

# Optical Tweezers based on Nano-focusing of Coupled Surface Plasmons in two Gold Strips

Mohammad-reza Hasanpour and Mostafa Ghorbanzadeh\*

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, P.O. Box 397, Sabzevar 9617976487, Iran.  
E-mails: mr.hasanpour@sun.hsu.ac.ir; m.ghorbanzadeh@hsu.ac.ir

\*Corresponding author

## Short Abstract

In this paper an optical tweezer with the ability to manipulate and sense nanoparticles using the coupling of surface plasmons of two gold strips and its nano-focusing is proposed. To investigate the performance of the proposed structure, at first the plasmonic modes have been calculated by the finite difference Eigen-mode method and then using the finite-difference time-domain method and calculating Maxwell stress tensor the optical forces have been obtained. The simulation results show that the proposed structure has the ability to trap and manipulate nanoparticles. Due to the dependency of the trapping sites on the incident light frequency, the proposed structure, in addition to the ability to move nanoparticles by mechanical movement of the optical tweezer, can also move nanoparticles by tuning the frequency. Also, the simulation results show that due to the dependency of the reflected power on the refractive index of the trapped nanoparticle, the trapped nanoparticle can be sensed by analysing the reflected power. We believe this structure can be used in various fields, especially in biological sciences, to study and move nanoparticles.

## Keywords

Surface plasmon, optical force, nanoparticles, nano-focusing, optical tweezers, finite-difference time-domain.

## 1- Short Introduction

After the first experimental observation of trapping micro-particles in 1970 by Ashkin, the winner of the Nobel prize in Physics in 2018, optical tweezers attracted more attentions in various fields of sciences such as Bio- and nano-technology, physics, and chemistry to non-invasively trap, manipulate, and sense micro and nano-objects. Conventional far-field tweezers suffer from the diffraction limit. To overcome the diffraction limit and make it possible to trap nanometer-sized particles, near-field tweezers have been proposed. Meanwhile, plasmonic near-field tweezers based on gold strips have received great attention owing to their simple structure, tight field confinement, and strong field enhancement that is essential for trapping nanoparticles.

## 2- Proposed Work and Methodology

We are proposing a plasmonic tweezer that benefits from the focusing of two coupled surface plasmons excited between two gold strips. To investigate the performance of the proposed structure, the plasmonic modes were calculated by the finite difference Eigen-mode method and then using the finite-difference time-domain method and calculating Maxwell stress tensor, the optical forces were numerically calculated. By calculating optical forces and the potential energy, we show that nanoparticles can be trapped at the equilibrium sites that depend on the incident frequency. We also show that the reflected power from the tip of the proposed tweezer depends on the refractive index of the trapped nanoparticle.

## 3- Conclusion

In brief, simulations show that in the proposed structure (i) the excited surface plasmons can be focused in sub-wavelength ( $\sim 75 \times 30$  nm at wavelength 833 nm), (ii) nanoparticles can be trapped in the tip of the structure, (iii) nanoparticles can be manipulated along the length of the tip by tuning the incident frequency (in addition of moving nanoparticles by mechanical movement of the optical tweezer), and (iv) nanoparticles can be sensed by detecting the reflected power from the tip. We believe that this structure can be used in various fields, especially in biological sciences, to study and move particles.

## 4- References

- [1] M. Ghorbanzadeh and S. Darbari, "Efficient Plasmonic 2D Arrangement and Manipulation System, Suitable for Controlling Particle-Particle Interactions", *J. Light. Technol.*, vol. 37, no. 9, pp. 2058–2064, 2019.
- [2] H. Choo, M. K. Kim, M. Staffaroni, T. J. Seok, J. Bokor, S. Cabrini, P. J. Schuck, M. C. Wu, and E. Yablonovitch, "Nanofocusing in a metal-insulator-metal gap plasmon waveguide with a three-dimensional linear taper", *Nat. Photonics*, vol. 6, no. 12, pp. 838–844, 2012.
- [3] K. Wang, E. Schonbrun, P. Steinvurzel, and K. Crozier, "Scannable plasmonic trapping using a gold stripe", *Nano Lett.*, vol. 10, no. 9, pp. 3506–3511, 2010.

## انبرک نوری مبتنی بر نانومتر کزسازی پلاسمون‌های سطحی جفت‌شده در دو نوار طلا

محمد رضا حسن پور

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، خراسان رضوی، ایران

مصطفی قربان‌زاده

استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، خراسان رضوی، ایران

### چکیده

در این مقاله یک انبرک نوری با قابلیت جابجایی و آشکارسازی نانوذرات با استفاده از جفت‌شدگی پلاسمون‌های سطحی دو نوار طلا و نیز نانومتر کزسازی آن پیشنهاد می‌شود. برای بررسی عملکرد ساختار پیشنهادی، ابتدا مدهای پلاسمونی با استفاده از روش تفاضل محدود مد ویژه محاسبه شده و سپس با استفاده از روش عددی تفاضل محدود حوزه زمان و محاسبه تنسور تنش ماکسول، نیروهای نوری به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد ساختار پیشنهادی قابلیت به دام انداختن نانوذرات و نیز جابجایی آن‌ها را دارد. به دلیل وابستگی مکان‌های تله به فرکانس نور ورودی، ساختار پیشنهادی علاوه بر قابلیت جابجایی نانوذرات با جابجایی مکانیکی انبرک نوری، با تنظیم فرکانس نیز می‌تواند نانوذرات را جابجا نماید. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد به دلیل وابستگی توان منعکس شده به ضریب شکست نانوذره به دام افتاده، با تحلیل توان انعکاس یافته می‌توان نانوذره به دام افتاده را حس کرد. ما بر این باوریم این ساختار می‌تواند در حوزه‌های مختلف به خصوص در علوم زیستی برای مطالعه و جابجایی نانوذرات مورد استفاده قرار گیرد.

### کلمات کلیدی

پلاسمون سطحی، نیروی نوری، نانوذرات، نانومتر کزسازی، انبرک نوری، تفاضل محدود حوزه زمان.

