶۰۰ سلول تقسیم شده است. پلاسماهای هیدروژن‌گونه در بازه حدود ۱۰ تا ۴۰۰  $\mu\text{m}$  قرار داده شد. ۳۲ شبه‌ذره الکترون و ۸ شبه‌ذره پروتون (با بار متعادل چهار برابر بار الکترون) در هر سلول قرار داده شد. پالس لیزر از سمت چپ وارد ناحیه شبیه‌سازی می‌شود و در امتداد محور  $x$  حرکت می‌کند.

### ۳. بحث و نتایج

به‌منظور بررسی تأثیر نیروهای واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی بر سازوکار برهم‌کنش، در ابتدا نتایج شبیه‌سازی‌های مربوط به برهم‌کنش لیزر با دامنه بی‌بعد ۴۰۰ و پلاسماهای چگالی ۰/۲ برابر چگالی بحرانی ارائه شده است. نمایه چگالی الکترونی و مؤلفه  $y$  پتانسیل برداری بی‌بعد لیزر در حالت‌های عدم حضور واکنش تابش، حضور واکنش تابش کلاسیکی و حضور واکنش تابش کوانتومی در زمان‌های مختلف پس از برهم‌کنش، به‌ترتیب در شکل ۱ الف تا پ گزارش شده است.

با برهم‌کنش لیزر فوق‌پرتوان با پلاسما، نیروی پاندروموتیو لیزر الکترون‌ها را به سمت جلو جاروب کرده و جبهه‌ای از الکترون‌های فشرده را در جلوی پالس شکل می‌دهد که همراه پالس در طول پلاسما منتشر می‌شود [۱۵، ۱۶]. در چگالی‌های نه‌چندان بالا (در حدود / کم‌تر از چگالی بحرانی)، این انتشار مقارن با تولید موج عقبه پلاسما است که در حالت سه‌بعدی فضایی (واقعی) مشهور به ناحیه حباب است. هم‌چنین در شدت‌های فوق‌نسبیتی مورد بحث، به‌دلیل بارگذاری بسیار سنگین الکترون‌های به‌دام افتاده و حرکت یون‌ها، ساختار منظم موج پلاسمایی تا حد زیادی مخدوش می‌گردد.

مطابق این تفسیر، یک کاواک الکترونی حول پالس لیزر شکل می‌گیرد که با گذشت زمان و نفوذ بیش‌تر پالس لیزر در پلاسما، تقویت شده و منجر به تزریق الکترون‌ها به درون کاواک و شتاب‌گیری آن‌ها می‌شود. فرایند تقویت کاواک الکترونی در شکل ۱ الف در عدم حضور نیروی واکنش تابش کاملاً مشهود است؛ به‌عنوان مثال اولین قله چگالی الکترونی (مرز سمت چپ کاواک) در پشت جبهه فشرده‌گی در زمان  $1.040 \text{ fs}$ ، تقویت شده و به بیش از چهار برابر چگالی بحرانی پلاسما می‌رسد.

در حضور نیروی واکنش تابش، شکل ۱ ب و پ، این سازوکار متفاوت است و به هم‌ریختگی و ناهماهنگی ساختار چگالی بیش‌تر می‌شود. به‌عبارتی به‌جای کاواک حول پالس لیزر، قله‌های چندگانه و افت و خیزهای بیش‌تری مشاهده می‌شوند.

پلاسما در رژیم شتاب‌دهی موج عقبه<sup>۱</sup> با استفاده از شبیه‌سازی ذره در سلول بررسی شده است. هم‌چنین در مرجع [۲۸] سه مدل کلاسیکی، کلاسیکی اصلاح شده و مدل تصادفی واکنش تابش در برهم‌کنش پرتو الکترونی با انرژی از مرتبه گیگا‌الکترون‌ولت و پالس لیزر با شدت بزرگ‌تر از  $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$  به‌طور نظری و شبیه‌سازی بررسی شده است. مطالعات تجربی و نظری مدل‌های مختلف واکنش تابش در برهم‌کنش پرتو الکترونی با لیزر در مرجع [۲۹] مرور شده است. در مراجع [۱۰، ۲۰] نیز مدل‌های کلاسیکی LL اصلاح شده کوانتومی، تصادفی فوکر-پلانک<sup>۲</sup> و کوانتومی (MC) در برهم‌کنش پرتو الکترونی با لیزر در راستای مخالف و هم‌چنین پرتو الکترونی در حضور میدان مغناطیسی بررسی شده‌اند. تأثیر نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی بر انرژی الکترون‌ها در رژیم حبابی برهم‌کنش لیزر و پلاسما به ازای شدت‌های مختلف لیزر با استفاده از کد VLPL در مرجع [۳۰] بررسی شده است.

در پژوهش حاضر، تأثیر نیروی واکنش تابش با سازوکار کلاسیکی (LL) و کوانتومی (MC) در برهم‌کنش لیزر با شدت‌های مختلف و هم‌چنین پلاسماهای با چگالی‌های اولیه متفاوت در محدوده نزدیک بحرانی بر رفتار برهم‌کنش از قبیل توزیع چگالی و انرژی الکترون‌ها و هم‌چنین رفتار امواج الکترومغناطیسی با استفاده از شبیه‌سازی ذره در سلول بررسی شده است.

### ۲. مشخصه‌های شبیه‌سازی

از کد ذره در سلول Smilei [۲۶، ۲۷] با قابلیت به‌کارگیری نیروهای واکنش تابش با سازوکارهای مختلف کلاسیکی تا کوانتومی استفاده شده است. مجموعه گسترده‌ای از شبیه‌سازی‌ها در یک بعد به ازای مشخصه‌ها و چگالی‌های متنوع لیزر و پلاسما در سه حالت عدم حضور نیروی واکنش تابش، حضور نیروی واکنش کلاسیکی و حضور نیروی واکنش تابش کوانتومی انجام شد که در ادامه به‌ترتیب با نمادهای LL، NoRR و MC نشان داده شده‌اند.

نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌ها به ازای پالس لیزر با قطبش دایروی با طول موج  $1 \mu\text{m}$  و نمایه زمانی گوسی شکل،  $\text{FWHM} = 38 \text{ fs}$ ، با دامنه‌های بی‌بعد لیزر برابر با ۷۰۰، ۴۰۰،  $a_0 = 100$  و چگالی‌های اولیه پلاسما برابر با ۲ و ۰/۲ برابر چگالی بحرانی پلاسما،  $n_c$  گزارش شده است.

$$I = 1.37 \times 10^{18} (a_0 / \lambda [\mu\text{m}])^2 \text{ W/cm}^2 \quad \text{و} \quad n_e = (m_e \omega^2 / 4\pi e^2)$$

طول ناحیه شبیه‌سازی برابر  $400 \mu\text{m}$  لحاظ گردید که به

1. Wakefield
2. Stochastic Fokker-Planck

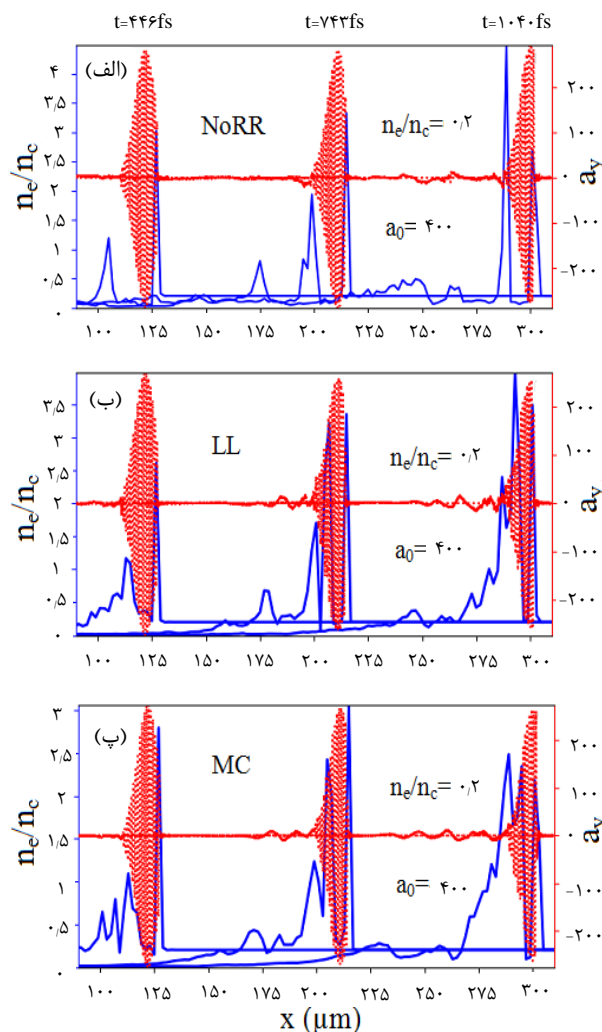


به منظور مقایسه تأثیر نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی بر نحوه شتاب‌گیری الکترون‌ها، توزیع مکانی تکانه طولی (نگاشت فضای فاز طولی) الکترونی در دو زمان متفاوت پس از برهم‌کنش در حالت‌های عدم حضور نیروی RR و حضور نیروی RR کلاسیکی و کوانتومی در شکل ۲ الف تا ج نشان داده شده است. شکل‌های ۲ الف و ۲ ب نشان می‌دهند که الکترون‌های پشت جبهه پلاسما، (در مکان‌های تقریبی  $100 \mu\text{m}$  و  $200 \mu\text{m}$ ، به ترتیب در زمان‌های  $446 \text{ fs}$  و  $743 \text{ fs}$ ) تا سرعت‌های بسیار بالا شتاب گرفته‌اند. بخشی از این الکترون‌ها شامل بدنه موج عقبه (قله دوم) و بخشی از آن‌ها الکترون‌های به دام افتاده در کاواک این موج هستند. گسست قابل مشاهده در راستای تکانه در شکل‌های مذکور و تمایل قله‌ها به سمت جلو مؤید وجود الکترون‌های به دام افتاده می‌باشد. البته باید تأکید شود که به دلیل حرکت یون‌ها، ساختار موج عقبه در شدت‌های فوق‌نسبیتی بررسی شده در این‌جا با شدت‌های ملایم نسبیتی (دامنه بی بعد ۱ تا ۱۰) بسیار متفاوت است و قله‌های چگالی شکل گرفته در شدت‌های بالا می‌توانند به همراه لیزر به سمت جلو کشیده شوند (شکل ۲ ب). به هر حال از آن‌جا که هدف این مقاله توصیف جزئیات اختلال پلاسمایی شکل گرفته نیست، بیش از این به این موضوع پرداخته نشده است. تیزشدگی تدریجی پالس که در این شکل‌ها قابل مشاهده است، به دلیل واکنش اپتیکی موج پلاسما بر روی پالس لیزر است که به طور مفصل در مراجع [۳۱، ۳۲] بحث شده است.

