

## نیروی وارد بر نانوکرات پلاسمایی تحت تابش محوری پرتوهای گاوسی

فاطمه خسروی<sup>\*</sup>، بهرام جزی، عباس عبدلی آرانی، سعیده گلهرانی

گروه لیزر و فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان

کلید واژه: پرتو گاوسی، نانو کره پلاسمایی، نظریه تعمیم یافته لورنتس-مای

## چکیده

در این مقاله، بر اساس نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک، میانگین نیروی وارد بر نانو کره پلاسمایی در حضور پرتوی لیزر با مشخصات گاوسی بررسی می‌شود. برای این منظور، یک مدل ریاضی ارائه و پروفایل توزیع میدان‌های الکتریکی در داخل کره و تابع چگالی نیروی وارده بر هر المان از کره مذکور محاسبه خواهد شد. دیاگرام‌های تغییرات نیروی متوسط وارد بر نانو کره بر حسب پهنای فضایی لیزر، مختصات نسبی نقطه‌ی خروج بیم لیزر از مولد تا مرکز کره، تراکم و شعاع نانو کره ارائه خواهند گردید. این محاسبات برای کرات پلاسمایی در تقریب پلاسما سرد به انجام خواهد رسید.

## The average force exerted on the plasma nano-sphere axially radiated by a laser beam with Gaussian profile

Fatemeh Khosravi<sup>\*</sup>, Bahram Jazi, Abbas Abdoli Arani, Saeedeh Golharani

Department of Laser and Photonics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan

[jaziada@kashanu.ac.ir](mailto:jaziada@kashanu.ac.ir)   [abdoliabbas@kashanu.ac.ir](mailto:abdoliabbas@kashanu.ac.ir)   [saeedeh.golharani@yahoo.com](mailto:saeedeh.golharani@yahoo.com)<sup>\*</sup>corresponding e-mail: [Fatemeh.Khosravi1384@gmail.com](mailto:Fatemeh.Khosravi1384@gmail.com)

## Abstract

In this paper, based on the classical electromagnetic theory, the average force acting on a plasma nano-sphere are investigated in the presence of a laser beam with Gaussian profile. For this purpose, a mathematical model will be presented. The distribution of electric field profile inside the sphere and the force density function inserted on each element of the sphere will be calculated. Diagrams of variations of the average force exerted on the plasma sphere will be presented in terms of the laser spatial width, the relative coordinates of exit point of the beam from laser cavity generator to the center of the sphere, density and radius of the plasma nano-sphere. The calculations will be accomplished for a plasma sphere in cold plasma approximation.

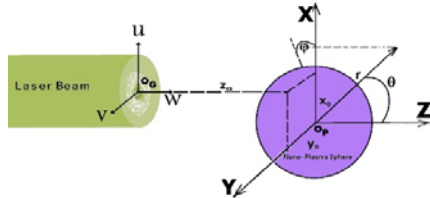
**Keywords:** Gaussian laser beam, Nano-plasma sphere, Generalized Lorenz-Mie theory (GLMT)

## مقدمه

بر نانوکرات تحت تابش حائز اهمیت است. تغییرات زمانی در هر یک از مقادیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر اساس مجموعه معادلات کامل ماکسول، منجر به وجود آمدن تغییرات مکانی در تابع تغییرات هر یک از میدان‌های الکتریکی و یا مغناطیسی خواهد گردید [۵]. تابع تغییرات زمانی و تغییرات مکانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، در یک الگوی انتشار به صورت موجی خود را نشان خواهند داد که کلیه ویژگی‌های آن، تابع محیطی است که این موج الکترومغناطیسی در آن انتشار می‌یابد [۶]. میزان ناهمگنی فضایی در یک الگوی انتشار برای امواج الکترومغناطیسی می‌تواند هم در مقدار