نام نویسنده مسئول: دکتر مصطفی قربان‌زاده

ایمیل نویسنده مسئول: m.ghorbanzadeh@hsu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

### ۱- مقدمه

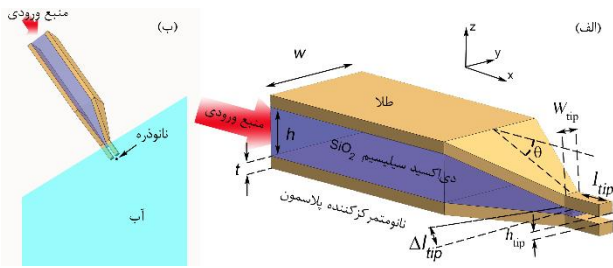
بزرگ و پرهزینه، به دلیل محدودیت در تحصیر میدان نوری ناشی از حد پراش اغلب به ذرات با ابعاد میکرومتری محدود می‌شوند [۳]. برای غلبه بر محدودیت‌های پراش و کوچک‌سازی انبرک‌های نوری، روش‌های مبتنی بر میدان‌های نزدیک<sup>۲</sup> [۲، ۴، ۵] معرفی شد. به عنوان مثال موجبرهای نوری، بلورهای فوتونی [۶] و تشدیدگرهای حلقوی به دلیل قابلیت ایجاد میدان‌های محوشونده قوی در جهت‌های مختلف (و در نتیجه اعمال نیروی گرادیان قوی) می‌توانند به عنوان ساختاری مناسب جهت به دام انداختن نانوذرات مورد استفاده قرار گیرند که به ترتیب در [۹-۷] به آن پرداخته شده است. در این میان پلاسمون‌های سطحی به دلیل قابلیت تحصیر نور در ابعاد کمتر از طول موج و افزایش دامنه امواج الکترومغناطیسی [۱۲-۱۰]، که لازمه افزایش برهمکنش نور با ذرات و اعمال تکانه لازم به ذرات است، توجه ویژه‌ای را به خود جلب نموده است [۲۴-۱۳]. پلاسمون‌های سطحی، نوسان‌های منسجم و جمعی الکترون‌ها در فصل مشترک دو ماده می‌باشند که بخش حقیقی توابع دی‌الکتریک آن‌ها باید مختلف‌العلامت باشد (به عنوان مثال فلز و دی‌الکتریک) [۱۰]. خوشبختانه پلاسمون‌های سطحی مواد مختلف از جمله طلا می‌تواند توسط طیف مرئی (که ضریب جذب آب و ذرات زیستی در آن کم است) تحریک شده و نقاط داغ<sup>۳</sup> به شدت متمرکز و با گرادیان شدید در میدان الکتریکی و به دنبال آن نیروی گرادیان را ایجاد

پس از اولین مشاهده تجربی به دام انداختن میکروذرات بدون تماس فیزیکی با استفاده از روش میدان دور<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۰ توسط آشکین [۱]، برنده جایزه نوبل فیزیک در سال ۲۰۱۸، انبرک‌های نوری در زمینه‌های مختلف به‌ویژه در حوزه‌های بیو و نانوتکنولوژی، فیزیک و شیمی برای تله‌اندازی و دستکاری ذرات، توجه زیادی را به خود جلب کرد [۲]. در این روش با بهره‌گیری از تکانه اندک فوتون‌ها، می‌توان به طیف زیادی از ذرات از جمله مواد مصنوعی شامل ذرات پلی‌استایرن، سیلیکن و طلا و نیز ذرات زیستی شامل سلول‌های زنده، اندامک‌ها و رشته‌های DNA نیرو اعمال کرده، حرکت آن‌ها را کنترل کرده، به دام انداخته، آشکارسازی کرده و یا دسته‌بندی نمود. به طور کلی نیروی نوری را می‌توان به دو نوع گرادیان و پراکندگی تفکیک کرد. نیروی گرادیان ذرات را به مکان با حداکثر شدت میدان الکتریکی سوق می‌دهد و نیروی پراکندگی در راستای بردار موج به ذرات نیرو وارد می‌کند. برای داشتن تله پایدار برآیند دو نیروی گرادیان و پراکندگی باید یک مکان تعادلی را ایجاد نماید. به عنوان یک شرط کافی، اگر نیروی گرادیان بر نیروی پراکندگی غلبه کند یک مکان تعادلی برای به‌دام‌اندازی ذرات ایجاد خواهد شد. انبرک‌های نوری کلاسیک مبتنی بر روش میدان دور می‌باشند که علاوه بر نیاز به استفاده از سیستم‌های اپتیکی مقیاس

<sup>۳</sup> Hot spot

<sup>۱</sup> Far-field

<sup>۲</sup> Near-field



شکل ۱- شمای ساختار پیشنهادی و نحوه عملکرد آن، (الف) نمای سه‌بعدی با ذکر مشخصات هندسی و (ب) نحوه عملکرد انبرک نوری پیشنهادی در به دام انداختن نانوذرات معلق در آب.

اکسید می‌باشد تا نانوذرات بتوانند داخل انبرک نوری توسط نیروهای پلاسمونی به دام افتاده و نیز حس شوند. این ساختار می‌تواند با استفاده از روش اشعه متمرکز شده (FIB) [۱۱] و سپس زدایش شیمیایی نوک ساختار ایجاد شود. با وارد کردن انبرک نوری در سیال شامل نانوذرات معلق (شکل ۱-ب)، نانوذرات می‌توانند توسط نیروهای پلاسمونی از پیرامون و نیز انتهای نوک ساختار به دام افتاده و توسط آن جابجا شوند. لازم به ذکر است جابجایی نانوذرات با جابجایی مکانیکی انبرک نوری و نیز تغییر فرکانس نور ورودی ممکن می‌باشد. علاوه بر این با آنالیز توان برگشتی از ساختار، می‌توان نانوذرات به دام افتاده را آشکارسازی نمود.

### ۳- روش شبیه‌سازی

به منظور محاسبه نیروهای نوری، ابتدا با استفاده از روش تفاضل محدود مد ویژه، مد پلاسمونی موجبر در ابتدای ساختار محاسبه شده و سپس با اعمال این مد به ساختار با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه زمان به صورت سه بعدی (FDTD) [۲۵] با شرایط مرزی لایه کاملاً منطبق (PML) برای تمام جهت‌ها، شدت میدان‌های الکتریکی  $E(r,t)$  و مغناطیسی  $H(r,t)$  در مکان  $r$  و در زمان  $t$  محاسبه شده است. در مرحله بعد، تانسور تنش ماکسول  $T^A$  با استفاده از رابطه (۱) به صورت عددی محاسبه شده و مقدار میانگین نیروی اعمال شده به ذره هدف  $F$  از رابطه (۲) به دست آمده است [۱۵-۲۴].

$$T(r,t) = \epsilon E(r) \otimes E^*(r) + \mu H(r) \otimes H^*(r) - \frac{1}{2} (\epsilon |E(r)|^2 + \mu |H(r)|^2) \quad (1)$$

$$\langle F \rangle = \frac{1}{2} \Re \left\{ \iint_{\Omega} T(r,t) \cdot \hat{n} dS \right\} \quad (2)$$

در این روابط  $n$  بردار واحد نرمال به سطح  $S$  است که حجم  $\Omega$  را در بر گرفته است،  $\epsilon$  گذردهی و  $\mu$  نفوذپذیری محیط و  $\square$  بیانگر قسمت حقیقی است. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی‌ها فرض شده نوک ساختار در آب مطابق شکل ۱-ب قرار گرفته است.