انتظار می‌رود لحاظ کردن پدیده گسیل فوتون توسط الکترون‌ها و نیروی واکنش مربوط به آن، منجر به کاهش شتاب‌گیری الکترون‌ها شود. مقایسه شکل‌های ۲ الف، ب و ۲ پ تا ج نشان می‌دهد که لحاظ کردن پدیده نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی منجر به افت قابل‌ملاحظه تکانه الکترون‌های شتاب گرفته می‌شود. همچنین به دلیل پدیده به دام‌اندازی واکنش تابش، دسته‌های الکترونی با پهنای گسترده‌تر نسبت به حالت NoRR و نزدیک به جبهه پلاسما شکل گرفته و شتاب می‌گیرند.

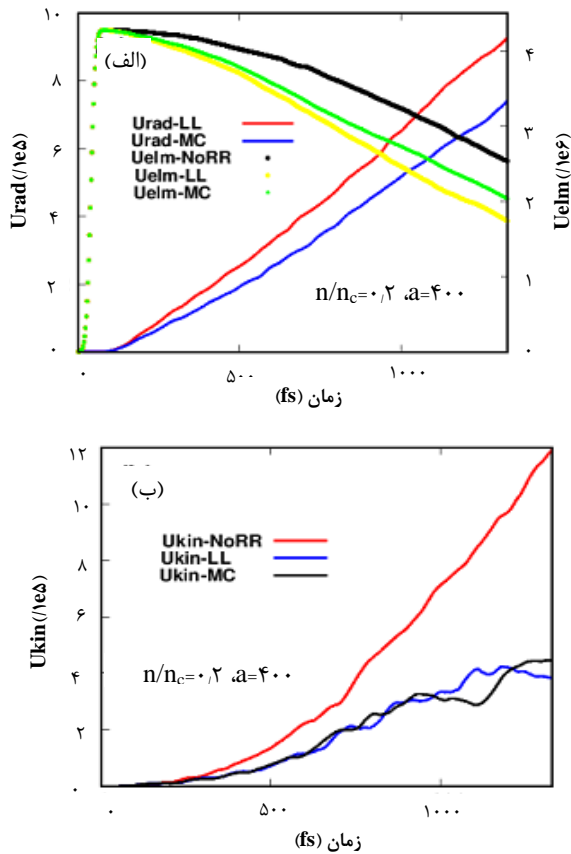
مطابق یافته‌های پیشین در مدل‌سازی دینامیک الکترون تحت تأثیر نیروی واکنش تابش (برای مثال به مرجع [۲۰] مراجعه شود)، آهنگ کل تابش الکترومغناطیس نسبت به مدل کوانتومی بیش‌تر است (که این پدیده علی‌رغم امکان گسیل فوتون‌های با انرژی بالا در مدل کوانتومی رخ می‌دهد؛ لازم به ذکر است که آهنگ کل مجموع انرژی تمام فوتون‌ها را در بر

در حضور نیروی واکنش تابش کلاسیکی (LL)، به دلیل پدیده به دام‌اندازی واکنش تابش، دسته الکترونی با پهنای بزرگ‌تر از حالت NoRR در پشت جبهه پلاسما و درون پالس لیزر تشکیل می‌گردد. در حضور نیروی واکنش کوانتومی (MC)، در شکل ۱ پ نیز به دلیل پدیده RRT، دسته الکترونی درون پالس لیزر مشاهده می‌شود. مقایسه شکل‌های ۱ ب و پ نشان می‌دهد که قله چگالی این دسته الکترونی در حالت LL بیش‌تر از حالت MC بوده و پهنای دسته الکترونی پشت جبهه پلاسما در حالت MC بزرگ‌تر از حالت LL است که می‌تواند ناشی از ماهیت تصادفی گسیل فوتون و واکنش تابش در سازوکار کوانتومی باشد که منجر به گستردگی فضای فاز الکترون‌ها می‌شود [۲۰].



شکل ۱. نمایه چگالی الکترونی (ستون سمت چپ) و پالس لیزر (ستون سمت راست) در امتداد محور انتشار لیزر در زمان‌های مختلف پس از برهم‌کنش در حالت‌های الف) عدم حضور نیروی RR، ب) حضور نیروی RR کلاسیکی و پ) حضور نیروی RR کوانتومی به ازای دامنه بی بعد لیزر  $400$  و چگالی پلاسما برابر با  $0.2$  چگالی بحرانی.





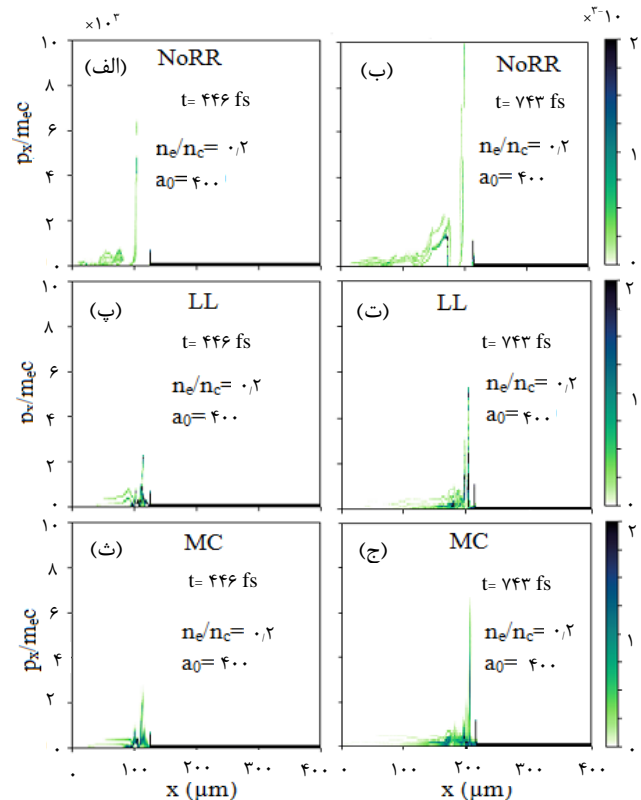
شکل ۳. تحولات زمانی انرژی تابشی (ستون سمت چپ) و الکترومغناطیسی (ستون سمت راست) و جنبشی الکترون‌ها برحسب زمان در حالت‌های NoRR، LL و MC به ازای دامنه بی بعد لیزر ۴۰۰ و چگالی پلاسما برابر با ۰٫۲ چگالی بحرانی.

