

بررسی عوامل مؤثر بر روی حرکت چرخشی یک نانوذره فلزی در تله نوری

محسن صمدزاده و فائقه حاجی زاده *

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، ۱۱۵۹-۴۵۱۹۵، زنجان

پست الکترونیکی: hajizade@iasbs.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶)

چکیده

کنترل موقعیت و حرکت اجسام کوچک با کمک نور روشی جذاب برای دست‌ورزی نمونه‌های میکروسکوپی ظریف، مانند سلول‌های زیستی یا ذرات میکروسکوپی است. با کمک انبرک نوری می‌توان نانوذرات طلا را تله‌اندازی کرد و با کمک قطبش دایروی لیزر آن‌ها را با بسامد چند کیلوهرتز چرخاند. بررسی دقیق حرکت این ذرات، اندازه‌گیری برخی پارامترهای فیزیکی محیط اطراف مانند ضریب وشکسانی محیط و دما را امکان‌پذیر می‌سازد. در این مطالعه، دینامیک چرخشی ذرات در یک تله نوری دوبعدی و تغییر عوامل مؤثر روی آن، مانند توان لیزر، گشودگی عدسی کانونی‌کننده و وشکسانی محیط به صورت تجربی بررسی شده است. دینامیک چرخشی ذرات با دو روش متداول یعنی روش طیف توانی و خودهمبستگی حرکت ذره انجام شده است. نتایج بررسی سرعت چرخش برای ذرات ۴۰۰ نانومتری طلا نشان می‌دهد که بیشترین بسامد چرخش ذره در طول موج ۱۰۶۴ nm لیزر و در گشودگی عددی ۱، به مقدار ۱۴۷۰ دور برثانیه می‌رسد. از طرف دیگر نتایج تغییرات سرعت چرخش با تغییر وشکسانی محیط توافق خوبی با مبانی نظری دارد.

واژه‌های کلیدی: انبرک نوری، چرخش، طیف توانی، خودهمبستگی، نانوذرات فلزی

۱. مقدمه

یک باریکه نور با قطبش دایروی، حامل فوتون‌هایی با تکانه زاویه‌ای اسپینی است و به جسمی که این فوتون‌ها را جذب یا پراکنده کند، تکانه زاویه‌ای منتقل می‌کند. جذب تکانه زاویه‌ای نور برای اجسام ماکروسکوپی پیرامون ما تأثیر محسوسی ندارد، اما در ابعاد میکروسکوپی منجر به چرخش ذرات میکرومتری و نانومتری می‌شود [۱]. انبرک نوری با کانونی کردن نور لیزر در حد پراش، با کمک یک عدسی با گشودگی عددی بالا، به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تله‌اندازی ذرات در مقیاس میکرومتر و نانومتر عمل می‌کند و باعث انتقال بیشینه اندازه حرکت زاویه‌ای به این اجسام می‌شود. با چرخش اجسام در ابعاد میکروسکوپی می‌توان آن‌ها را به عنوان نانوموتور یا میکروموتورهای چرخشی در نظر گرفت که می‌توانند انرژی

شیمیایی، حرارتی یا الکترومغناطیسی را به حرکت مکانیکی در ابعاد میکروسکوپی تبدیل کنند و کاربردهای گسترده‌ای در زمینه نانورباتیک [۲]، دستکاری DNA [۳] و هم‌زدن دو سیال مختلف در میکروکانال [۴] دارند. نشان داده شده است که در تله‌اندازی نانوذرات طلای میله‌ای با قطبش دایروی و طول موجی نزدیک به طول موج تشدید پلاسمونی این ذرات می‌توان آن‌ها را در آب با سرعتی برابر با ۴۲ kHz چرخاند [۵]. سرعت چرخش ذرات به عواملی نظیر اندازه، شکل، جنس ذره، دما، و وشکسانی^۱ محیط اطراف بستگی دارد. حساسیت چرخش به این عوامل تاحدی است که می‌توان از تجزیه و تحلیل حرکت ذره چرخنده در تله نوری، تفاوت نانومتری در ضخامت لایه‌های نازک مانند ساختارهای مختلف DNA روی سطح ذره چرخنده را اندازه گرفت [۶].