### ۴- نتایج

#### ۴-۱- بررسی مدهای پلاسمونی در ابتدای موجبر

شکل ۲ نیم رخ میدان الکتریکی در راستای  $x$  ( $E_x$ ) را برای سه مد اول پلاسمونی در ابتدای موجبر نشان می‌دهد. در این شکل‌ها فرکانس برابر ۳۶۰ تراهرتز و  $w$ ،  $h$  و  $t$  به ترتیب برابر ۵۰، ۵۰ و ۲۰۰ نانومتر، به عنوان مثال، در نظر گرفته شده است. نام‌گذاری مدها بر اساس تقارن میدان  $E_x$  در راستای  $z$  صورت پذیرفته

نماید. بنابراین این ساختارها قابلیت به دام انداختن نانوذرات را در طیف مرئی دارند و در صورتی که بتوانیم نقاط داغ را جابجا کنیم (به عنوان مثال با تغییر جهت تابش و قطبیدگی موج برخوردی [۱۰])، شدت نور برخوردی [۱۴، ۱۹] فرکانس [۱۶، ۲۰، ۲۲] و با خواص نوری مواد [۱۷، ۲۱، ۲۳، ۲۴] می‌توانیم نانوذرات را جابجا کنیم.

در این حوزه از پژوهش، اخیراً گروه ما چندین مقاله با قابلیت‌های متنوع برای به دام انداختن، دسته‌بندی، جابجایی و مکان‌یابی ذرات ارائه نموده است که مبتنی بر میکرونوارهای طلا [۱۵، ۱۹، ۲۰]، گرافن [۱۷، ۲۱، ۲۳، ۲۴] و نانوحفره [۱۸، ۲۲] بوده است. در این ساختارها تحریک پلاسمون در موجبر پلاسمونی اغلب با استفاده از ساختار کرشمن-ریتر صورت می‌پذیرد. برای به دام انداختن کارآمد نانوذرات با استفاده از پلاسمون‌های سطحی انتشاری، عرض موجبر پلاسمونی باید کاهش یابد. متأسفانه همان‌طور که در [۲۰] آمده است به دلیل عرض قطع<sup>۴</sup> در حدود چند صد نانومتر موجبر پلاسمونی مبتنی بر تک نوار طلا، کاهش عرض موجبر منجر به عدم امکان تحریک مستقیم پلاسمون‌های سطحی در آن می‌شود. به عنوان مثال در فرکانس ۳۶۰ تراهرتز (طول موج ۸۳۳nm)، عرض قطع بیش‌تر از ۴۰۰ نانومتر است [۲۰]. به‌منظور افزایش تحویل پلاسمون‌های سطحی، [۱۱] ساختاری را پیشنهاد داده است که به کمک آن می‌توان پلاسمون‌های سطحی را متمرکز نمود. در این مقاله ما با الهام گرفتن از فرآیند متمرکزسازی پلاسمون‌های سطحی که در [۱۱] آمده است، ساختاری جدید برای به‌دام‌اندازی، جابجایی و نیز آشکارسازی نانوذرات ارائه می‌دهیم که با استفاده از نانومترکزسازی مدهای پلاسمونی تحریک شده مابین دو نوار طلا با فاصله و عرض متغیر، می‌تواند مد پلاسمونی به شدت قوی و تحویل شده را ایجاد نماید. در این مقاله ابتدا پس از بیان مقدمه به بررسی ساختار پیشنهادی و نحوه عملکرد آن در بخش ۲ می‌پردازیم. سپس در بخش ۳ روش شبیه‌سازی بیان می‌شود. بخش ۴ به نتایج شبیه‌سازی اختصاص یافته است. در اولین زیربخش از بخش ۴ (۱-۴) به بررسی مدهای پلاسمونی می‌پردازیم و در زیربخش ۴-۲ انتشار مدهای پلاسمونی در ساختار متمرکزکننده پلاسمون در فرکانس‌های مختلف بررسی می‌شود. در ادامه به منظور بررسی توانایی این ساختار برای جابجایی نانوذرات، نیروهای اعمالی و انرژی پتانسیل و در نتیجه مکان‌های تله را به ازای فرکانس‌های مختلف بررسی می‌کنیم. نشان داده‌ایم با تغییر فرکانس می‌توان مکان تله‌ها را تغییر داده و ذرات را از مکانی به مکان دیگر منتقل نمود. علاوه بر این برای بررسی قابلیت آشکارسازی ذرات توسط ساختار ارائه شده، به بررسی تغییرات توان انعکاس یافته بر حسب ضریب شکست یک ذره آزمون پرداخته‌ایم. در انتها نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

#### ۲- ساختار و نحوه عملکرد انبرک نوری پیشنهادی

شکل ۱ ساختار انبرک نوری پیشنهادی را نشان می‌دهد. انبرک نوری پیشنهادی از دو نوار طلا به ضخامت  $t$  با عرض اولیه  $w$  و فاصله اولیه  $h$  تشکیل شده که مد پلاسمونی تحریک شده توسط منبع نوری را به بخش نانومترکزکننده منتقل می‌نماید. در بخش نانومترکزکننده، مد پلاسمونی تحریک شده در بخش ابتدایی به طور تدریجی با تغییر عرض موجبر از  $w$  به  $w_{tip}$  و فاصله دو موجبر از  $h$  به  $h_{tip}$  با زاویه  $\theta$  به شدت متمرکز می‌شود که این تمرکز انرژی منجر به افزایش شدت میدان الکتریکی می‌شود (شکل ۱-الف). مابین دو نوار طلا اکسید سیلیسیم ( $SiO_2$ ) قرار دارد تا بتواند مد پلاسمونی را بین دو نوار طلا تحویل نموده و نیز از نظر مکانیکی ساختار را پایدار نماید (لایه اکسید به میزان  $\Delta l_{tip}$  در نوک ساختار حفظ شده است). بخش انتهایی ساختار به طول  $l_{tip}$  عاری از