مطابق با نمودار عمودی سمت راست این شکل، در زمان‌های ابتدایی برهم‌کنش در هر سه حالت NoRR، LL و MC (به ترتیب منحنی‌های مشکی، زرد و سبز رنگ) با ورود پالس لیزر به ناحیه برهم‌کنش، چگالی انرژی الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد. با گذر زمان و برهم‌کنش پالس لیزر با پلاسما، انرژی لیزر در پلاسما جذب می‌شود و هر سه نمودار روندی کاهشی را نشان می‌دهند. در حضور نیروی واکنش تابش، نرخ افت انرژی الکترومغناطیسی نسبت به حالت NoRR سریع‌تر است که می‌توان آن را با از دست دادن انرژی الکترون‌ها به دلیل گسیل فوتون و پس‌زنی الکترون با نیروی واکنش تابش، همانند نوعی اصطکاک عمل می‌کند، توجیه کرد. هم‌چنین به دلیل نرخ بالاتر تابش در سازوکار کلاسیکی نسبت به کوانتومی، میزان اتلاف انرژی لیزر با فرایند واکنش تابش در مدل LL بیش از مدل MC است (شکل ۳ الف).

به طریق مشابه و به‌طور کلی، انتظار می‌رود که انرژی جنبشی الکترون‌ها در عدم حضور پدیده واکنش تابش بیش‌تر

می‌گیرد. از این‌رو انتظار می‌رود که نیروی واکنش تابش قوی‌تر در مدل کلاسیکی منجر به کاهش بیش‌تر تکانه الکترون‌های شتاب گرفته نسبت به مدل کوانتومی شود. مقایسه نمودارهای تکانه الکترونی در شکل ۲ (پ، ج) این یافته را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که تکانه الکترونی در حضور نیروی واکنش تابش کلاسیکی اندکی کوچک‌تر از حالت کوانتومی است.

تغییرات زمانی انرژی کل الکترومغناطیسی (انرژی تابش الکترومغناطیسی بار منجر به واکنش تابش با عنوان تابش در شکل‌ها) و هم‌چنین انرژی جنبشی الکترونی در شکل ۳ الف و ب نمایش داده شده‌اند. ستون سمت چپ شکل ۳ الف چگالی انرژی تابشی با لحاظ نمودن پدیده RR کلاسیکی (نمودار قرمز رنگ) و کوانتومی (نمودار آبی رنگ) را نشان می‌دهد (در حالت NoRR تابش صورت نمی‌گیرد). نرخ تغییرات این چگالی انرژی تابشی در هر دو مدل LL و MC به‌صورت نسبتاً خطی با زمان افزایش می‌یابد؛ اگرچه سازوکار تابش کلاسیکی، همان‌گونه که بیان شد، در موافقت با تحلیل‌های پیشین ([۲۰]) میزان تابش قوی‌تری را نسبت به حالت کوانتومی نشان می‌دهد.



شکل ۴. توزیع مکانی تکانه طولی الکترون‌ها در زمان‌های ۴۴۶ fs و ۷۴۳ fs پس از برهم‌کنش الف و ب) در عدم حضور نیروی واکنش تابش، پ و ت) در حضور نیروی واکنش تابش کلاسیکی و ث و ج) در حضور نیروی واکنش تابش کوانتومی به ازای دامنه بی بعد لیزر ۴۰۰ و چگالی پلاسما برابر با ۰٫۲ چگالی بحرانی.

