



بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه خوارزمی،  
تهران، ایران.  
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸



## به دام اندازی نوری غیر تماسی سلول مخمر توسط فیبر مخروطی و عدسی شده

نوید صالحی، آتوسا سادات عربانیان، رضا مسعودی\*

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، تهران. ([\\*R-massudi@sbu.ac.ir](mailto:R-massudi@sbu.ac.ir))

در این مقاله طراحی و ساخت سیستم به دام اندازی نوری غیر مخرب توسط فیبر مخروطی و عدسی شده برای به دام اندازی ذرات زیستی و دستکاری اپتیکی آنها در دوبعد و بدون تماس فیزیکی گزارش شده است. ابتدا شبیه سازی توزیع فضایی نور خروجی از فیبر مخروطی و عدسی شده، با استفاده از روش محاسباتی تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) انجام شده و نیروی حاصل از این توزیع میدان بر روی سلول مخمر در دو راستای طولی و عرضی بطور عددی محاسبه شده است. سپس به صورت تجربی قابلیت به دام اندازی دوبعدی غیر تماسی و غیر مخرب توسط فیبر مخروطی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه- فیبر مخروطی و عدسی شده، به دام اندازی نوری غیر تماسی، انبرک نوری فیبری، سلول مخمر

## Non-contact optical trapping of yeast cell using lensed-tapered fiber

Navid Salehi, Atoosa Sadat Arabanian, and Reza Massudi\*

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Tehran. ([\\*R-massudi@sbu.ac.ir](mailto:R-massudi@sbu.ac.ir))

In this paper, we have reported design and fabrication of a non-contact and non-destructive optical trapping system using a lensed-tapered optical fiber in order to trap and manipulate bio-particles. First, spatial distribution of lensed-tapered optical fiber output is simulated by finite difference time domain (FDTD) method and the optical forces resulted by this field distribution acting on yeast cell in two transversal and longitudinal directions are numerically calculated. Then, lensed-tapered optical fiber ability to create a non-contact and non-destructive optical trap is experimentally investigated.

Keywords: lensed-tapered optical fiber, non-contact optical trapping, Fiber optical tweezers, yeast cell.

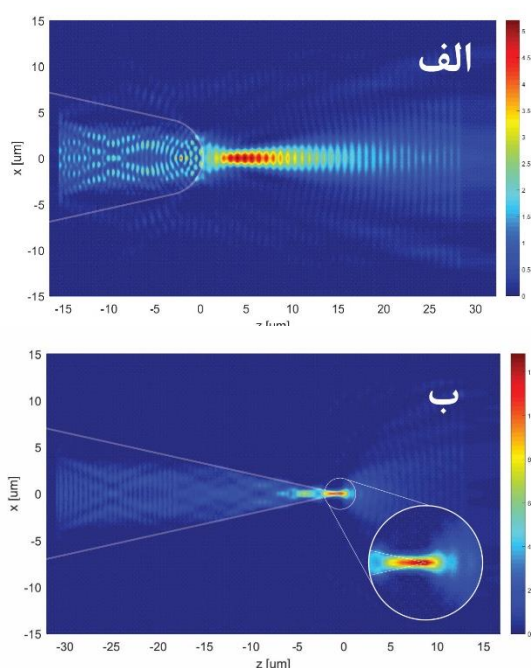
## مقدمه

در میان روش های به دام اندازی ذرات زیستی، به دام اندازی نوری یک روش قدرتمند، غیر مخرب، با دقت بالا و برپایه باریکه لیزر به شدت کانونی شده، است. ذرات کوچک را میتوان به وسیله یک نیروی حاصل از گرادیان نوری به دام انداخت. پس از گزارش اولین دام نوری توسط اشکین در سال ۱۹۸۶، تاگوچی در سال ۱۹۹۷ با استفاده از نور خروجی از یک فیبر ذرات دی الکتریک را به دام انداخت [۱، ۲]. در طی سالهای بعد با مهندسی نوک فیبر روش به دام اندازی نوری به وسیله فیبر نوری بسیار بهبود یافت. در سالهای اخیر روش های متعددی برای به دام اندازی ذرات زیستی مورد استفاده قرار گرفته شده است اما استفاده از فیبر های مخروطی به دلیل ساخت آسان، قابلیت استفاده در مدار های مجتمع نوری و انعطاف پذیری بالا به سایر روش ها برتری دارد [۳]. نور خروجی از فیبر مخروط شده، در انتهای مخروط به شدت کانونی شده و یک گرادیان شدت مناسب برای به دام اندازی ذرات کوچک ایجاد میکند اما در این روش تماس فیزیکی ذرات به دام افتاده و نوک فیبر غیر قابل اجتناب بوده و میتواند موجب آسیب به نمونه مورد بررسی شود. در این پژوهش برای غلبه بر این مشکل و بهره گیری از مزایای فیبر مخروطی، از یک فیبر مخروطی و عدسی شده تک مد جهت به دام اندازی سلول مخمر استفاده شده و نتایج شبیه سازی و تجربی گزارش می شود.