<sup>۷</sup> Perfectly matched layer

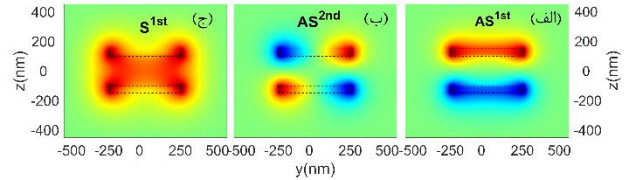
<sup>۸</sup> Maxwell stress tensor

<sup>۴</sup> Cutoff width

<sup>۵</sup> Focused ion beam

<sup>۶</sup> Finite-difference time-domain

برابر ۲۰ درجه، ۰.۷۵، ۳۰ و ۵۰ نانومتر و مبدأ محور  $x$  در فصل مشترک اکسید و آب در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها برای سه فرکانس برابر ۳۲۰، ۳۶۰ و ۴۰۰ تراهرتز انجام شده و مقدار شدت افزایش میدان در این فرکانس‌ها به ترتیب در بخش‌های الف تا ج آمده است. با عبور امواج پلاسمونی از سمت چپ به راست و ورود به بخش متمرکز کننده پلاسمون همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است علاوه بر افزایش تحصیر میدان پلاسمونی در نوک ساختار، شدت میدان نیز در حدود ۴۰ مرتبه افزایش می‌یابد. همچنین افزایش فرکانس نور ورودی منجر به کاهش فاصله بین نقاط ماکزیمم میدان الکتریکی می‌شود. این به این دلیل است که طول موج ( $\lambda$ ) امواج ایستای ایجاد شده ناشی از انعکاس پلاسمون‌ها از انتهای نوک ساختار ( $x=150\text{nm}$ ) در شکل ۳ و  $x=300\text{nm}$  در شکل ۴) با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابد ( $\lambda \propto 1/f$ ). علاوه بر این با افزایش  $l_{tip}$  همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است تعداد قله‌های میدان (مکان‌های تعادلی) به دلیل افزایش طول فیزیکی برهمکنش موج‌های رفت و برگشت از نوک ساختار، افزایش می‌یابد. برای سادگی در مقایسه، شدت میدان الکتریکی در مرکز ساختار  $y=z=0$  در راستای محور  $x$  نیز در بخش د این شکل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۳-د مشخص است دو قله در میدان الکتریکی پس از متمرکزسازی پلاسمون‌ها برای  $l_{tip}=150\text{nm}$  قابل مشاهده است. اولین قله میدان تقریباً در لبه ساختار به ازای  $x$  برابر ۱۵۰ نانومتر ظاهر می‌شود که به فرکانس وابستگی ضعیفی دارد اما قله دوم که از لبه ساختار دورتر است وابستگی فرکانسی قوی‌تری دارد. در صورتی که نانوذره بتواند وارد کانال شود در دو قله میدان توسط نیروی گرادیانی به دام خواهد افتاد. همچنین با تغییر فرکانس می‌توان ذره را در قله اول یا دوم و یا مابین این دو قله جایجا نمود. لازم به ذکر است به دلیل شدت بالای مد پلاسمونی در قله دوم، با تنظیم شدت

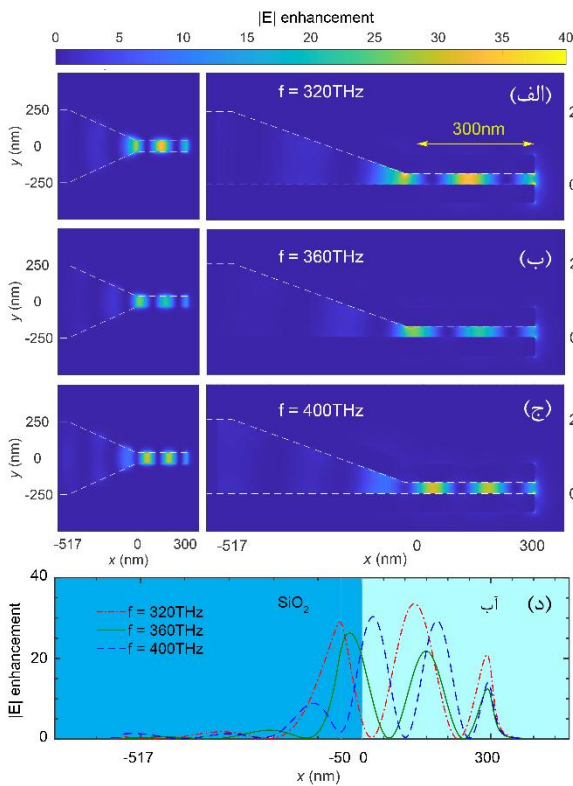


شکل ۲- نیم‌رخ میدان الکتریکی در راستای  $x$  برای سه مد اول پلاسمونی در ابتدای موجبر.

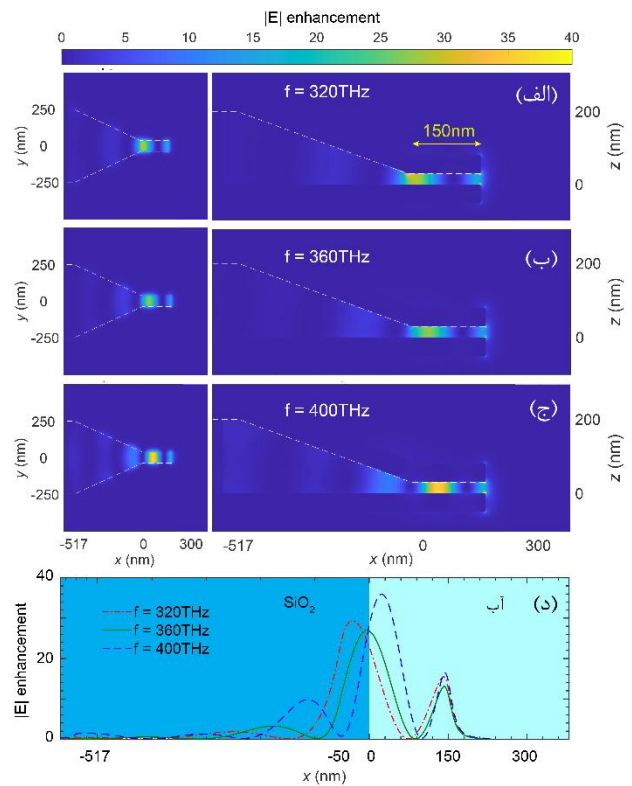
است. بررسی‌ها نشان داده است که مد پادمتقارن یک ( $AS^{1st}$ ) نسبت به دیگر مدها ( $S^{1st}$  و  $AS^{2nd}$ ) به طور موثرتری می‌تواند منتشر شده و با بخش متمرکزکننده پلاسمونی کوپل شود [۱۱، ۱۲]. بنابراین در ادامه از این مد برای تحریک ساختار استفاده خواهیم کرد. لازم به ذکر است به منظور تحریک اولین مد پادمتقارن مطابق شکل ۲-الف، نور برخوردی باید در راستای محور  $y$  تقارن داشته و بتواند پروفایل میدانی به صورت فرد در راستای  $z$  ایجاد نماید. یکی از روش‌های تحریک این مد که در ساختار فلز-عایق-فلز [۱۱] آمده است تابش سمت چپ ساختار از بالا (در راستای  $-z$ ) با استفاده از نور متمرکز شده با قطبش  $x$  است.