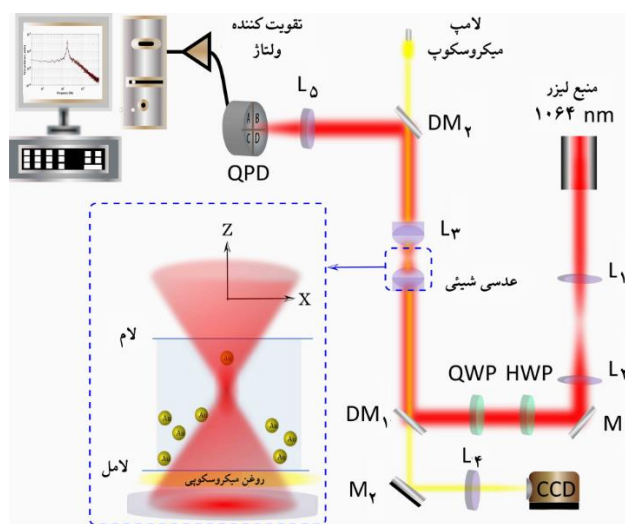
به همین دلیل یک ذره چرخنده در تله نوری مانند یک نانوحسگر عمل می‌کند که دقت بالایی برای اندازه‌گیری کمیت‌های مؤثر دارد.

در این پژوهش، ما چرخش نانوذرات طلا و حرکت براونی آنها را در تله نوری مطالعه کرده و اثر چند عامل مختلف مانند توان لیزر، گشودگی عددی و وشکسانی محیط اطراف را به صورت تجربی بررسی کرده‌ایم. نانوکره‌های فلزی در یک تله نوری به صورت دوبعدی تله‌اندازی می‌شوند و با استفاده از قطبش دایروی لیزر با بسامد بالا چرخانده می‌شوند. حرکت ذره در حال چرخش با استفاده از روش‌های خودهمبستگی^۱ زمانی و طیف توانی^۲ سیگنال نور پراکنده شده از ذره مطالعه می‌شود.

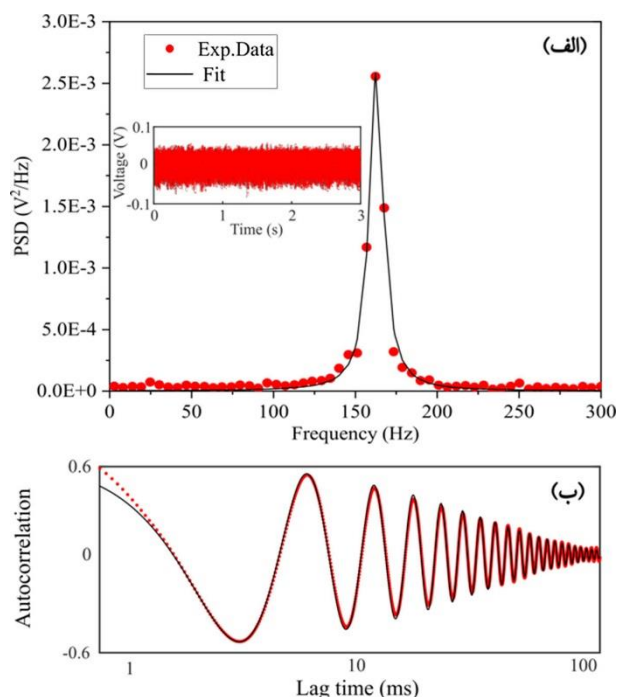
۲. چیدمان تجربی

شکل ۱ چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. این چیدمان شامل یک باریکه لیزر (Nd:YAG, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, Coherent) است که ابتدا توسط دو عدسی (L_1 و L_2) پهن و قطبش خطی آن بعد از عبور از دو تیغه نیم موج و ربع موج به قطبش دایروی تبدیل می‌شود. سپس این نور از طریق طریق عدسی شیئی (ZEISS, PlanApo, $63\times$, $NA = 0.7-1/4$, Oil کانونی می‌شود.