دستکاری نوری از قبیل خنک‌سازی نوری، حبس نوری، اتصال، مرتب‌سازی و انتقال با استفاده از نیروهای نوری در چهار دهه اخیر رشد فزاینده‌ای داشته است. لذا انبرک‌های نوری به عنوان یک وسیله‌ی منحصر به فرد کنترل دینامیکی غیر تهاجمی ذرات در محدوده اندازه‌های ده‌ها نانومتر تا ده‌ها میکرومتر، مانند باکتری‌ها، ویروس‌ها، سلول‌های زنده و مولکول‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴-۱]. چنانکه گفته شد حبس نوری کاربرد نیروی تابشی را برای دستکاری ذرات نشان می‌دهد، در این راستا اطلاع از ناهمگنی مکانی در دامنه‌ی امواج جهت تعیین متوسط نیروی وارد

مختصات دکارتی  $O_GUVW$  انتخاب می‌شود.  $O_{GW}$  محور پرتو است و  $O_G$  در مرکز کمره پرتو قرار دارد. مختصات  $O_G$  در سیستم  $(O_PXYZ)$  ،  $(x_0, y_0, z_0)$  می‌باشد. پرتو در امتداد مثبت  $w$  انتشار می‌یابد و مؤلفه میدان الکتریکی در صفحه  $(uO_{GW})$  در حال ارتعاش است.



شکل ۱: پیکربندی هندسی (پرتو لیزر- کره پلاسمایی- مختصات سیستم)

نظریه تعمیم یافته‌ی لورنتس- مای (GLMTs) به طور کلی جهت تعیین اندرکنش بین پرتوهای الکترومغناطیسی با شکل دلخواه و ذرات منظم مورد استفاده قرار می‌گیرد که با استفاده از روش برومیچ بنا نهاده شده است [۱۵]. در این فرمول‌بندی، به جای برخورد با معادله‌ی موج می‌توان با معادله‌ی پتانسیل اسکالر برومیچ روبه‌رو بود. بنابراین، هر موج با پتانسیل اسکالر برومیچ  $U_{TM}$  و  $U_{TE}$  تعیین می‌گردد که برای موج تابشی بدین صورت یافته می‌شوند:

$$U_{TM}^i = (E_0 / k) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_n^{pw} g_{n, TM}^m \psi_n(kr) P_n^{|m|}(\cos \theta) e^{im\phi} \quad (1)$$

$$U_{TE}^i = (H_0 / k) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_n^{pw} g_{n, TE}^m \psi_n(kr) P_n^{|m|}(\cos \theta) e^{im\phi}$$

که در آن  $E_0$  و  $H_0$  دامنه‌های میدان هستند،  $k$  و  $\mu$  عدد موج و ضریب تراوایی فضای آزاد،  $\psi_n$  تابع ریگاتی- بسط و  $P_n^{|m|}$  تابع لژاندر وابسته می‌باشند. ضرایب  $c_n^{pw}$  هم بدین صورت تعریف می‌گردند:

$$c_n^{pw} = \frac{1}{ik} (-i)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \quad n=1,2,3,\dots \text{ and } -n < m < n \quad (2)$$

ضرایب  $g_{n, TE}^m$  و  $g_{n, TM}^m$  ضرایب شکل پرتو نامگذاری شده‌اند که تنها به ساختار پرتو تحت مطالعه با شکل دلخواه بستگی دارند. تمام مؤلفه‌های میدان را می‌توان با استفاده از عملگرهای دیفرانسیلی بر روی پتانسیل اسکالر برومیچ استنتاج کرد. در نتیجه، میدان‌های الکتریکی در داخل کره پلاسمایی به این ترتیب حاصل می‌شوند:

$$E_r = k E_0 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_n^{pw} C_n^m [\psi_n''(k_{sp}r) + \psi_n(k_{sp}r)] P_n^{|m|}(\cos \theta) \exp(im\phi) \quad (3)$$

$$E_\theta = \frac{E_0}{r} \frac{k}{k_{sp}} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_n^{pw} \exp(im\phi) \times \left\{ C_n^m \psi_n'(k_{sp}r) \tau_n^{|m|}(\cos \theta) + \frac{\mu_{sp}}{\mu} \frac{k}{k_{sp}} m D_n^m \psi_n(k_{sp}r) \pi_n^{|m|}(\cos \theta) \right\} \quad (4)$$