#### ۲-۴- بررسی انتشار مدهای پلاسمونی در ساختار نانومترکزکننده پلاسمون

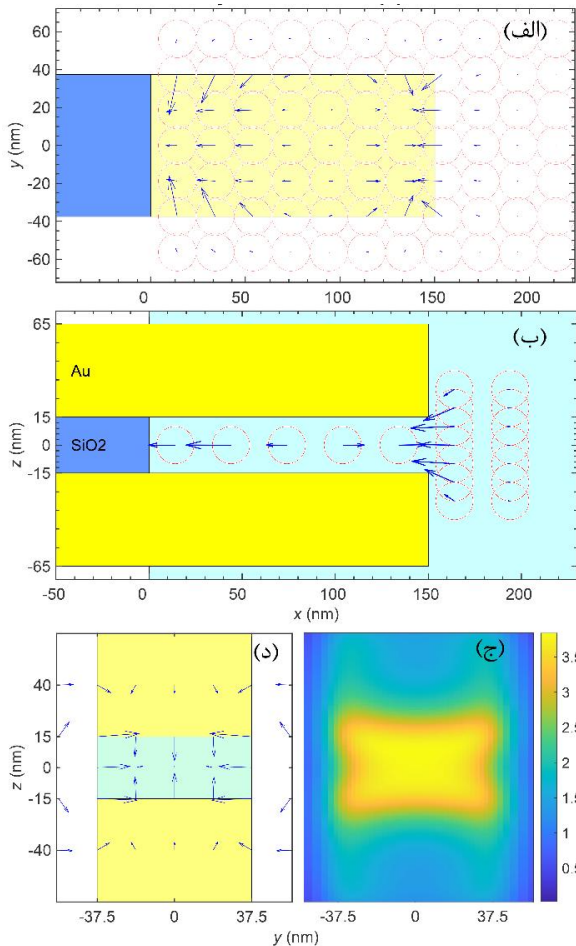
در این بخش به منظور بررسی انتشار مدهای پلاسمونی در ساختار نانومترکزکننده پلاسمون، به بررسی شدت افزایش میدان الکتریکی در صفحه  $x-z$  و  $x-y$  به ازای دو طول مختلف  $l_{tip}$  برابر ۱۵۰ و ۳۰۰ نانومتر به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ می‌پردازیم. در این شبیه‌سازی‌ها  $\theta$ ،  $w_{tip}$ ،  $l_{tip}$  و  $\Delta l_{tip}$  به ترتیب



شکل ۴- بررسی شدت میدان الکتریکی برای  $l_{tip}$  برابر ۳۰۰ نانومتر. (الف)، (ب) و (ج) شدت افزایش میدان الکتریکی در صفحه  $x-z$  (سمت راست) و  $x-y$  (سمت چپ) به ترتیب به ازای سه فرکانس ۳۲۰، ۳۶۰ و ۴۰۰ تراهرتز، (د) شدت میدان الکتریکی در مرکز ساختار  $y=z=0$  در راستای محور  $x$



شکل ۳- بررسی شدت میدان الکتریکی برای  $l_{tip}$  برابر ۱۵۰ نانومتر. (الف)، (ب) و (ج) شدت افزایش میدان الکتریکی در صفحه  $x-z$  (سمت راست) و  $x-y$  (سمت چپ) به ترتیب به ازای سه فرکانس ۳۲۰، ۳۶۰ و ۴۰۰ تراهرتز، (د) شدت میدان الکتریکی در مرکز ساختار  $y=z=0$  در راستای محور  $x$



شکل ۶- نیروهای اعمالی به ذره در صفحات مختلف: (الف) در صفحه  $x-y$ ، (ب) در صفحه  $x-z$ ، (ج) و (د) به ترتیب نیمرخ میدان و نیروی اعمالی در صفحه  $x-z$ .

توجه به عمیق تر بودن چاه پتانسیل مربوط به دومین تله پلاسمونی، با کاهش شدت توان ورودی می توان عمق چاه پتانسیل را به گونه ای طراحی کرد که امکان ایجاد تله پایدار توسط اولین تله تغییر کند. این ویژگی می تواند برای جابجایی ذره بین دو تله کاربرد داشته باشد.

برای بررسی دقیق تر مکان های تله در دیگر جهت ها، نیروهای پلاسمونی به ازای فرکانس نمونه ۳۶۰ تراهرتز با جابجایی نانوذره در مکان های مختلف در صفحه  $x-y$  و  $x-z$  محاسبه شده که نتایج در شکل ۶ نمایش داده شده است. شکل ۶-الف نشان می دهد ذره از نواحی پیرامون انبرک نوری به سمت مرکز انبرک در  $y=0$  منتقل می شود به این دلیل که اگر ذره در  $y < 0$  باشد نیروی  $F_y > 0$  به آن اعمال خواهد شد و بالعکس در صورتی که  $y > 0$  باشد نیروی  $F_y < 0$  به آن اعمال خواهد شد. بنابراین نقطه تعادلی همیشه در  $y=0$  است که نیروهای پلاسمونی در راستای  $x$  و  $y$  صفر می شوند. شکل ۶-ب نیز نشان می دهد ذره از نواحی پیرامون به سمت مرکز انبرک در  $z=0$  منتقل می شود. در صفحه  $x-z$  نیز با توجه به پروفایل میدان و نیروهای اعمالی (شکل ۶-ج و د)، ذره به نقطه با حداکثر میدان برهمکنشی یعنی  $z=0$  منتقل می شود.

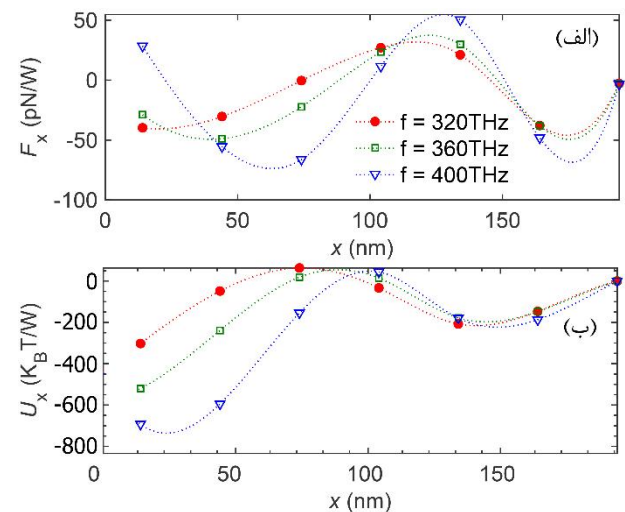
#### ۴-۴- بررسی قابلیت حسگری انبرک نوری

شکل ۷ مقدار تغییرات نرمال شده توان انعکاس یافته امواج پلاسمونی ( $R$ ) را هنگامی که نانوذرات با ضرایب شکست مختلف ( $n$ ) در داخل نوک ساختار قرار می گیرند، نشان می دهد. در این تحلیل توان انعکاس یافته هنگامی که ذره در مکان تعادلی قرار دارد ( $R$ ) محاسبه شده و تغییرات آن به توان انعکاسی در

توان نور ورودی می توان حالتی را انتخاب نمود که فقط قله دوم منجر به تله اندازی نانوذرات شود که این قله با تغییر فرکانس قابلیت جابجایی بیش تری (معادل  $\sim 24\text{nm}$  - مابین دومین قله میدان از لبه ساختار به ازای فرکانس ۴۰۰ تراهرتز تا مجاورت لایه  $\text{SiO}_2$ ) دارد. با افزایش  $l_{\text{tip}}$  به ۳۰۰ نانومتر همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است علاوه بر افزایش تعداد نقاط قله میدان (مکان های تعادلی) به سه نقطه، قابلیت جابجایی نانوذرات با تغییر فرکانس نیز به  $\sim 171\text{nm}$  افزایش می یابد. بنابراین با تغییر کنترل شده فرکانس نور برخوردی می توان نانوذرات را به طور کنترل شده جابجا نمود. برای بررسی دقیق تر این قابلیت، در بخش بعد به بررسی نیروهای پلاسمونی خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است برای کاهش زمان و حجم محاسبات در ادامه  $l_{\text{tip}}$  را ۱۵۰ نانومتر در نظر خواهیم گرفت.

