بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

مطالعه نظری اثر روغن غوطه‌وری در تله اندازی هواویزها

ابراهیم مددی[۱] و سید نادر سید ریحانی[۲]

[۱]دانشگاه صنعتی بویین زهرا، بویین زهرا، استان قزوین

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده – تله اندازی هواویزها با استفاده از انبرک نوری برای مطالعه خواص فیزیکی و شیمیایی آنها دارای اهمیت است. در این مقاله تله اندازی هواویزهای جامد و مایع بصورت نظری و با استفاده از روش لورنز- می تعمیم یافته مطالعه شده است. اثر محیط غوطه‌وری در تله اندازی این ذرات بر حسب عمق محیط نمونه بررسی شده و نشان داده شده است که با 0.02 تغییر در ضریب شکست روغن غوطه‌وری عمق بهینه تقریبا ۲ میکرون به نقاط عمیق‌تر منتقل می‌گردد. نتایج بدست آمده با نتایج موجود تجربی سازگار است.

کلید واژه- انبرک نوری، هواویز، روش لورنز- می، روغن غوطه‌وری.

Theoretical study of effect of immersion oil in aerosol trapping

Ebrahim Madadi[1] and S. Nader S. Reihani[2]

[1]Technical university of Buin Zahra, Buin Zahra, Qazvin Province

[2]Department of Physics, Sharif university of technology, Tehran

Abstract- Trapping of single aerosol by using optical tweezers is very important to investigate its physical and chemical properties. In this letter, optical trapping of single solid and liquid aerosols are investigated theoretically by using generalized Lorenz-Mie theory. The effect of immersion oil versus depth of trapping is investigated and it is shown that by 0.02 changes in refractive index of immersion oil, the optimum depth shifts about 2 micron to the deeper positions. Our results are in agreement with existed experimental result.

Keywords: Optical tweezers, Aerosol, Generalized Lorenz-Mie theory, Immersion oil.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

انبرک نوری[۱] ابزاری است که توسط آن بدون تماس مکانیکی به ذرات میکرومتری و نانومتری نیرو وارد می‌شود. امروزه این ابزار کاربردهای فراوانی در فیزیک[۲]، شیمی[۳] و نانوتکنولوژی[۴] پیدا کرده است. انبرک نوری باریکه لیزری است که توسط یک عدسی شیئی با گشودگی عددی ($NA=nSin\theta$ ، n ضریب شکست روغن پشت عدسی شیئی است و θ نیم زاویه راس مخروطی است که از کانون دیده می‌شود.) بالا به شدت کانونی شده است. به ذرات میکرومتری و نانومتری که ضریب شکست آنها از محیط بزرگتر است نیرویی از نوع هوک ($F=-k\chi$) وارد می‌شود. قدرت تله با ضریب سختی فنر (k) مشخص می‌شود.

هواویزها ذرات معلق در هوا هستند. بدلیل تاثیر این ذرات در آب و هوا، بررسی این ذرات از اهمیت فراوانی برخوردار است. امروزه گروه‌های متعددی در نقاط مختلف دنیا از انبرک نوری برای تله اندازی و بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی این هواویزها استفاده می‌کنند[۵].

بدلیل وجود ابیراهی کروی ناشی از اختلاف ضریب شکست محیط‌های مختلف در مسیر باریکه کانونی و حرکت براوونی شدید این ذرات در مقایسه با محیط مایع تله اندازی هواویزها بسیار دشوار است. تله‌اندازی این ذرات در عمق‌های بیشتر به مراتب دشوارتر است چون با حرکت به عمق (فاصله سطح لامل با کانون) ابیراهی کروی بیشتر می شود. یکی از روش‌های پیشنهادی برای تله‌اندازی بهینه هواویزها در عمق‌های بیشتر با تعویض روغن غوطه‌وری پشت عدسی شیئی امکان‌پذیر است[۶]. این شیوه به طور تجربی برای اندازه‌گیری قدرت تله هواویزها مورد استفاده قرار گرفته است[۷].

در این مقاله با استفاده از روش لورنز- می تعمیم یافته نیروی وارد بر ذرات تله‌اندازی شده جامد و قطرات آب محاسبه شده و اثر تغییر روغن غوطه‌وری مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه می‌گردند. نتایج نشان می‌دهند که در مورد قطرات آب با اندازه $1\mu m$ با تغییر 0.02 در ضریب شکست عمق بهینه تله اندازی این ذرات به اندازه $2-3\mu m$ به سمت عمق‌های بیشتر منتقل می‌شوند که با داده‌های آزمایشگاهی موجود در توافق هستند[۷].