## طراحی و شبیه سازی عددی فیبر مخروطی و عدسی شده

برای دستیابی به دام نوری غیرمخرب و غیرتماسی، ابتدا یک فیبر مخروطی و عدسی شده با زاویه مخروط ۲۵ درجه و شعاع عدسی انتهای مخروط ۲۳ میکرومتر، بر پایه فیبر HI-1060 XP [۴] با روزنه عددی ۰٫۱۴ و قطر میدان مودی ۵٫۹ میکرومتر، طراحی و ساخته شده است تا باریکه

خروجی فیبر را با فاصله از نوک فیبر کانونی کند. برای نشان دادن توانایی فیبر مخروطی و عدسی شده فوق در کانونی کردن باریکه، دور از نوک فیبر، از روش محاسباتی تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) جهت شبیه سازی توزیع فضایی نور خروجی از فیبر استفاده شده و نتیجه مطابق شکل ۱ گزارش می شود.



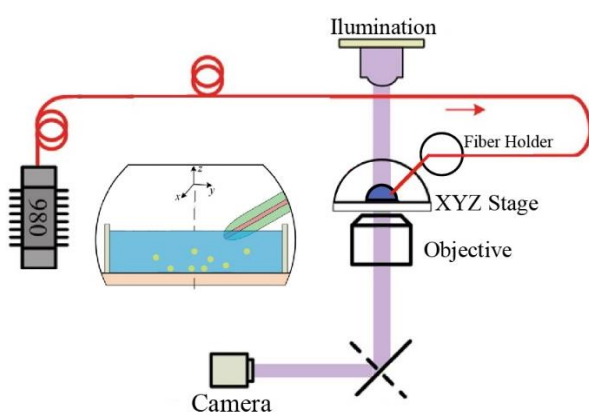
شکل ۱- توزیع فضایی نور خروجی از (الف) فیبر مخروطی و عدسی شده و (ب) فیبر مخروطی در اینجا نور انتشاری داخل فیبر با توان ورودی بهنجار شده و مطابق مد پایه فیبر می باشد. همانطور که در شکل ۱ مشخص است، بر خلاف فیبرهای مخروطی که در آنها کانون در نوک فیبر مخروطی مشاهده می شود، برای فیبر مخروطی و عدسی شده، کانون باریکه خروجی از نوک فیبر به مقدار ۵٫۱ میکرومتر فاصله دارد و امکان به دام اندازی غیر مخرب را فراهم می سازد.

سپس برای بررسی عددی قابلیت به دام اندازی نوری توسط فیبر مخروطی و عدسی شده، نیروی اپتیکی وارد بر سلول مخمر به ازای باریکه خروجی فیبر بررسی شده است. با توجه به نسبت اندازه نمونه (کروی شکل و با شعاع ۲٫۵ میکرومتر [۵]) و طول موج انتشاری داخل فیبر (۹۸۰ نانومتر)

در شکل ۳ مقدار مثبت و منفی نیرو به ترتیب معادل اعمال نیرو در جهت و خلاف جهت انتشار باریکه می‌باشد. در شکل ۳ الف نیروی وارد بر ذره در راستای عرضی و ابعاد ذره نشان داده شده است که مطابق شکل وقتی کانون روی مرز ذره قرار گیرد، ذره بیشینه نیرو را حس خواهد کرد و روی نقطه کانون نیروی وارد بر ذره در راستای عرضی برابر صفر است. نیروی پراکندگی در راستای طولی مقداری همواره مثبت بوده و با افزایش فاصله از نوک فیبر کاهش می‌یابد در حالی که نیروی گرادیان در راستای طولی رفتاری همانند فنر داشته و قبل از کانون مقداری مثبت، روی کانون مقدار صفر و پس از کانون مقداری منفی دارد. بنابراین انتظار داریم در راستای طولی ذره اندکی جلوتر از محل کانون به دام بیفتد (شکل ۳ ب).