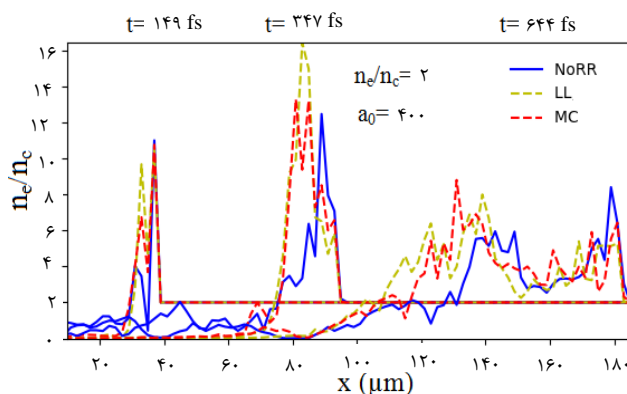


جذب انرژی لیزر در پلاسما به واسطه برانگیزش اختلال پلاسمایی (تأمین انرژی مکانیکی اختلال) و هم‌چنین بازتابش بارهای شتاب گرفته انجام می‌گیرد. در هر دو مورد چگالی اولیه  $0.2$  و  $2$  برابر چگالی بحرانی، در بخشی از زمان برهم‌کنش، جبهه فشرده‌گی پلاسما تقویت می‌شود که در نتیجه انتظار می‌رود در این دوره، سرعت جذب لیزر در پلاسما در طول زمان افزایش یابد. به این ترتیب در دوره مذکور، سرعت افت انرژی الکترومغناطیسی در هر سه حالت NoRR، LL و MC افزایش می‌یابد. این فرایند در نمودار سمت چپ شکل ۵ الف متناظر با بخش کاهشی نمودارهای انرژی الکترومغناطیس است؛ بخش افزایشی مربوط به دوره ورود لیزر به ناحیه پلاسما است. تغییرات انرژی جنبشی الکترونی مشاهده شده در شکل ۵ ب نیز با این تفسیر قابل درک است؛ قبل از این که به واسطه جذب انرژی پالس، شدت آن به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد (فرسایش قابل‌توجه پالس) انرژی جنبشی الکترون‌ها به‌صورت مداوم با افزایش عمق اختلال برانگیخته شده افزایش می‌یابد. این روند افزایشی بعد از فرسایش قابل‌توجه پالس، به‌طور عمده به‌دلیل رقابت جذب انرژی توسط الکترون‌ها با فرایند تبادل انرژی الکترون‌ها با یون‌ها و بازتابش الکترون‌ها متوقف شده و سپس روند کاهشی به خود می‌گیرد؛ به‌عبارتی نوعی اشباع‌شدگی در جذب مؤثر انرژی پالس رخ می‌دهد. در چگالی‌های پایین‌تر (به‌عنوان مثال در  $0.2$  چگالی بحرانی) نیز پدیده اشباع‌شدگی انرژی جنبشی الکترونی با سازوکار ذکر شده، حتی در عدم حضور نیروی واکنش تابش، در زمان‌های طولانی‌تر اتفاق می‌افتد.

در این میان نکته بسیار مهمی که در تفسیر شکل ۳ ب نیز به آن اشاره شد، رخداد اشباع‌شدگی قبل از موعد در چگالی پایین،  $0.2$  چگالی بحرانی، در حضور نیروی واکنش تابش است؛ که اکنون با مقایسه با داده‌های چگالی بالاتر قابل درک است؛ وجود نیروی واکنش تابش باعث می‌شود که ساختار اختلال پلاسمایی از حالت کاواک الکترونی به حالتی شبیه آن چه در چگالی دو برابر بحرانی مشاهده شد، تغییر یابد و به‌واسطه آن فرایند اشباع‌شدگی، مانند آن چه در شکل ۵ مشاهده و تفسیر شد، در این مورد به وجود آید.

از مقدار آن در حضور این پدیده باشد. نمودارهای شکل ۳ ب، که نشان‌دهنده نرخ افزایش انرژی جنبشی الکترون‌ها در حالت NoRR به مقدار قابل‌توجهی بیش‌تر از حالت‌های LL و MC است، مؤید این مطلب می‌باشند. نکته مهمی که در شکل ۳ ب قابل‌مشاهده است این است که در حالت NoRR، انرژی جنبشی الکترونی در بازه زمانی شبیه‌سازی افزایشی است ولی در حضور نیروی واکنش تابش، نرخ افزایش انرژی پس از زمان حدود  $1000$  fs کاهش قابل‌توجهی یافته و به نوعی اشباع‌شدگی نزدیک می‌شود. هم‌چنین تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای در این نمودار به ازای نیروی واکنش کلاسیکی و کوانتومی مشاهده نمی‌شود. تنها در بازه زمانی در محدوده  $1000$  fs، چگالی انرژی جنبشی الکترون‌ها در حالت LL اندکی بیش‌تر از حالت MC است و در زمان‌های بعدی این روند معکوس می‌شود.

برای درک منشأ تفاوت‌های مشاهده شده در نرخ جذب انرژی لیزر در پلاسما، ابتدا به بررسی تأثیر افزایش چگالی الکترونی بر سازوکار واکنش تابش خواهیم پرداخت: در شکل ۴، توزیع چگالی الکترونی در حالت‌های عدم حضور و حضور نیروی واکنش کلاسیکی و کوانتومی به ازای چگالی اولیه پلاسما به اندازه  $2$  برابر چگالی بحرانی پلاسما، دامنه بی‌بعد لیزر برابر  $400$  و زمان‌های مختلف برهم‌کنش رسم شده است. بر خلاف شکل ۱، حتی در حالت NoRR نیز تولید کاواک الکترونی مشاهده نمی‌شود بلکه یک فشرده‌گی الکترونی با ساختار چندقله‌ای در جلو پالس ایجاد شده که همراه با آن منتشر می‌شود.

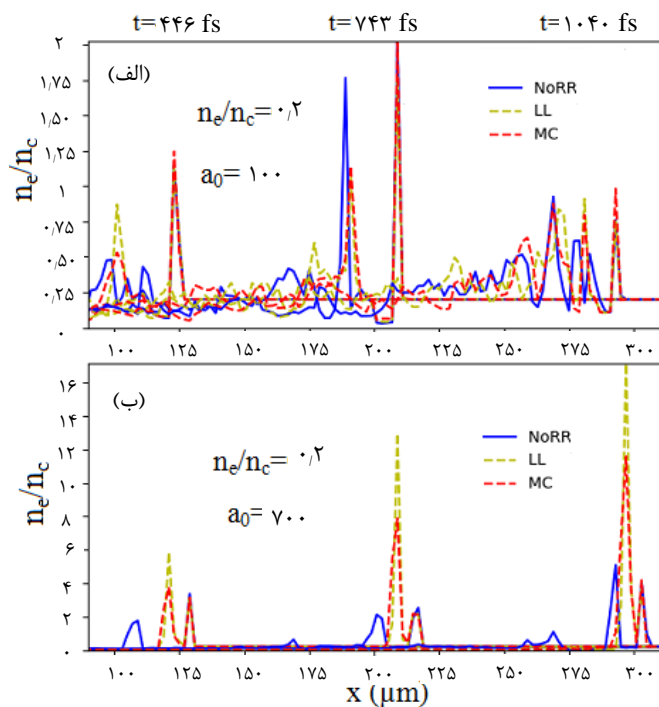


شکل ۴. نمایه چگالی الکترونی در عدم حضور و حضور نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی به ازای دامنه بی‌بعد لیزر  $400$  و چگالی اولیه پلاسمای  $2$  برابر چگالی بحرانی.