۲- محاسبات نظری بر پایه روش لورنز-می تعمیم یافته

در انبرک نوری باریکه لیزر با مد TEM_{00} پس از عبور از عدسی شیئی، روغن غوطه‌وری، لامل در محیط نمونه کانونی می‌شود. میدان الکتریکی در ناحیه کانون با استفاده از روش طیف زاویه‌ای[۸] بدست می‌آید:

$$\vec{E}(\vec{r})=\frac{ik_1 f}{2\pi}e^{-ik_1 f}E_0\sqrt{\frac{1}{n_1}}\int_0^{\alpha}\int_0^{2\pi}d\theta_1 d\phi\sin\theta_1$$
$$\sqrt{\cos\theta_1}\exp(-\frac{1}{f_0^2}\frac{\sin^2\theta_1}{\sin^2\alpha})$$
$$\exp(i(\psi_1+\psi_2))\sum_{\eta=1}^{2}c_\eta t_\eta \hat{u}_{4\eta}e^{i\vec{k}_4.\vec{r}} \qquad (1)$$

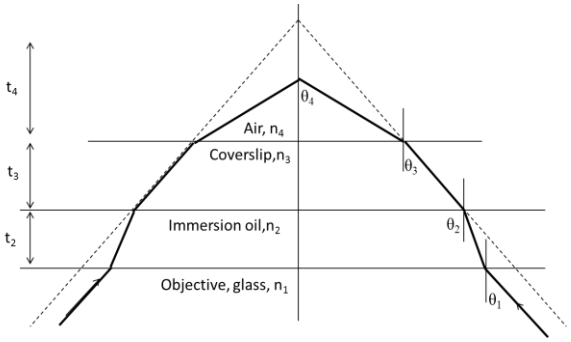
در رابطه فوق $\hat{u}_{4,1}=\hat{n}_\phi,\hat{u}_{4,2}=\hat{n}_{\theta_4}$ و $c_1=-\sin\phi,c_2=\cos\phi$ هستند. $\hat{n}_\phi$ و $\hat{n}_\theta$ بترتیب بردارهای واحد سمتی و قطبی دستگاه مختصات کروی هستند که مبدا آن در کانون گاوسی است. t_1 و t_2 به ترتیب ضرایب عبور فرنل برای حالت‌های قطبشی s و p سه مرز متوالی شیشه-روغن، روغن-شیشه و شیشه-هوا هستند و از حاصل ضرب ضرایب فرنل سه مرز متوالی ذکر شده بدست می‌آیند. α نیم زاویه جمع کنندگی پرتوها توسط عدسی شیئی است. $f_0=w_0/(f\sin\alpha)$ ضریب پرکنندگی پشت عدسی شیئی، w_0 کمر باریکه در دهانه ورودی عدسی شیئی و f فاصله کانونی است. $\psi_1=-\frac{1}{2}k_1 d^2\Delta(\frac{1}{l})\tan^2\theta_1$ ابیراهی کروی ناشی از تعویض طول لوله مکانیکی[۹] عدسی شیئی است. d و l به ترتیب فاصله ذره داخل تله تا صفحه اصلی عدسی شیئی (که با استفاده از بزرگ نمایی عدسی شیئی بدست می‌آید.) و طول لوله مکانیکی سیستم اپتیکی هستند. ψ_2 ابیراهی کروی ناشی از اختلاف ضریب شکست در مسیر پرتوها است:

$$\psi_2=-k_0[n_1(t_2+t_3+t_4)\cos\theta_1-n_2t_2\cos\theta_2$$
$$-n_3t_3\cos\theta_3-n_4t_4\cos\theta_4] \qquad (2)$$

در رابطه فوق اندیس‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نماینده محیط داخل عدسی شیئی($n_1=1.52$)، روغن غوطه‌وری، لامل($n_1=1.52$) و هوا هستند. شکل ۱ مسیر پرتوهای کانونی را در انبرک نوری نشان می‌دهد. t_2، t_3 و t_4 بترتیب ضخامت لایه روغن غوطه‌وری، ضخامت لامل و فاصله کانون گاوسی تا سطح لامل را نشان می‌دهند. برای

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

اعمال روش لورنز-می ابتدا مبدا دستگاه مختصات را از کانون گاوسی به مرکز ذره کروی انتقال داده شده و سپس میدان‌ها بر حسب هماهنگ‌های کروی برداری بسط داده می‌شوند.