دامنه‌ی میدان و هم ثابت انتشار آن موج به صورت تابعی از مکان ظاهر گردد. این ناهمگنی مکانی که در دامنه‌ی امواج ظاهر می‌گردد عامل اصلی در بوجود آمدن نیروی وارد شده بر اجسامی است که با این امواج در تبادلات انرژی قرار گرفته‌اند و تحت تابش آن‌ها واقع شده‌اند [۷].

با توجه به متوسط زمانی ممتوم دریافت شده‌ی اجسام از طرف امواج الکترومغناطیسی در نظریه الکترومغناطیس کلاسیکی، دانستن تابع تغییرات مکانی مؤلفه‌های میدان الکتریکی و همچنین اطلاع از تانسورگذردهی الکتریکی محیط امری ضروری می‌باشد. از طرف دیگر در تحقیقات اخیر در خصوص تولید نانو ساختارهای هادی پیشرفت‌های قابل توجهی صورت پذیرفته است [۸-۱۰]. از آنجا که ابعاد و اجرام کرات حاصل شده در این آزمایشات بسیار کوچک می‌باشند [۱۱ و ۱۲]، لذا فرآیند کنترل هدفمند دینامیک وارد بر نانوکرات برای غرباگری و یا تولید چیدمان منظمی از آن‌ها، با توجه به حرکات کاتوره‌ای ذرات مجاور کار آسانی نمی‌تواند باشد [۱۳]. به نظر می‌رسد یکی از راهکارها برای کنترل هدفمند دینامیک وارد بر نانوذرات کروی، استفاده از امواج الکترومغناطیسی‌ای می‌باشد که دارای ناهمسانگردی متناسب با ابعاد این نانوذرات باشد.

در این مقاله نیروی وارد شده بر یک نانو کره‌ی هادی که با یک نانو کره‌ی پلاسمایی مدل گردیده و تحت تابش یک باریکه‌ی لیزری با پروفایل گاوسی قرار دارد، بررسی خواهد شد.

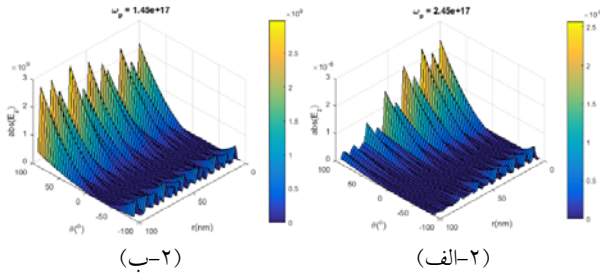
این مقاله در چهار بخش تنظیم شده است که مقدمه به عنوان بخش اول ارائه شد. در بخش دوم یک شمای کلی از پیکربندی هندسی و الگوی ریاضی حاکم بر پروفایل میدان‌های الکتریکی برای یک موج گاوسی معرفی خواهد گردید. در بخش سوم نمودارهای تغییرات مقدار متوسط نیروی وارد بر نانو کره‌ی پلاسمایی بر حسب تغییرات پارامترهای اصلی مسأله مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری به عنوان بخش چهارم ارائه خواهد شد.

## پیکربندی هندسی و معادلات نظری حاکم

چنان که در شکل ۱ نشان داده شده است یک پرتو گاوسی در یک محیط خطی، ایزوتروپیک، غیرجاذب با گذرده‌ی  $\epsilon$  و تراوایی  $\mu$  انتشار می‌یابد. مرکز پراکندگی یک ذره کروی می‌باشد که در نقطه  $O_P$  سیستم مختصات دکارتی  $O_PXYZ$  است. موج تابشی در سیستم

$$\tilde{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix}, \quad \epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = 1 - (\omega_p / \omega)^2 \quad (10)$$

هنگامی که موج الکترومغناطیسی وارد ماده می‌شود، مشاهده می‌گردد که میدان الکتریکی یک غیریکنواختی دوره‌ای داخل کره پیدا می‌کند و تمایل به جذب یا دفع چگالی بارهای سطحی در نقطه ورودی یا خروجی دارد، در نتیجه نیرو ظاهر خواهد شد.