نمونه مورد مطالعه محلول نانوکره‌های طلا با قطر 400 nm در آب است که داخل محفظه‌ای ساخته شده با لام و لامل میکروسکوپی به ضخامت حدودی $100 \mu\text{m}$ تزریق می‌شوند. با توجه به این که ذرات طلا با این اندازه، جذب و پراکندگی بالایی دارند، قدرت تله نوری در راستای محوری ضعیف است و امکان تله‌اندازی سه‌بعدی آنها نیست. اما فشار تابشی لیزر روی این نانوذرات، باعث هل دادن آنها به سمت سطح لام (سطح بالایی داخل محفظه) می‌شود و آنها را می‌توان بین کانون لیزر و این سطح تله‌اندازی کرد. از طرف دیگر، قطبش دایروی نور لیزر باعث چرخش این ذرات می‌شود. مربع خط‌چین در شکل ۱ نحوه تله‌اندازی ذرات داخل نمونه را نشان



شکل ۱. طرحواره چیدمان آزمایشگاهی تله‌اندازی و چرخش ذرات. در این چیدمان L , M , DM , HWP , QWP ، و QPD به ترتیب عدسی، آینه، تیغه نیم موج، تیغه ربع موج و فوتودیود چهارتابی هستند. مربع خط چین تصویر بزرگ شده‌ای از داخل نمونه و تله‌اندازی ذرات توسط باریکه لیزر را نشان می‌دهد.



شکل ۲. (الف) نتایج تحلیل طیف توانی و (ب) نتایج تحلیل خود همبستگی از سیگنال فوتودیود برای یک نانوذره در حال چرخش در تله نوری (نقاط قرمز رنگ). نمودار پیوسته مشکی در (الف) برازش معادله (۲) به نتایج طیف توانی و در (ب) برازش معادله (۳) به نتایج خودهمبستگی را نشان می‌دهد. نمودار قرارداد شده در داخل قسمت (الف) ولتاژ افت‌وخیز حرکت ذره در حال چرخش را نشان می‌دهد که برحسب زمان رسم شده است.

برحسب زمان رسم شده است. برای بررسی و به دست آوردن اطلاعات چرخش از این نوع داده‌ها، همان‌طور که در قسمت مقدمه ذکر شد از دو روش طیف توانی و تابع خودهمبستگی برای بررسی چرخش ذرات استفاده شده است. شکل ۲ نتایج این دو نوع تجزیه و تحلیل را برای همان داده فوتودیود که در داخل شکل ۲ الف آمده است، نشان می‌دهد. در ادامه، در مورد این دو روش توضیحات بیشتر ارائه می‌شود.

۳. روش تحلیل داده‌ها

طیف توانی یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری قدرت تله نوری با استفاده از تبدیل فوریه از افت و خیز مکان ذره در تله نوری است. حالتی را در نظر بگیرید که یک ذره در تله نوری به دام افتاده است، ولی نمی‌چرخد. طیف توانی (مربع اندازه تبدیل فوریه زمانی) از مکان ذره‌ای که داخل یک چاه پتانسیل هارمونیک، حرکت براونی محدود شده دارد، به صورت زیر است [۸]:

$$|x(f)|^2 = \frac{(k_B T)}{(2\pi^2 \gamma (f_c^2 + f^2))}, \quad (1)$$

که $x(f)$ تبدیل فوریه زمانی از مکان ذره در تله نوری برحسب بسامد، k_B ثابت بولتزمن، T دمای سطح ذره، و $f_c = k/2\pi\gamma$ بسامد گوشه^۱ است. k سختی فنر تله نوری و γ ضریب نیروی کششی^۲ است. لازم به ذکر است که معادله (۱) از معادله لانژوین برای حالتی به دست آمده که بخش اینرسی به دلیل کوچک بودن حذف شده است. با برازش نتایج تجربی طیف توانی، به معادله (۱) برای ذره‌ای که در تله نوری نمی‌چرخد، می‌توان بسامد گوشه و سختی فنر تله نوری را به دست آورد. وقتی ذره در تله نوری بچرخد، معادله نظری شکل پیچیده‌تری خواهد یافت. اما تحلیل داده‌های تجربی برای یک نانوذره طلائی چرخنده در تله نوری نشان می‌دهد که اثر قله‌ای که ناشی از چرخش در طیف توانی ظاهر می‌شود، خیلی بزرگ‌تر از اندازه این طیف در بسامدهای دیگر است. شکل ۲ الف داده‌های طیف توانی از سیگنال فوتودیود (نقاط قرمز رنگ) از یک ذره در حال چرخش را در یک نمودار با مختصات خطی نشان