شکل ۱: شماتیک مسیر پرتوهای کانونی در انبرک نوری.

$$\vec{E}(\vec{r}') = \sum_{plm} \vec{J}_{lm}^{(p)}(\vec{r}', k_4)\omega_{lm}^{(p)}(\vec{R}) \qquad (3)$$

بردار $\vec{R}$ مکان مرکز ذره کروی نسبت به کانون گاوسی عدسی شیئی را نشان می‌دهد و بردار $\vec{J}_{lm}^{(p)}(\vec{r},k)$ چند قطبی‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند که در مراجع[۱۰،۱۱] معرفی شده‌اند. $\omega_{lm}^{(p)}(\vec{R})$ ضرایب شکل میدان فرودی هستند:

$$\omega_{lm}^{(p)}(\vec{R}) = ik_1 fE_0 \frac{e^{ik_1 f}}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{n_1}}\sum_{\eta}\int_0^{\alpha}\int_0^{2\pi} d\theta_1 d\phi \sin\theta_1$$
$$\times\sqrt{\cos\theta_1}\exp(-\frac{1}{f_0^2}\frac{\sin^2\theta_1}{\sin^2\alpha})$$
$$\times e^{i\psi}e^{i\vec{k}_4.\vec{R}}c_\eta t_\eta W_{lm}^{(p)}(\hat{u}_{4\eta}, k_4) \qquad (4)$$

در رابطه فوق $W_{lm}^{(p)}(\hat{u}_\eta, k)$ ضرایب بسط میدان‌های تخت بر حسب هماهنگ‌های کروی برداری هستند[۱۰]. با انتگرال‌گیری بر روی تانسور تنش ماکسول[۱۲] بر روی کره‌ای به مرکز ذره و شعاع بسیار بزرگ نیروی وارد بر ذره محاسبه می گردد:

$$F_{Rad,\zeta}^{Sca} = \frac{\varepsilon_0}{2k_0^2}\mathrm{Re}\sum_{plm}\sum_{p'l'm'} A_{lm}^{(p)*}A_{l'm'}^{(p')}I_{\zeta,lml'm'}^{(pp')}$$

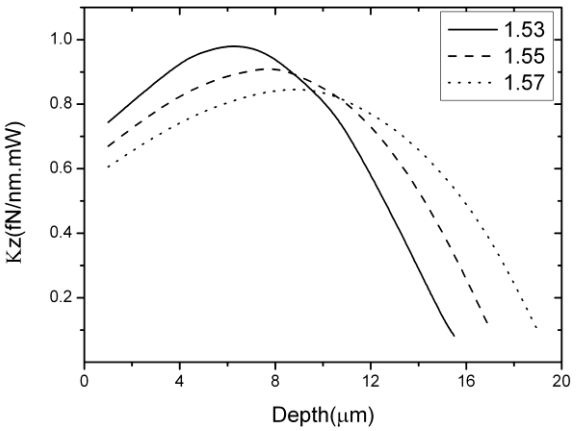
$$F_{Rad,\zeta}^{Ext} = -\frac{\varepsilon_0}{2k_0^2}\mathrm{Re}\sum_{plm}\sum_{p'l'm'} \omega_{lm}^{(p)*}A_{l'm'}^{(p')}I_{\zeta,lml'm'}^{(pp')}$$

$$F_{Rad,\zeta} = -F_{Rad,\zeta}^{Sca} + F_{Rad,\zeta}^{Ext} \qquad (5)$$

که $A_{lm}^{(p)}$ ضرایب بسط میدان‌های پراکنده است و از اعمال شرایط مرزی بر روی ذره داخل تله بدست می‌آیند. $I_{\zeta,lml'm'}^{(pp')}$ نیز شامل جهت نیروی اعمالی است[۱۰].

۳- تحلیل نتایج

در این مقاله نتایج مربوط به تعیین ضریب سختی محوری تله نوری برای تله‌اندازی قطره آب به قطر $1\mu m$ و ذره پلی استایرن به قطر $0.8\mu m$ برای سه روغن غوطه‌وری مختلف با ضرایب شکست ۱.۵۳، ۱.۵۵ و ۱.۵۷ ارایه شده است. برای اینکه نتایج بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی قابل مقایسه گردد، طول لوله مکانیکی عدسی شیئی، ضریب پرکنندگی پشت عدسی شیئی، ضخامت لامل و گشودگی عددی عدسی شیئی بترتیب $160mm$، 1، $170\mu m$ و 0.98 در نظر گرفته شده است تا از بازتاب‌های کلی در مرز شیشه-هوا جلوگیری گردد. شکل ۲ تله‌اندازی قطره آب $1\mu m$ را بر حسب عمق نشان می‌دهد.