شکل ۲. شدت میدان الکتریکی داخل کره در امتداد محور  $z$  نسبت به شعاع و زاویه قطبی ( $\theta$ ) (الف) محیط شفاف (ب) غیرشفاف.

شکل ۲ منحنی‌های شدت میدان الکتریکی داخل کره را در امتداد محور  $z$  نسبت به شعاع و زاویه قطبی ( $\theta$ ) در محیط‌های شفاف و غیرشفاف نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌گردد، شدت میدان الکتریکی با افزایش شعاع و زاویه قطبی، به صورت تناوبی و دوره‌ای تغییر می‌کند. همچنین شدت میدان الکتریکی برای محیط شفاف بزرگتر از آن برای محیط غیرشفاف است. زیرا موج نمی‌تواند وارد محیط غیرشفاف شود و باعث تشدید گردد. شکل ۳ منحنی نیروی وارد بر کره در امتداد محور  $z$  نسبت به فرکانس پلاسمایی و تأثیر تغییر شعاع کره را نمایش می‌دهد. برای هر دو شعاع، نیرو رفتاری تناوبی دارد. شکل ۴ اثر تغییر طول موج پرتو گاوسی بر نیروی وارد به کره در امتداد محور  $z$  نسبت به فرکانس پلاسمایی را نمایش می‌دهد. با افزایش طول موج، نیرو بزرگتر می‌شود. شکل ۵ تأثیر تغییر شعاع کمره پرتو گاوسی بر نیروی وارد بر کره در امتداد محور  $z$  نسبت به فرکانس پلاسمایی را بررسی می‌کند. ملاحظه می‌شود که در محدوده فرکانس پلاسمایی مورد نظر، مقادیر نیرو با افزایش شعاع کمره پرتو، کاهش می‌یابد. طبق سیستم مختصات دکارتی ( $O_Gxyz$ ) متصل به پرتو و سیستم مختصات دکارتی ( $O_Pxyz$ ) متصل به ذره، فاصله بین  $O_G$  و  $O_P$  برابر  $z_0$  است. شکل ۶ اثر تغییر  $z_0$  بر نیروی وارد شده به کره در امتداد محور  $z$  نسبت به فرکانس

$$E_\phi = \frac{i E_0 k}{r k_{sp}} \sum_{n=1}^{n_{max}} \sum_{m=-n}^n c_n^{pm} \exp(im\phi) \times \left\{ m C_n^m \psi_n'(k_{sp}r) \pi_n^{|m|}(\cos\theta) + \frac{\mu_{sp}}{\mu} \frac{k}{k_{sp}} D_n^m \psi_n(k_{sp}r) \tau_n^{|m|}(\cos\theta) \right\} \quad (5)$$

که  $k_{sp}$  و  $\mu_{sp}$  به ترتیب عدد موج و ضریب تراوایی ماده داخل کره،  $\psi_n'(x)$  و  $\psi_n''(x)$  مشتقات اول و دوم نسبت به آرگومان داخل پراونز،  $\tau_n^m(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos\theta)$  و  $\pi_n^m(\cos\theta) = \frac{P_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta}$  می‌باشند.  $D_n^m$ ،  $C_n^m$  ضرایب مجهولی از  $g_{n,TE}^m$  و  $g_{n,TM}^m$  ها هستند که با اعمال شرایط مرزی روی سطح کره محاسبه می‌گردند.