می‌دهد. نور لیزر بعد از تله‌اندازی به یک فوتودیود چهارتایی می‌رسد و چون از ذره در حال افت و خیز در تله نوری، پراکنده شده است، بنابراین اطلاعات حرکت براونی آن ذره در انحراف‌های جزئی لیزر وجود دارد. فوتودیود چهارتایی، که از چهار فوتودیود مستقل از هم تشکیل شده است، امکان ثبت تغییرات جزئی شدت را دارد و از طریق آن بسامد چرخشی این ذرات، و همینطور اطلاعات حرکت براونی ذرات را از ولتاژ خروجی فوتودیود می‌توان استخراج کرد. استفاده از فوتودیود چهارتایی امکان اندازه‌گیری افت و خیز مکان ذره با وضوح مکانی در حد نانومتر و وضوح زمانی در حد مگاهرتز را فراهم می‌کند. در این مطالعه، سری زمانی تغییرات شدت بر روی فوتودیود با سرعت 22 kHz به صورت ولتاژ آنالوگ داده‌گیری می‌شود و به وسیله یک کارت مبدل (PCI-6221, NI) به ولتاژ دیجیتال تبدیل و توسط کامپیوتر ثبت می‌شود. باید توجه داشت که ولتاژ اندازه‌گیری شده با کمک فوتودیود، که در صفحه فوریه جسم قرار گرفته است، به صورت خطی با جابه‌جایی ذره در تله نوری ارتباط دارد [۷].

برای مشاهده ذرات در تله، چیدمان انبرک نوری معمولاً بر روی یک میکروسکوپ چیده می‌شود. در قسمت میکروسکوپی برای مشاهده نانوذرات طلا قبل از ثبت داده توسط فوتودیود، از میکروسکوپ میدان تاریک استفاده می‌شود. برای ایجاد میکروسکوپی میدان تاریک، یک عدسی چگالنده (L^3) با محیط غوطه‌وری روغن و گشودگی عددی $1/4$ ، و با کمک یک قرص فلزی کوچک که در فاصله کانونی پشتی این عدسی قرار دارد، باعث می‌شود که نور لامپ میکروسکوپ به شکل مخروط توخالی وارد نمونه شود. این به گونه‌ای است که نور مستقیم لامپ وارد عدسی شیئی نمی‌شود و به این ترتیب نانو ذرات طلا به صورت نقاط روشن در پس‌زمینه تاریک دیده می‌شوند. اما هنگام داده‌گیری، این قرص از مسیر باریکه لیزر کنار گذاشته می‌شود تا اطلاعات افت و خیز ذره توسط لیزر به صورت کامل به فوتودیود چهارتایی برسد. نمودار قرار گرفته در داخل شکل ۲ الف نمونه‌ای از یک سری زمانی ولتاژ خروجی فوتودیود (داده خام) برای یک ذره در حال چرخش را نشان می‌دهد که