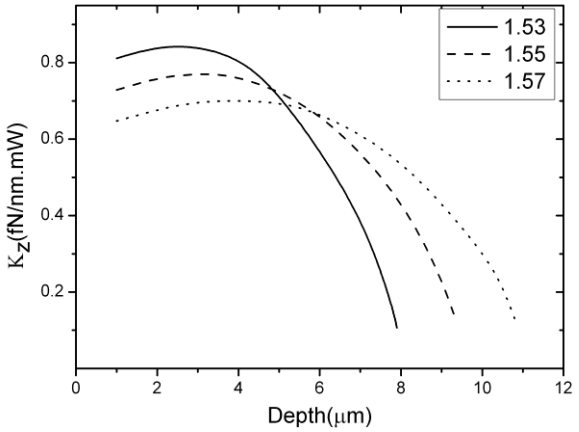
شکل ۲: نمودار ضریب سختی تله محوری قطره آب با قطر 1μm بر حسب عمق برای محیط‌های غوطه‌وری مختلف.

در شکل ۲ ضریب سختی تله دارای یک نقطه بیشینه در سختی تله محوری است (عمق بهینه) که با تغییر محیط غوطه‌وری به نقاط عمیق‌تر منتقل می‌گردد. با تغییر روغن غوطه‌وری یک ابیراهی کروی با علامت مخالف ابیراهی موجود اولیه در سیستم وارد گردیده است که منجر به کمینه شدن ابیراهی کروی کل در این نقطه شده است. با توجه به شکل ۲ عمق بهینه به ازای هر 0.02 تغییر در ضریب شکست روغن غوطه‌وری تقریبا $2\mu m$ به داخل

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

نمونه منتقل شده است که با نتایج مرجع[۷] سازگار است.

شکل ۳ تله اندازی ذرات پلی استایرین (هواویز جامد) با قطر $0.8\mu m$ را بر حسب عمق تله نشان می‌دهد. تله اندازی پلی استایرین ($n=1.57$) بدلیل اختلاف ضریب شکست زیاد نسبت به محیط (هوا) بسیار دشوارتر از قطرات آب است. با استفاده از تغییر ضریب شکست و استفاده از طول لوله مکانیکی محدود در سیستم اپتیکی می‌توان این ذرات جامد را حتی در اعماق محیط نمونه که ابیراهی کروی در آن زیاد است تله‌اندازی کرد. با استفاده از روغن غوطه‌وری با ضریب شکست بزرگتر می‌توان حتی در عمق‌های بیشتر تله‌اندازی کرد(نتایج نشان داده نشده‌اند). شکل ۳ نشان می‌دهد سختی تله برای ذرات پلی استایرین برای روغن‌های مختلف دارای عمق بهینه است که نشان از کمینه بودن ابیراهی کروی است. برای این ذره نیز برای هر 0.02 تغییر در ضریب شکست روغن تقریبا $1-2\mu m$ انتقال عمق بهینه به عمق نمونه مشاهده می‌شود.



شکل ۳: نمودار ضریب سختی تله محوری ذره کروی پلی استایرن با قطر 0.8μm بر حسب عمق برای محیط‌های غوطه‌وری مختلف.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تله اندازی هواویزهای جامد و مایع بصورت نظری با اعمال روش لورنز-می تعمیم یافته مورد مطالعه قرار گرفته است. تله‌اندازی قطرات آب با قطر $1\mu m$ و ذرات پلی استایرن با قطر $0.8\mu m$ برای محیط‌های غوطه‌وری مختلف بر حسب عمق تله بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در هر مورد با افزایش ضریب شکست روغن به اندازه 0.02 تقریبا $2\mu m$ انتقال عمق بهینه به عمق‌های بیشتر بوجود می‌آید که با یافته‌های تجربی در توافق کامل است.

مراجع

[1] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, **Opt. Lett.** 11, 288 (1986).
[2] M. E. J. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-Dunlop, **Opt. Lett.,** 23, 1 (1998).
[3] Laura Mitchem and Jonathan P. Reid, **Chem. Soc. Rev.,** 37, 756 (2008).
[4] F. Hajizadeh, and S. N. S. Reihani, **Opt. Express,** 18, 551, (2010).
[5] Ryota Omori, Tamiki Kobayashi, and Atsuyuki Suzuki, **Opt. Lett.,** 22, 816 (1997).
[6] S. N. S. Reihani and L. B. Oddershede, **Opt. Lett.,** 32, 1998 (2007).
[۷] محمد صادقی، سید محمدرضا طاهری و سید نادر سید ریحانی، چهاردهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهارمین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۰.
[8] B. Richards and E. Wolf, **Proc. R. Soc. London Ser. A** 253, 358 (1959).
[9] S.Nader.S. Reihani , H.R. Khalesifard, R. Golestanian, **Opt. Comm.,** 259, 204 (2006).
[10] F. Borghese, P. Denti, R. Saija, M. A. Iatì, **Optics Express,** 15, 19, 11894 (2007).
[11] F. Borghese, P. Denti, R. Saija, *Scattering from Model Nonspherical Particles*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
[12] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, John Weily & Sons, 1999.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]