#### ۴-۳- بررسی نیروهای پلاسمونی

جهت تصدیق قابلیت تله اندازی ساختار پیشنهادی، در این بخش با قراردادن یک نانوذره از جنس پلی استایرن (PS) به شعاع ۱۰ نانومتر، به بررسی نیروهای اعمالی به آن در مکان های مختلف و به ازای فرکانس های مختلف می پردازیم. ذره پلی استایرن در فرکانس های ۳۲۰، ۳۶۰ و ۴۰۰ تراهرتز به ترتیب با ضریب شکست های  $1.5740$ ،  $1.5770$  و  $1.5803$  مدل شده است. شکل ۵ نیروی اعمالی نرمال شده به توان منبع ورودی در راستای  $x$  ( $F_x$ ) و انرژی پتانسیل راستای  $x$  ( $U_x$ ) را هنگامی که ذره در مرکز ساختار  $y=0$  قرار دارد نشان می دهد. در خارج از انبرک نوری ( $x < 150$  نانومتر) نیروهای پلاسمونی در جهت  $-x$  به ذره اعمال می شود که منجر به جذب نانوذره به داخل انبرک نوری می شود. اولین مکان تله اندازی (حداقل انرژی پتانسیل) برای فرکانس های ۳۲۰، ۳۶۰ و ۴۰۰ تراهرتز تقریباً به ترتیب برابر ۱۴۱، ۱۴۵ و ۱۴۹ نانومتر است که از تغییرات اندکی برخوردار است. تنها در فرکانس ۴۰۰ تراهرتز که موج ایستای ایجاد شده ناشی از انعکاس مد پلاسمونی از لبه نوک ساختار طول موج کمتری دارد و قله آن داخل آب می باشد، می تواند تقریباً در  $x$  برابر ۲۳ نانومتر با انرژی پتانسیل  $740\text{K}_B T/W$  ذره را به دام اندازد. تغییر فرکانس به ۳۲۰ یا ۳۶۰ منجر به حذف این تله و انتقال ذره به مجاورت لایه اکسید می شود زیرا در فرکانس های مذکور حداقل انرژی پتانسیل در مجاورت لایه اکسید است. بنابراین ذره می تواند بین دو مکان تله با تغییر فرکانس به صورت نانومتری جابجا شود. با

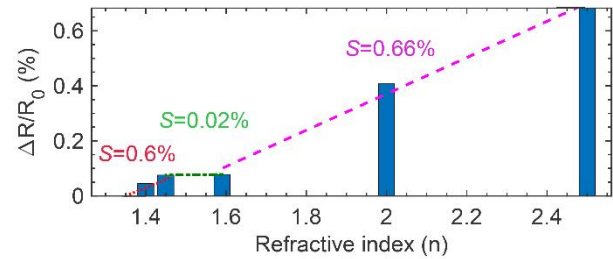


شکل ۵- (الف) نیروی پلاسمونی در راستای  $x$  اعمال شده به نانوذره پلی استایرن به شعاع ۱۰ نانومتر هنگامی که ذره در مرکز ساختار  $y=0$  و در راستای  $x$  جابجا می شود، (ب) انرژی پتانسیل راستای  $x$



شبیه‌سازی نشان می‌دهد حساسیت تغییرات توان انعکاس یافته به تغییرات ضریب شکست  $S = \Delta R_{\square} / \Delta n$  در بازه‌های مختلف ضریب شکست متفاوت است. در بازه  $1/45 < n < 1/33$  حساسیت برابر  $0.6\% \sim$  است. پس از آن در بازه  $1/6 < n < 1/45$  به مقدار  $0.2\% \sim$  کاهش می‌یابد و سپس در بازه  $1/6 < n < 1/45$  به  $0.66\% \sim$  افزایش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده، حداکثر حساسیت ساختار پیشنهادی به تغییرات ضریب شکست (ضریب شکست بهینه) به ازای نانوذرات با ضریب شکست در بازه  $1/33 < n < 1/45$  و  $1/6 < n < 1/45$  است. لازم است اشاره کنیم اگرچه این تغییرات اندک است اما می‌تواند به عنوان یک قابلیت ثانویه در ساختار پیشنهادی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین لازم به ذکر است شعاع نانوذره در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی‌ها فقط ۱۰ نانومتر است.

جدول ۱ خلاصه‌ای از مشخصات عملکردی و ساختاری برخی از انبرک‌های نوری مرتبط با انبرک نوری طراحی شده در این مقاله را نشان می‌دهد. مقالات مرتبط به ترتیب سال انتشار مرتب شده‌اند. در این جدول واحد طول موج، توان، شدت و شعاع ذره به ترتیب  $mW/\mu m^2$ ،  $mW/nm$  و  $nm$  است. همان‌طور که در



شکل ۷- تغییرات توان انعکاس یافته بر حسب ضریب شکست نانوذره به دام افتاده به شعاع ۱۰ نانومتر به همراه منحنی برازش شده در سه بازه مختلف ضریب شکست

حالتی که ذره‌ای در داخل کانال وجود ندارد ( $R_0$ ) نرمال شده است ( $R_{\square} = (R - R_0) / R_0$ ). علت انتخاب ضرایب شکست متفاوت در این تحلیل بررسی قابلیت انبرک نوری در تشخیص نانوذرات مختلف است. نتایج نشان می‌دهد توان انعکاس یافته تابعیت ضریب شکست ماده را دارد و با افزایش ضریب شکست به دلیل افزایش سطح مقطع تسخیر<sup>۹</sup> نانوذره،  $R_{\square}$  افزایش می‌یابد. همچنین نتایج

جدول ۱- مقایسه مشخصات عملکردی و ساختاری برخی از انبرک‌های نوری مرتبط با انبرک نوری طراحی شده