۱. Corner frequency

۲. Coefficient of viscous drag

که در آن $\tau = \hbar \pi \eta R^2 / (k_B T)$ ، زمان فروافت خودهمبستگی^۱، η و شکسانی دینامیکی سیال اطراف و R شعاع ذره است. باید توجه شود که این معادله برای شرایطی صادق است که در آن شرط $\hbar \pi \eta R^2 \tau / J \gg 1$ ، که در آن J ممان اینرسی کره است، برقرار باشد. در این بررسی با توجه به این که سرعت داده‌گیری 22 kHz (معادل $\tau \sim 45 \mu\text{s}$) است به اندازه قابل قبولی این شرط برآورده می‌شود و می‌توان از رابطه (۳) برای برازش به داده‌های خودهمبستگی شدت رسیده به فوتودیود استفاده کرد. بر اساس این معادله، اگر ذره در تله نوری نچرخد ($f_{rot} = 0$)، خودهمبستگی به صورت نمایی به سمت صفر افت می‌کند. وقتی ذره به کمک قطبش دایروی نور لیزر بچرخد، تابع خودهمبستگی آن به صورت کسینوسی با دامنه کاهشی نوسان می‌کند. از طرف دیگر، با افزایش دما یا کاهش شکسانی محیط خودهمبستگی سریع‌تر به سمت صفر میل می‌کند. علاوه بر آن با برازش رابطه (۳) به خودهمبستگی سیگنال آزمایشگاهی می‌توان بسامد چرخش و زمان فروافت خودهمبستگی را که به دما و ضریب اصطکاک چرخشی وابستگی دارد، استخراج کرد. شکل ۲. ب نتایج این نوع تحلیل را برای یک داده یکسان در شکل ۲. الف نشان می‌دهد. نقاط قرمز رنگ خودهمبستگی سیگنال و نمودار پیوسته مشکی برازش رابطه (۳) به داده‌ها است که به خوبی برازش شده است. از این برازش زمان فروافت خودهمبستگی و سرعت چرخش به ترتیب $0.36/0$ ثانیه و $162/0 \text{ Hz}$ به دست آمده است. توجه شود که سرعت چرخش به دست آمده از روش طیف توانی و روش خودهمبستگی باهم همخوانی دارند. البته این انتظار نیز وجود داشت، چون طیف توانی یک سری زمانی تبدیل فوریه تابع خودهمبستگی زمانی همان سیگنال است. از طرفی پهنای قله طیف توانی (Γ) به صورت رابطه $\Gamma = (\pi \tau)^{-1}$ با زمان فروافت رابطه دارد [۹]. این رابطه در مورد نتیجه به دست آمده از طیف توانی و تابع خودهمبستگی با دقت خوبی صدق می‌کند.

می‌دهد. برای تحلیل این داده‌ها، بهترین شکل تابعی که می‌توان در نظر گرفت یک تابع لورنتسی است [۹]. به همین دلیل تابعی به صورت زیر به داده‌های طیف توانی در بسامدهای نزدیک به این قله برازش می‌شود:

$$|x(f)|^2 = A + \frac{2B}{\pi} \left(\frac{\Gamma}{\Gamma^2 + (f - f_{rot})^2} \right), \quad (2)$$

که در آن A و B اعداد ثابت، f_{rot} بسامد چرخش، و Γ پهنای این تابع در نصف مقدار بیشینه است. نمودار پیوسته در شکل ۲. الف برازش داده‌های طیف توانی را به رابطه (۲) نشان می‌دهد که این برازش با چهار پارامتر آزاد ذکر شده انجام می‌شود. ولی لازم به ذکر است که فقط دو پارامتر f_{rot} و Γ در این بررسی مورد توجه هستند. همانطور که شکل ۲. الف نشان می‌دهد نمودار تابع لورنتسی از نظر محل قله (f_{rot}) و پهنای (Γ) به خوبی روی این داده‌ها برازش شده است. بسامد چرخش ذره در این اندازه‌گیری $162/9 \text{ Hz}$ و پهنای آن برابر با $10/2 \text{ Hz}$ است.

روش دیگر برای تحلیل داده‌ها، استفاده از خودهمبستگی شدت فرودی به فوتودیود است. دقت کنید که ذرات مورد استفاده در این بررسی با این که به صورت اسمی کروی هستند، اما سطح آنها در مقیاس نانومتر ناصاف است [۱۰]. به همین دلیل شدت نور پراکنده شده برای ذره کروی را که حول محور z در راستای عرضی می‌چرخد، می‌توان با معادله $I(t) = I_0 + I_1 \cos(\varphi)$ بیان کرد.