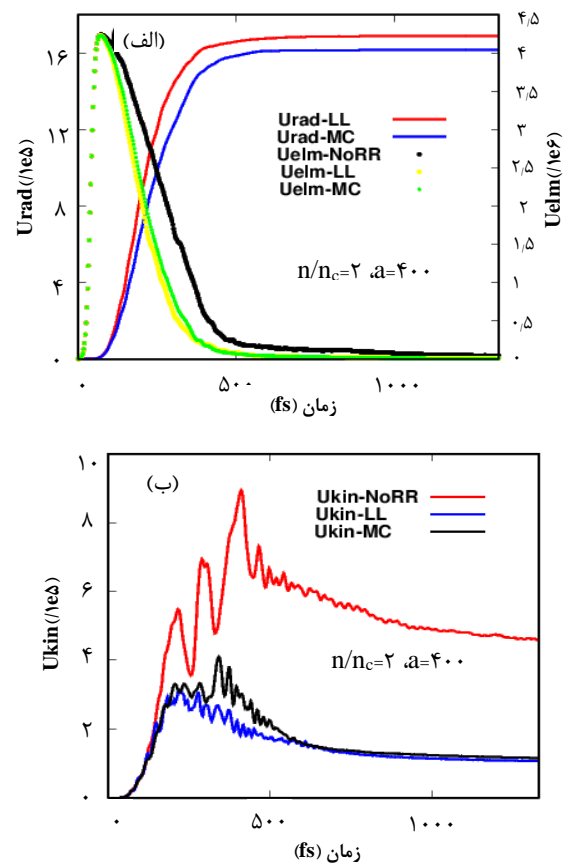


در مرجع [۳۰] نشان داده شده است که در شدت‌های پایین لیزر، تابش سینکروترون<sup>۱</sup> تأثیر قابل توجهی بر انرژی الکترون‌ها در برهم‌کنش لیزر و پلاسما در رژیم حبایی ندارد؛ ولی با افزایش شدت لیزر تا دامنه بی‌بعد بزرگ‌تر از ۱۰۰، واکنش تابش کلاسیکی منجر به افت انرژی الکترون‌ها می‌شود. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تا شدت‌های با دامنه بی‌بعد ۵۱۲، تفاوت قابل ملاحظه‌ای به‌ازای نیروهای واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی وجود ندارد.

پدیده جالب و غیرقابل‌انتظاری به‌ازای شدت بسیار بالای با دامنه بی‌بعد ۷۰۰ رخ می‌دهد و آن تقویت موج پلاسمایی در حضور تصحیحات واکنش تابش است (شکل ۶ ب). رخداد این پدیده به‌طور عمده ناشی از تداخل نیروی LL با نیروی پاندروماتیو لیزر و نیروی بارضا در ایجاد موج پلاسمایی است. در این شدت، تداخل نیروها به‌گونه‌ای است که اولاً مانع از به‌دام‌اندازی الکترون‌ها در زمان‌های اولیه می‌شود و دوماً موج ایجاد شده را در شرایط نزدیک‌تر به تشدید (نسبت به حالت بدون واکنش تابش) ایجاد می‌کند. این موج سپس در طول زمان تقویت می‌شود.



شکل ۶. نمایه چگالی الکترونی در عدم حضور و حضور نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی به‌ازای دامنه‌های بی‌بعد لیزر الف) ۱۰۰ و ب) ۷۰۰ و چگالی اولیه پلاسمای ۰٫۲ برابر چگالی بحرانی.



شکل ۵. انرژی به‌نچار الف) تابشی (ستون سمت چپ) و الکترومغناطیسی (ستون سمت راست) و ب) جنبشی الکترون‌ها برحسب زمان در حالت‌های NoRR، LL و MC به‌ازای دامنه بی‌بعد لیزر ۴۰۰ و چگالی پلاسما دو برابر چگالی بحرانی.

به‌منظور بررسی تأثیر نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی در شدت‌های مختلف لیزر، سازوکار برهم‌کنش در عدم حضور و حضور نیروی واکنش تابش به‌ازای دامنه‌های بی‌بعد لیزر مختلف بررسی گردید. شکل‌های ۶ ب و ۶ الف نمایه چگالی الکترونی را در عدم حضور نیروی واکنش تابش و حضور نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی به‌ازای دامنه‌های بی‌بعد لیزر برابر با ۱۰۰ و ۷۰۰ و چگالی پلاسمای ۰٫۲ برابر چگالی بحرانی در زمان‌های مختلف پس از برهم‌کنش نشان می‌دهند.

به‌ازای دامنه بی‌بعد لیزر برابر ۱۰۰، حضور نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی تفاوت ساختاری در اختلال پلاسمایی القا شده ایجاد نمی‌کند؛ به‌جز این‌که دامنه موج پلاسما برای حالت‌های LL و MC اندکی پایین‌تر است (شکل ۶ الف).