معیار	مزایا	انرژی پتانسیل تله	مشخصات ذره		مشخصات منبع			ساختار	پارامتر
			جنس	شعاع	شدت	توان	طول موج		
ابعاد بزرگ ذره و محدودیت در کاهش عرض موجبر	ساختار ساده و قابلیت جایجایی ذرات به صورت پیوسته	$U_x = 192$ $K_B T$	PS	۵۰۰	۴۰	--	۹۸۰	نوار طلا به عرض ۱ و ۲ $\mu m$	[۱۴]
جایجایی ذرات به صورت گسسته و افزایش پیچیدگی ساخت	قابلیت جایجایی ذرات	۲۲۰ $K_B T/W$	PS	۲۰	--	--	۱۳۲۰ ۱۴۵۰ ۱۵۸۰	موجبر سیلیکونی و تله‌های پلاسمونی	[۱۶]
افزایش پیچیدگی فرایند ساخت در مقایسه با ساختار نوری و شیاری	افزایش نیروی تله‌اندازی به میزان ۱۴ مرتبه در مقایسه با ساختار موجبر نوری و قابلیت تله‌اندازی ذرات نانومتری	$3/84$ $99/6$ $K_B T/W$	PS	۵ ۲۰	--	--	۱۵۵۰	موجبر شیار ۷ شکل	[۷]
افزایش پیچیدگی ساخت	قابلیت تله‌اندازی ذرات بدون تماس فیزیکی و قابلیت جایجایی ذره	۱۷۸ $K_B T/W$	Si	۲۰۰	--	۱	۱۵۵۸ ~	بلور فوتونی	[۸]
ابعاد بزرگ ذره و محدودیت در کاهش عرض موجبر	قابلیت به دام انداختن چندین ذره و مطالعه برهمکنش‌های بین ذرات	$U_z = 5$ $K_B T / (mW/\mu m^2)$	PS	۵۰	--	--	۶۵۰ و ۶۸۰	نوار طلا به عرض ۴ $\mu m$	[۲۰]
افزایش پیچیدگی ساخت	قابلیت جایجایی و آشکارسازی نانوذرات	$20-10$ $K_B T$	PS	۲۰	-۱۸ ۱۹۱	--	-۵۴۴ ۸۶۱	نانوحفره در لایه طلا	[۲۲]
افزایش پیچیدگی ساخت	قابلیت جایجایی پیوسته و گسسته نانوذرات با تغییر ولتاژ (بدون تغییر شدت نور ورودی) و قابلیت موازی‌سازی و کنترل مجزای تله‌های نوری	$U_x = 6/5$ $U_z = --$ $U_x = 0/0.1$ $U_z = 20$ $K_B T / (mW/\mu m^2)$	PS	۲۵	--	--	۸۴۰۰ ~	صفحه گرافن	[۲۴]
			PS	۵۰	--	--	۷۸۰۰ ~	نوار گرافن	
افزایش پیچیدگی ساخت	قابلیت تحصیر نور در ابعاد کوچکتر و نیز افزایش شدت نور در مقایسه با ساختار نوری، ایجاد قابلیت تله‌اندازی نانوذرات کوچکتر و حسگری نانوذرات	$U_x = 740$ $K_B T/W$	PS	۱۰	--	--	۷۵۰- ۹۳۷	نوار طلا با عرض متغیر تا ۳۰ نانومتر	این مقاله

<sup>۹</sup> Capture cross section

[5] C. J. Bustamante, Y. R. Chemla, S. Liu, and M. D. Wang, "Optical tweezers in single-molecule biophysics", *Nat. Rev. Methods Prim.* vol. 1, no. 1, pp. 1-25, 2021.

[۶] سارا سجادیان، محمد سروش، کریم انصاری اصل، «پیشنهاد یک طرح جدید به منظور افزایش بازده دیود گسیل نور گالیوم نیتراید مبتنی بر بلور فوتونی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۸، شماره ۳، صفحات ۱۱۷۹-۱۱۸۵، ۱۳۹۷.

[7] M. Sahafi and A. Habibzadeh-Sharif, "Robust increase of the optical forces in waveguide-based optical tweezers using V-groove structure", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 35, no. 8, pp. 1905-1909, 2018.

[8] M. Sahafi and A. Habibzadeh-Sharif, "Contactless optical trapping and manipulation of nanoparticles utilizing SIBA mechanism and EDL force", *Opt. Express*, vol. 27, no. 20, pp. 28944-28951, 2019.

[9] M. Sahafi and A. Habibzadeh-Sharif, "All-optical trapping, relocation, and manipulation of nanoparticles using SOI ring resonators", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 36, no. 8, pp. 2178-2183, 2019.

[۱۰] مهدیه بزرگی و محمود رفائی بوکت، «لنز فراسطح پلاسمونی مسطح آرایش پذیر با استفاده از ماده ناهمسانگرد  $TiO_2$ : طراحی و شبیه سازی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۵۲، شماره ۴، صفحات ۲۳۷-۲۴۰، ۱۴۰۱.

[11] H. Choo, M. K. Kim, M. Staffaroni, T. J. Seok, J. Bokor, S. Cabrini, P. J. Schuck, M. C. Wu, and E. Yablonovitch, "Nanofocusing in a metal-insulator-metal gap plasmon waveguide with a three-dimensional linear taper", *Nat. Photonics*, vol. 6, no. 12, pp. 838-844, 2012.

[12] M. Hasanpour and M. Ghorbanzadeh, "Investigation of plasmonic mode coupling of two gold nano-strips", *The 28th Iranian Conference on Optics and Photonics, ICOP (2022)*, 2022.

[13] M. L. Juan, R. Gordon, Y. Pang, F. Eftekhari, and R. Quidant, "Self-induced back-action optical trapping of dielectric nanoparticles", *Nat. Phys.* vol. 5, no. 12, pp. 915-919, 2009.

[14] K. Wang, E. Schonbrun, P. Steinvurzel, and K. Crozier, "Scannable plasmonic trapping using a gold stripe", *Nano Lett.* vol. 10, no. 9, pp. 3506-3511, 2010.

[15] M. Ghorbanzadeh, M. Moravvej-Farshi, and S. Darbari, "Designing a plasmonic optophoresis system for trapping and simultaneous sorting/counting of micro- and nano-particles", *J. Light. Technol.* vol. 33, no. 16, pp. 3453-3460, 2015.

[16] G. Wang, Z. Ying, H. Ho, Y. Huang, N. Zou, and X. Zhang, "Nano-optical conveyor belt with waveguide-coupled excitation", *Opt. Lett.* vol. 41, no. 3, pp. 528-531, 2016.

[17] M. Ghorbanzadeh, S. Darbari, and M. Moravvej-Farshi, "Graphene-based plasmonic force switch", *Appl. Phys. Lett.* vol. 108, no. 12, p. 111105, 2016.

[18] M. Ghorbanzadeh, S. Jones, M. K. Moravvej-Farshi, and R. Gordon, "Improvement of sensing and trapping efficiency of double nanohole apertures via enhancing the wedge plasmon polariton modes with tapered cusps", *ACS Photonics*, vol. 4, no. 5, pp. 1108-1113, 2017.