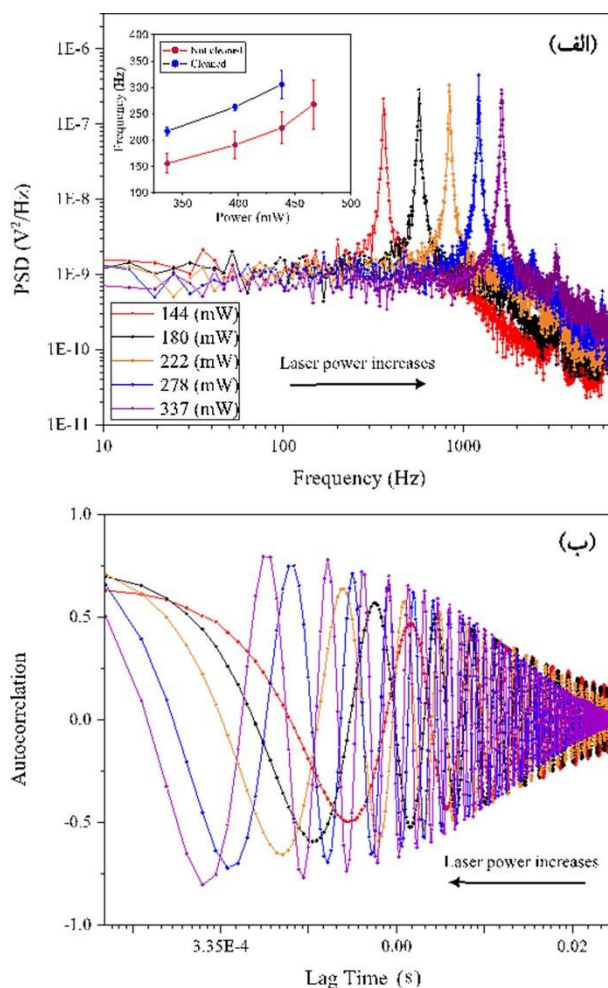
I_0 توسط شدت آشکار سازی شده توسط فوتودیود، I_1 دامنه افت و خیز شدت و φ زاویه جهت‌گیری ذره است. برای به دست آوردن خودهمبستگی شدت رسیده به فوتودیود، برای وقتی که ذره در حال چرخش است، باید ابتدا تابع توزیع جهت‌گیری ذره را برحسب زاویه φ و τ زمان دیرکرد^۱ به دست آورد. برای به دست آوردن این تابع توزیع از معادله فوکر-پلانک استفاده می‌شود که در یک شرایط حدی تابع خودهمبستگی، جواب این معادله به صورت زیر محاسبه می‌شود [۹ و ۱۱]:

$$C(\tau) = I_0^2 + \frac{I_1^2}{4} \exp[-\tau / \tau_c] \cos(\varphi \pi f_{rot} \tau), \quad (3)$$