## 1. Synchrotron



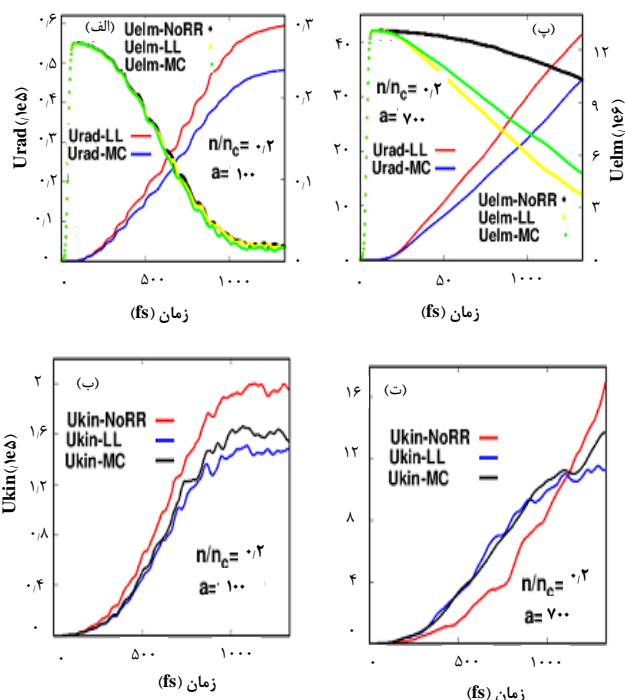
#### ۴. نتیجه‌گیری

تأثیر نیروی‌های واکنش تابش کلاسیکی (LL) و کوانتومی (MC) بر دینامیک پلاسما و میدان‌های الکترومغناطیسی در برهم‌کنش لیزرهای فوق پرتوان در شدت‌های مختلف با پلاسما نزدیک بحرانی در چگالی‌های مختلف بررسی گردید. برای این منظور، از شبیه‌سازی یک‌بعدی با استفاده از کد ذره در سلول Smilei با مدل کلاسیکی لاندائو-لیفشیتز واکنش تابش کلاسیکی و مدل کوانتومی مونت کارلو استفاده گردید.

نتایج ارایه شده در سه پارامتر شدت ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ و دو مقدار چگالی ۰/۲ و ۲ برابر چگالی بحرانی نشان می‌دهند که در شدت‌های نه‌چندان فوق‌نسبیتی (۱۰۰) الگوهای رفتاری سیستم در حضور و عدم حضور واکنش تابش تفاوت‌های اساسی با هم ندارند. به عبارتی واکنش تابش به صورت اختلالی در رفتار سیستم وارد شده و اغلب میزان جذب و دامنه موج پلاسمایی را کاهش می‌دهد. هنگامی که شدت لیزر به طور قابل‌ملاحظه‌ای فوق‌نسبیتی می‌شود (به عنوان مثال شدت‌های بی‌بعد ۴۰۰ و ۷۰۰)، به طور کلی وارد کردن اثرات واکنش تابش باعث افزایش تزریق انرژی پالس به پلاسما خواهد شد. این انرژی تزریق شده یا صرف افزایش انرژی درونی پلاسما شده یا به صورت تابش فوتون‌های غیر نرم به بیرون تلف می‌شود. برای شدت‌های متوسط (۴۰۰) فوق‌نسبیتی، واکنش تابش به طور عمده همانند یک نیروی اتلافی و اصطکاکی نقش ایفا کرده و سبب کاهش انرژی مکانیکی جذب شده توسط پلاسما می‌شود. همچنین بعضی تغییرات الگویی در موج پلاسمایی و اشباع‌شدگی در جذب انرژی پلاسما قابل‌مشاهده است. در شدت‌های بسیار بالا (دامنه بی‌بعد ۷۰۰)، شدت نیروی واکنش تابش به اندازه‌ای است که برهم‌نهی آن با نیروی پاندرموتیو می‌تواند به گونه‌ای منجر به اصلاح ساختار موج پلاسمایی شود که با نیروی فرسایش حاصل نیز مقابله کرده و منجر به افزایش جذب انرژی لیزر در پلاسما شود که پدیده بسیار جالبی است.

تفسیرهای فوق در انطباق کامل با نتایج شکل ۷، که تحولات زمانی انرژی الکترومغناطیسی، جذبی و تابشی را در شدت‌های ۱۰۰ و ۷۰۰ نشان می‌دهد، می‌باشند: از آنجا که فرایند اصلی جذب انرژی پالس به وسیله ایجاد و گسترش موج پلاسمایی است، انتظار می‌رود در پارامتر شدت ۱۰۰، شکل‌های ۷ الف و ۷ ب، جذب انرژی الکترومغناطیسی با الگوی یکسان در حضور و عدم حضور واکنش تابش اتفاق افتد. البته در حالت بدون واکنش تابش، به دلیل ایجاد موج قوی‌تر جذب بیشتر است. همچنین میزان تابش منجر به واکنش در حالت کلاسیک بیشتر است.

برخلاف رفتار فوق، در شدت بسیار بالای با دامنه بی‌بعد ۷۰۰، در بیش‌تر زمان اندرکنش آهنگ جذب لیزر به دلیل بالاتر بودن دامنه موج، در حضور واکنش تابش بالاتر است تا این که بعد از مدت زمان طولانی به دلیل فرسایش سریع‌تر پالس و گسیل تابش، این جذب به نوعی اشباع‌شدگی می‌رسد (شکل‌های ۷ پ و ۷ ت).



شکل ۷. انرژی‌های بهنجار الف) تابشی (ستون سمت چپ) و الکترومغناطیسی (ستون سمت راست) و ب) جنبشی الکترون‌ها به‌ازای دامنه بی‌بعد لیزر ۱۰۰ و چگالی پلاسما برابر با ۰/۲ برابر چگالی بحرانی و پ) به‌ازای دامنه بی‌بعد لیزر ۷۰۰ و چگالی پلاسما برابر با ۰/۲ برابر چگالی بحرانی، برحسب زمان در حالت‌های LL، NoRR و MC.