### بررسی تجربی

با توجه به محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در بخش قبل یک چیدمان تجربی مطابق شکل ۴ طراحی و برپا شده است.



شکل ۴- چیدمان تجربی به دام‌اندازی سلول مخمر توسط فیبر مخروطی و عدسی شده

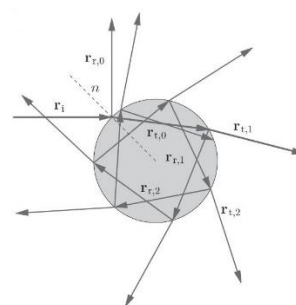
برای این چیدمان از یک لیزر دیودی با طول موج ۹۸۰ نانومتر که جذب بسیار پایینی در برهمکنش با اکثر ذرات زیستی دارد [۷]، جفت شده در فیبر مخروطی و عدسی شده قرار گرفته و لامل توسط یک جابجاگر شش‌محوره کنترل

میتوان از تقریب اپتیک هندسی برای محاسبه نیروهای وارد بر سلول استفاده نمود. در این تقریب برای توصیف باریکه نور و توضیح چگونگی انتقال انرژی از یک مجموعه پرتو نور استفاده می‌شود که این پرتوها، بردارهایی عمود بر جبهه موج و در جهت شارش انرژی الکترومغناطیسی هستند. نیروی وارد بر یک کره با ضریب شکست  $n_i$  در محیطی به ضریب شکست  $n_t$  مطابق رابطه ۱ است.

$$\mathbf{F}_{GO} = \sum_m \mathbf{F}_{ray}^{(m)} \quad (1)$$

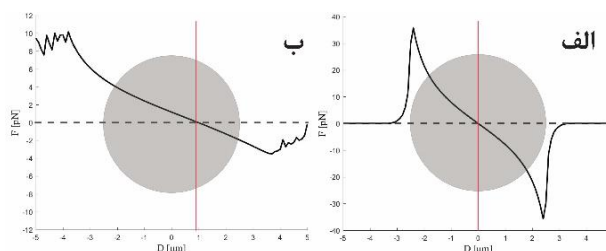
$$= \sum_m \left[ \frac{n_i P_i^{(m)}}{c} \hat{\mathbf{r}}_i^{(m)} - \frac{n_i P_r^{(m)}}{c} \hat{\mathbf{r}}_{r,0}^{(m)} - \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{n_i P_{t,n}^{(m)}}{c} \hat{\mathbf{r}}_{t,n}^{(m)} \right]$$

که در آن  $\hat{\mathbf{r}}_i$ ،  $\hat{\mathbf{r}}_{r,n}$ ،  $\hat{\mathbf{r}}_{t,n}$  به ترتیب بردارهای یکه در راستای فرود و  $n$  امین پرتو بازتابی و عبوری و  $P_i^{(m)}$ ،  $P_r^{(m)}$  و  $P_{t,n}^{(m)}$  به ترتیب توان منسوب به پرتو فرودی  $m$ ، اولین بازتاب و  $n$  امین پرتو عبوری آن و  $C$  سرعت نور در خلاء است [۶].

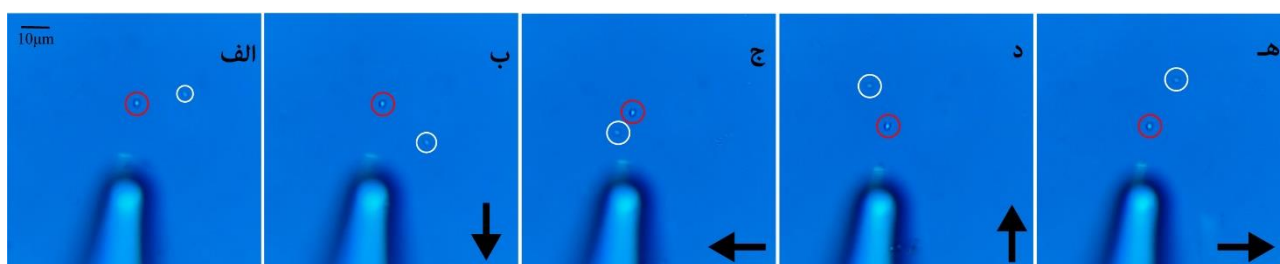


شکل ۲- بازتاب‌های متوالی تک پرتو داخل کره دی‌الکتریک

پس از تقریب باریکه خروجی فیبر به وسیله یک مجموعه پرتو مناسب و استفاده از رابطه (۱) نیروی وارد شده به نمونه در فواصل مختلف نسبت به کانون مطابق شکل ۳ بدست آمده است.