۱. Lag time

۲. Autocorrelation decay time

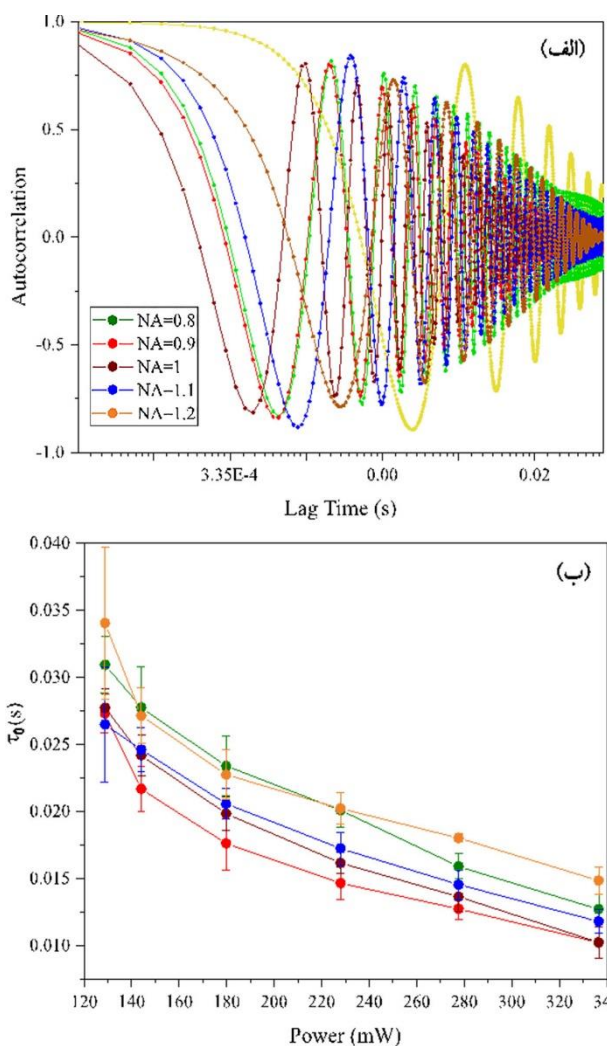
در بازه 144 mW تا 337 mW انجام شده است. در شکل ۳. الف داده‌های طیف توانی در مختصات لگاریتمی-لگاریتمی رسم شده است، بنابراین می‌توان افزایش یا کاهش جزئی در مقدار طیف توانی را بهتر تشخیص داد. اگر ذره در تله نوری نچرخد، با برازش نتایج تجربی طیف توانی به معادله (۱)، سختی فنر تله نوری به دست می‌آید. اما شکل ۳. الف نشان می‌دهد که اثر چرخش بر روی طیف توانی به صورت یک یا چند قله در نزدیکی بسامد گوشه، بسامدی که طیف توانی در آن تغییر شیب می‌دهد، روی آن سوار شده است. به همین دلیل نمی‌توان با حذف قله چرخش از محدوده برازش، بسامد گوشه را به دست آورد. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش توان لیزر سرعت چرخش و قدرت تله نوری بزرگ‌تر می‌شوند و در نتیجه نمودارهای طیف توانی به سمت بسامدهای بزرگ‌تر جابه‌جا می‌شوند. تحلیل همین داده‌ها با روش خودهمبستگی در شکل ۳. ب نشان داده شده است. با توجه به این که با افزایش توان لیزر و گرم شدن این ذرات به دلیل جذب، دمای روی سطح ذرات افزایش می‌یابد، مطابق با معادله (۳)، τ کوچک‌تر شده و نمودارهای خودهمبستگی زودتر به سمت صفر میرا می‌شوند. این نکته در داده‌های تجربی قابل مشاهده است و نشان می‌دهد که داده‌های تجربی همخوانی خوبی با رابطه نظری دارند. عامل دیگری که در انجام این پژوهش بررسی شده است، اثر تمیز کردن سطح لام است. با توجه به این که ذرات در نزدیکی سطح می‌چرخند و با وجود این که کاملاً به سطح نچسبیده‌اند، مشاهده شده است که در شرایط یکسان اگر سطح لام به کمک الکل تمیز شود، اندازه سرعت چرخش در توان لیزر یکسان، نسبت به زمانی که سطح تمیز نشده، عدد بزرگ‌تری است. این نشان می‌دهد که تمیز کردن سطح لام باعث از بین رفتن چربی‌ها و کثیفی‌های احتمالی روی سطح شیشه می‌شود، که با چشم قابل مشاهده نیستند، ولی باعث افزایش سرعت چرخش ذره در تله نوری می‌شود. نتایج این بررسی برای چند توان لیزر مختلف در نمودار قرار گرفته در داخل شکل ۳. الف آمده است. از این رو همه داده‌گیری در این بررسی، در نزدیکی سطح تمیز شده با الکل انجام شده است.



شکل ۳. اثر افزایش توان لیزر و تمیزی سطح بر روی سرعت چرخش نانوذره در تله نوری. (الف) افزایش توان لیزر بر روی طیف توانی و (ب) تابع خودهمبستگی زمانی از سیگنال نور پراکنده شده از ذره برای توان لیزر در بازه 144 mW تا 337 mW قبل از عدسی شیئی. جهت پیکان مشخص کننده جهت جابه‌جایی نمودارها با افزایش توان لیزر است. تصویر اضافه شده در قسمت الف، سرعت چرخش نانوذرات را در نزدیکی دو سطحی که یکی با الکل تمیز شده و دیگری تمیز نشده، و در چند توان مختلف نشان می‌دهد.