برای جابجایی بارها، وقتی بار کل صفر است، اجسام باید در یک میدان غیر یکنواخت قرار گیرند. بنابراین اگر میدان الکتریکی تابعی از مکان شود، بر اجسام نیرو وارد می‌گردد. در نتیجه چگالی نیروی وارد بر یک نانو کره‌ی هادی (که با یک نانو کره‌ی پلاسمایی مدل گردیده) تحت تابش یک باریکه‌ی لیزری با پروفایل گاوسی بدین صورت بدست می‌آیند:

$$F_x = -\frac{\omega_p^2}{4\pi\omega^2} \int_0^{r(radius)} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi \times \left\{ \sin\theta \cos\phi \frac{\partial E_T}{\partial r} + \frac{\cos\theta \cos\phi}{r} \frac{\partial E_T}{\partial \theta} - \frac{\sin\phi}{r \sin\theta} \frac{\partial E_T}{\partial \phi} \right\} \quad (6)$$

$$F_y = -\frac{\omega_p^2}{4\pi\omega^2} \int_0^{r(radius)} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi \times \left\{ \sin\theta \sin\phi \frac{\partial E_T}{\partial r} + \frac{\cos\theta \sin\phi}{r} \frac{\partial E_T}{\partial \theta} + \frac{\cos\phi}{r \sin\theta} \frac{\partial E_T}{\partial \phi} \right\} \quad (7)$$

$$F_z = -\frac{\omega_p^2}{4\pi\omega^2} \int_0^{r(radius)} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi \times \left\{ \cos\theta \frac{\partial E_T}{\partial r} - \frac{\sin\theta}{r} \frac{\partial E_T}{\partial \theta} \right\} \quad (8)$$

$$E_T = E_r^* E_r + E_\theta^* E_\theta + E_\phi^* E_\phi \quad (9)$$

## نتایج عددی

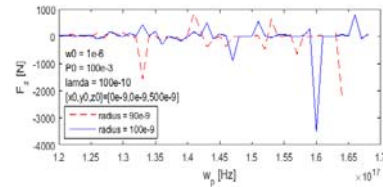
در این بخش، نمودارهای شدت میدان الکتریکی و نیروی وارد بر نانو کره پلاسمایی ارائه می‌گردد. این کره دارای شعاع  $100 \text{ nm}$  می‌باشد که در مرکز یک سیستم مختصات کروی واقع شده است.  $\omega$  و  $\omega_p$  فرکانس پلاسمایی و فرکانس پرتو لیزر می‌باشند. پرتو گاوسی با طول موج  $100 \text{ \AA}$  و شعاع کمره پرتو  $1 \mu\text{m}$  در محیط انتشار می‌یابد. در این مقاله، از لیزر الکترون آزاد با توان  $100 \text{ mw}$  استفاده شده است. مختصات  $O_G$  در سیستم ( $O_Pxyz$ ) به صورت  $(0, 0, 500 \text{ nm})$  فرض می‌شود. ضریب دی الکتریک برابر است با:

یا آن را از لیزر دور کرد. با توجه به چگالی بارهای قطبشی متفاوت و موقعیت های مختلف، نیرو و توزیع میدان الکتریکی می تواند متفاوت باشند. بنابراین نمودارهای آن ها دارای تناوب هستند.