[19] M. Ghorbanzadeh, M. Moravvej-Farshi, and S. Darbari, "Plasmonic optophoresis for manipulating, in Situ position monitoring, sensing, and 3-D trapping of micro/nanoparticles", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* vol. 23, no. 2, pp. 185-192, 2017.

[20] M. Ghorbanzadeh and S. Darbari, "Efficient plasmonic 2D arrangement and manipulation system, suitable for controlling particle-particle interactions", *J. Light. Technol.* vol. 37, no. 9, pp. 2058-2064, 2019.

[21] M. Ghorbanzadeh, "Numerical investigation of high-speed electrically reconfigurable plasmofluidic channels for particle manipulation", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 37, no. 10, pp. 2830-2838, 2020.

[22] P. Alibeigloo, M. Ghorbanzadeh, and M. K. Moravvej-Farshi, "Repositioning of plasmonic hotspots along the sidewalls of conical nanoholes: a numerical investigation", *OSA Contin.* vol. 3, no. 10, pp. 2817-2829, 2020.

[23] M. Ghorbanzadeh, "Numerical investigation of bidirectionally tunable, nanometer-precise, and compact tweezers for screening gold

این جدول آمده است در سال های اخیر اغلب به ازای افزایش پیچیدگی فرآیند ساخت انبرک نوری، قابلیت های آن افزایش یا بهبود یافته است. به طور کلی انبرک نوری طراحی شده در این مقاله در مقایسه با دیگر گزارش ها از ویژگی هایی مانند تحویل نور در ابعاد کوچک تر، افزایش شدت نور در مقایسه با ساختار نوری، ایجاد امکان تله اندازی نانوذرات کوچک تر، حسگری نانوذرات و نیز ایجاد چاه پتانسیل قوی بهره می برد. باید اشاره کنیم ساختار پیشنهادی از پیچیدگی بالاتری در فرآیند ساخت نسبت به دیگر گزینه ها از جمله [۷، ۱۴، ۲۰] برخوردار است.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی و شبیه سازی یک انبرک نوری مبتنی بر جفت شدگی پلاسمون های سطحی دو نوار طلا و نیز متمرکزسازی آن پرداختیم. این افزاره به دلیل ساختار مخروطی شکل خود و بهره گیری از خواص پلاسمونی قادر به نانومتمرکزسازی و در نتیجه افزایش شدت میدان الکترومغناطیسی ( $\sim 40$  مرتبه) است. با محاسبه نیروهای نوری و انرژی پتانسیل نشان دادیم نانوذرات در این ساختار می توانند در مکان های تعادلی به دام انداخته شوند. نشان دادیم علاوه بر قابلیت جایابی مکانیکی انبرک نوری برای جایابی نانوذرات، با تغییر فرکانس نور برخوردی نیز می توان نانوذرات را جابجا نمود. افزایش طول انتهایی ساختار منجر به افزایش تعداد مکان های تله و نیز افزایش محدوده جایابی نانوذرات می شود. به عنوان مثال در فرکانس ۴۰۰ تراهرتز به ازای  $l_{tip}$  برابر ۱۵۰ و ۳۰۰ نانومتر، به ترتیب تعداد نقاط تله برابر دو و سه و بازه جایابی نانوذرات برابر ۲۳ و ۱۷۱ نانومتر است. همچنین نشان دادیم توان انعکاس یافته در ساختار پیشنهادی تابعیت ضریب شکست ماده را دارد و می توان از آن برای آشکارسازی نانوذرات استفاده نمود. حساسیت تغییرات توان انعکاس یافته به تغییرات ضریب شکست در بازه های مختلف ضریب شکست متفاوت بوده و در بازه  $1/45 < n < 1/33$  و  $1/6 < n < 2/6$  حساسیت بالاتری ( $\sim 1/6$ ) دارد. ساختار پیشنهادی در ازای افزایش پیچیدگی فرآیند ساخت، به دلیل بهره گیری از سازوکار نانومتمرکزسازی، از ویژگی هایی از جمله: قابلیت تحویل پلاسمون ها در ابعاد کوچک، افزایش شدت امواج پلاسمونی، ایجاد امکان تله اندازی نانوذرات با ابعاد کوچک، قابلیت جایابی نانوذرات، قابلیت حسگری نانوذرات و نیز ایجاد چاه پتانسیل قوی، بهره می برد. ما بر این باوریم این ساختار می تواند در حوزه های مختلف مانند علوم زیستی برای مطالعه و جایابی نانوذرات کاربرد داشته باشد. به عنوان مثال با استفاده از ساختار پیشنهادی می توان چندین نانوذره را در تله های نوری به دام انداخته و برهمکنش بین ذرات را در حالی که امکان جایابی نسبی ذرات نسبت به هم با تغییر فرکانس وجود دارد، مطالعه نمود.

## مراجع

[1] A. Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure", *Phys. Rev. Lett.* vol. 24, no. 4, pp. 24-27, 1970.

[2] M. Samadi, P. Alibeigloo, A. Aghili, M. A. Khosravi, F. Saeidi, S. Vasini, M. Ghorbanzadeh, S. Darbari, and M. K. Moravvej-Farshi, "Plasmonic tweezers: Towards nanoscale manipulation", *Opt. Lasers Eng.* vol. 154, no. January, p. 107001, 2022.

[۳] سیدناذر سیدریحانی، علی آزادبخت، الهام میرزاحسین، ملیکا متقیان، مهرداد بابایی، «اندازه گیری خواص ویسکوالاستیک گلوبول قرمز خون توسط انبرک نوری»، *مجله پژوهش فیزیک ایران*، جلد ۱۹، شماره ۱، صفحات ۱۰۱-۱۰۸، ۱۳۹۷.

[4] Y. Zhang, C. Min, X. Dou, X. Wang, H. P. Urbach, M. G. Somekh, and X. Yuan, "Plasmonic tweezers: for nanoscale optical trapping and beyond", *Light Sci. Appl.* vol. 10, no. 1, pp. 1-41, 2021.

بازگشتی لایه‌های تطبیق کامل جهت بهبود دقت روش تفاضل محدود حوزه زمان در سنجش از دور محیط‌های الکترومغناطیسی نامحدود دارای سطوح ناهموار تصادفی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۸، شماره ۱، صفحات ۴۲-۳۳، ۱۳۹۷.

nanoparticles", J. Opt. Soc. Am. B, vol. 38, no. 4, pp. 1235-1240, 2021.

[24] M. Rahnamafar and M. Ghorbanzadeh, "Sub-nanometer manipulation of multiple nanoparticles by non-uniformly back-gated graphene sheet/strips", J. Opt. Soc. Am. B, vol. 40, no. 5, pp. 1259-1266, 2023.

[۲۵] امیراشکان درویش، بیژن ذاکری گنتابی، نفیسه رادکانی، «کاهش اثر