شکل ۳- الف) نیروی وارد بر ذره در فواصل مختلف از کانون در راستای  $x$  در  $z = 5.1 \mu\text{m}$  ب) نیروی وارد بر ذره در فواصل مختلف از کانون در راستای  $z$  و در  $x = 0$ .



شکل ۵- تصویر سلول مخمر به دام افتاده (قرمز) و سلول مخمر شاهد (سفید). پیکان زیر شکل ها نشان گر جهت حرکت لامل قبل از ثبت تصویر می باشد.

## نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از محاسبات عددی و آزمایشات تجربی امکان ایجاد دام اپتیکی توسط فیبر مخروطی و عدسی شده مورد بررسی و تایید قرار گرفت. نیروی وارد بر سلول مخمر در فواصل مختلف از کانون بصورت عددی محاسبه شده و در بخش تجربی یک سلول مخمر توسط باریکه خروجی فیبر با طول موج ۹۸۰ نانومتر، بصورت غیرتماسی و غیرمخرب به دام انداخته شد. بنابراین توانایی فیبر مخروطی و عدسی شده جهت به دام اندازی ذرات زیستی اثبات شد.

## مرجع ها

1. Ashkin, A., et al., *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles*. Optics letters, 1986. **11**(5): p. 288-290.
2. Taguchi, K., et al., *Single laser beam fiber optic trap*. electronics, 2001. **33**(1): p. 99-106.
3. Polimeno, P., et al., *Optical tweezers* Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018. **218**: p. 131-150.
4. ThorLabs. *HI-1060XP*. 2019; Available from: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=1060XP>.
5. Mortimer, R.K. and J.R. Johnston, *Life span of individual yeast cells*. Nature, 1959. **183**(4677): p. 1751-1752.
6. Jones, P., O. Marago, and G. Volpe, *Ray optics*, in *Optical Tweezers*. 2015. p. 19-41.
7. Xin, H., Q. Liu, and B. Li, *Non-contact fiber-optical trapping of motile bacteria*. Scientific reports, 2014. **4**: p. 6576.
8. Liu, Y., *Fiber Optical Tweezers For Microscale and Nanoscale Particle Manipulation and Force Sensing*. 2011.

می شود. با استفاده از یک چرخاننده مکانیکی، نگه دارنده فیبر تحت زاویه مناسب (۵۰ درجه نسبت به محور قائم) و در فاصله مناسب از نمونه قرار گرفته است [۸]. یک سیستم تصویربرداری بر پایه میکروسکوپ وارون و با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر جهت مشاهده به دام اندازی سلول های مخمر استفاده شده است. شکل ۵ به دام اندازی نوری سلول مخمر را نمایش می دهد. برای تصویر برداری از فرآیند به دام اندازی و حذف نور پراکنده شده از نمونه، قبل از دوربین یک فیلتر برای حذف طول موج ۹۸۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفته است. توان خروجی از فیبر مخروطی و عدسی شده برای به دام اندازی برابر ۲۰ mW می باشد. برای بررسی دام اپتیکی مطابق شکل ۵ از یک سلول شاهد که در دام قرار نداشته و به صورت ثابت ته نشین شده است، استفاده می شود. با توجه به موقعیت سلول به دام افتاده و سلول شاهد، بدون تغییر مکان فیبر، لامل را توسط جابجاگر سه بعدی ابتدا در راستای y- جابجا می کنیم (شکل ۵ ب) و مشاهده می کنیم که با تغییر مکان سلول شاهد، جابجایی در سلول به دام افتاده مشاهده نشد. برای بررسی دام اپتیکی در دو بعد در مرحله های بعد به ترتیب لامل را در راستای x-، y+ و x+ جابجا کرده و مطابق شکل ۵ (ج تا ه) مشاهده می شود که تغییری در مکان سلول مخمر به دام افتاده مشاهده نشد و اثبات می شود که سلول مخمر توسط این سیستم به خوبی به دام افتاده است.