### منابع

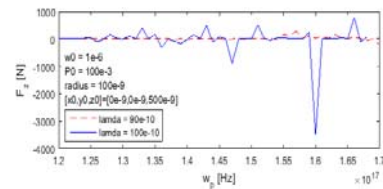
- [۱] Zhong M. C., Wei X. B., Zhou J. H., Wang Z. Q., Li Y. M. (2013). Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers. *Nature Communications*, 4.
- [۲] Juan M. L., Righini M., Quidant R. (2011). Plasmon nano-optical tweezers. *Nature Photonics*, 5, 349–356.
- [۳] Greulich K. O. (1999). *Micromanipulation by Light in Biology and Medicine: The Laser Microbeam and Optical Tweezers*. Springer.
- [۴] Wu Y., Sun D., Huang W. (2011). Mechanical force characterization in manipulating live cells with optical tweezers. *Journal of Biomechanics*, 44(4), 741-746.
- [۵] Sheffield J., Froula D., Glenzer S. H., Luhmann N. C., Jr. (2011). *Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation: Theory and Measurement Techniques*, 2nd Edition. Elsevier Inc.
- [۶] Ishimaru A. (2017). *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering: from fundamentals to applications*, 1st Edition. John Wiley & Sons Inc.
- [۷] Rukhadze A. A., Alexandrov A. F., Bogdankevich L. S. (2013). *Principles of Plasma Electrodynamics*, 2nd Edition. Moscow: Urss.
- [۸] Dreaden E. C., Alkilany A. M., Huang X., Murphy C. J., El-Sayed M. A. (2012). The golden age: gold nanoparticles for biomedicine. *Chem. Soc. Rev.*, 41, 2740–2779.
- [۹] Eftekhari A. (2011). *Nanostructured Conductive Polymers*. John Wiley & Sons Ltd.
- [۱۰] Zhang L., Du W., Nautiyal A., Liu Z., Zhang X., (2018). Recent progress on nanostructured conducting polymers and composites: synthesis, application and future aspects. *Science China Materials*, 61(3), 303–352.
- [۱۱] Maugi R. et. al. (2020). A methodology for characterising nanoparticle size and shape using nanopores. *Nanoscale*, 12(1), 262-270.
- [۱۲] Colson P., Henrist C., Cloots R. (2013). Nanosphere Lithography: A Powerful Method for the Controlled Manufacturing of Nanomaterials. *Journal of Nanomaterials*, 21.
- [۱۳] Kalantar-zadeh K., Fry B. (2008). *Nanotechnology-Enabled Sensors*. Springer.
- [۱۴] Gouesbet G., Gréhan G. (2011). *Generalized Lorenz-Mie Theories*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

پلاسمایی را نشان می دهد که با افزایش  $z_0$ ، مقدار نیرو کاهش یافته است.



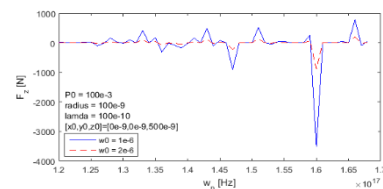
شکل ۳. تأثیر تغییر شعاع

بر نیروی وارد به کره در امتداد محور  $Z$  نسبت به فرکانس پلاسمایی



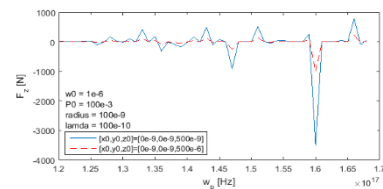
شکل ۴. تأثیر تغییر طول موج

بر نیروی وارد به کره در امتداد محور  $Z$  نسبت به فرکانس پلاسمایی



شکل ۵. تأثیر تغییر شعاع کمره پرتو

بر نیروی وارد به کره در امتداد محور  $Z$  نسبت به فرکانس پلاسمایی



شکل ۶. تأثیر تغییر  $z_0$

بر نیروی وارد به کره در امتداد محور  $Z$  نسبت به فرکانس پلاسمایی

### نتیجه گیری

در این مقاله، میانگین نیروی وارد بر نانوکره پلاسمایی در حضور پرتوی لیزر با پروفایل گاوسی بررسی شد. در همین راستا، یک مدل ریاضی پیشنهاد شد. همچنین، نمودارهای تغییرات شدت میدان الکتریکی و میانگین نیروی وارد بر نانوکره پلاسمایی بر حسب پارامترهای اساسی ارائه گردید. چنان که مشاهده شد اگر میدان الکتریکی تابعی از مکان باشد، به محیط پلاسمای نیرو وارد می شود. بنابراین می توان با تاباندن لیزر به جسم، آن را به سمت لیزر کشید و