## مراجع

- J. Jackson, *Classical electrodynamics*, 3rd ed. (Wiley, 1998).
- I.V. Sokolov, *Emission and its back-reaction accompanying electron motion in relativistically strong and QED-strong pulsed laser fields*, *Physical Review E*. **81**, 036412 (2010).
- Exawatt Center for Extreme Light Studies, [www.xcels.iapras.ru](http://www.xcels.iapras.ru).
- V. Yanovsky, et al., *Ultra-high intensity-300-TW laser at 0.1 Hz repetition rate*, *Opt. Express* **16**, 2109 (2008).
- Extreme Light Infrastructure European Project, [www.eli-laser.eu](http://www.eli-laser.eu).
- B. Cros, et al., *Laser plasma acceleration of electrons with multi-PW laser beams in the frame of CILEX*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. **740**, 27-33 (2014).
- SULF, <http://siom.cas.cn>.
- M. Pishdast, J. Yazdanpanah, *High-energy photon emission and radiation reaction effects in the ultra-high intensity laser bubble regime*, *Physica Scripta*. **94**, (2019).
- J. Koga, et al., *Nonlinear Thomson scattering in the strong radiation damping regime*. *Physics of Plasmas*, **12**, 093106 (2005).
- F. Niel, et al. *From quantum to classical modeling of radiation reaction: a focus on the radiation spectrum*, *Plasma Phys. Control. Fusion*. **60**, 094002 (9pp) (2018).
- M. Tamburini, et al. *Radiation reaction effects on radiation pressure acceleration*, *New J. Phys.* **12**, 123005 (2010).
- T. Blackburn, et al. *Quantum radiation reaction in laser-electron-beam collisions*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 015001 (2014).
- J.L. Martins, et al, *Modelling radiation emission in the transition from the classical to the quantum regime*, *Plasma Phys. Control. Fusion*. **58**, 014035 (2016).
- W. Yitong, et al. *Effects of radiation reaction on laser proton acceleration in the bubble regime*, *Physics of Plasmas*. **25**, 093101 (2018).
- E. Wallin, et. al, *Ultra intense laser pulses in near-critical underdense plasmas-radiation reaction and energy partitioning*, *J. Plasma Phys.* **83**, 905830208 (2017).
- L.L. Ji, et al, *Radiation-Reaction Trapping of Electrons in Extreme Laser Fields*, *Physical Review Letters*. **112**, 145003 (2014).
- X.L. Zhu, et al. *Enhanced electron trapping and  $\gamma$  ray emission by ultra-intense laser irradiating a near-critical-density plasma filled gold cone*, *New J. Phys.* **17**, 053039 (2015).
- M. Pishdast, J. Yazdanpanah, S.A. Ghasemi. *The effect of laser polarization on radiation reaction trapping of the electrons in ultra high power laser interaction with rarified plasma*, Accepted Manuscript, *Journal of Nuclear Science and Technology* (In Persian).
- L.D. Landau, E.M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields*, (Butterworth-Heinemann, Oxford, 1947).
- F. Niel, et.al, *From quantum to classical modeling of radiation reaction: A focus on stochasticity effects*, *Physical Review E*. **97**, 043209 (2018).
- A.D. Piazza, et al. *Extremely high-intensity laser interactions with fundamental quantum systems*, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1177 (2012).
- C.P. Ridgers, *Modelling gamma-ray photon emission and pair production in high-intensity laser-matter interactions*, *Journal of Computational Physics*. **260**, 273–285 (2014).
- R. Duclous, J.G. Kirk, A.R. Bell, *Monte Carlo calculations of pair production in high-intensity laser-plasma interactions*, *Plasma Phys. Controlled Fusion*. **53**, 015009 (2011).
- M. Lobet, et al. *Modeling of radiative and quantum electrodynamics effects in PIC simulations of ultra-relativistic laser-plasma interaction*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **688**, 012058 (2016).
- T.D. Arber, et al. *Contemporary particle-in-cell approach to laser-plasma modeling*, *Plasma Phys. Control. Fusion*. **57**, 113001 (26pp) (2015).
- <https://smileipic.github.io/Smilei/index.html>.
- J. Derouillat, et al. *SMILEI: a collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation*, *Comput. Phys. Commun.* **222**, 351-373 (2018).
- C.P. Ridgers, *Signatures of quantum effects on radiation reaction in laser-electron-beam collisions*, *J. Plasma Phys.* **83**, 715830502 (2017).
- T.G. Blackburn, *Radiation reaction in electron-beam interactions with high-intensity lasers*, *Reviews of Modern Plasma Physics*. **4**, 1-37 (2020).
- O. Jansen, T. Tuckmantel, A. Pukhov, *Scaling electron acceleration in the bubble regime for upcoming lasers*, *Eur. Phys. J. Special Topics*. **223**, 1017–1030 (2014).
- J. Yazdanpanah, *Nonlinear evolutions of an ultra-intense ultra-short laser pulse in a rarefied plasma through a new quasi-static theory*, *Plasma Phys. Control. Fusion*. **60**, 025014 (2018).
- J. Yazdanpanah, *Self modulation and scattering instability of a relativistic short laser pulse in an underdense plasma*, *Plasma Phys. Control. Fusion*. **61**, 085021 (2019).

## استناد به این مقاله

حسن حسین خانی، مسعود پیشدست، جمال‌الدین یزدان‌پناه، سید ابولفضل قاسمی (۱۴۰۰)، بررسی تأثیر نیروی واکنش تابش کلاسیکی و کوانتومی بر برهم‌کنش لیزر فوق پرتوان با پلاسمای نزدیک بحرانی، ۹۶، ۲۷-۳۵

DOI: 10.24200/nst.2021.1197

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1197.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1197.html)