۴. بحث و بررسی نتایج

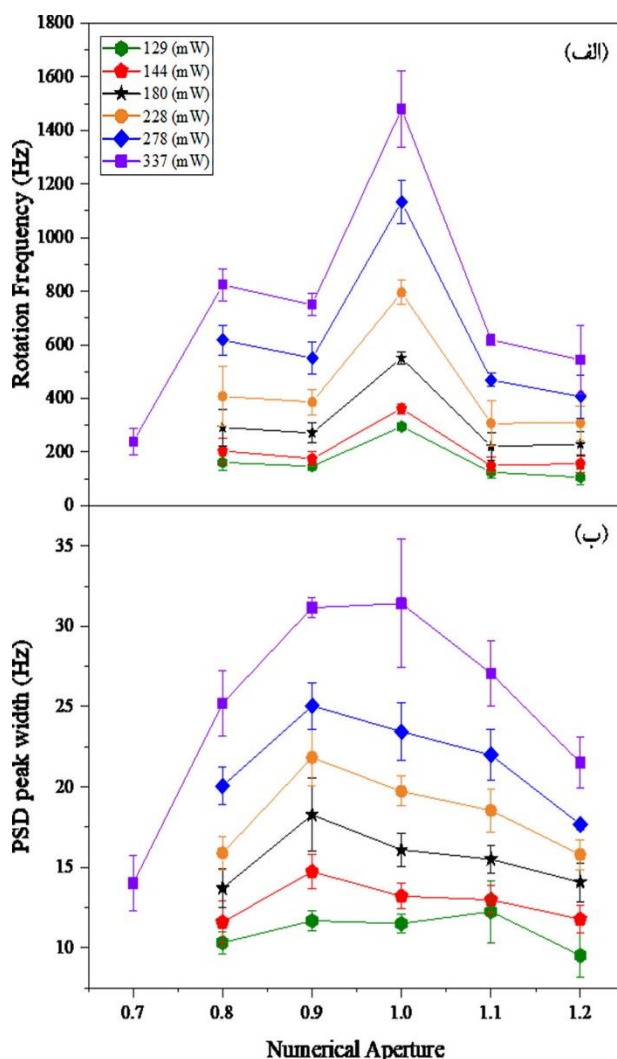
در این بخش به دنبال بررسی اثر عواملی مانند مقدار توان لیزر، گشودگی عدسی شیئی، و وشکسانی محیط بر روی حرکت چرخشی در تله نوری هستیم. نتایج بررسی افزایش توان لیزر بر روی حرکت ذره در حال چرخش با کمک دو روش تحلیل طیف توانی و خودهمبستگی زمانی در شکل ۳ آورده شده است. این داده‌گیری برای یک ذره در حال چرخش با پنج مقدار توان لیزر، اندازه‌گیری شده قبل از عدسی شیئی،



شکل ۵. اثر گشودگی عددی شیبی بر روی خود همبستگی سیگنال چرخش ذره. (الف) خودهمبستگی اندازه‌گیری شده در ۵ گشودگی عددی مختلف و (ب) زمان فروافت خودهمبستگی (τ_g) به دست آمده از برازش نمودارهای قسمت (الف) بر حسب توان لیزر و اندازه‌گیری شده با گشودگی عددی‌های مختلف.

از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که در بحث چرخش، گشودگی عددی بالاتر به معنی انتقال بیشتر اندازه حرکت زاویه‌ای به ذرات در تله نوری نیست.

در حالی که در بحث قدرت تله‌اندازی ذرات و انتقال اندازه حرکت خطی، اثر گشودگی عددی متفاوت است. چون قدرت تله‌اندازی نوری به گرادیان شدت وابسته است، گشودگی عددی بزرگ‌تر معادل لکه کانونی کوچک‌تر و قدرت تله نوری بزرگ‌تر در راستای عرضی و محوری است. البته مقدار هم‌پوشانی اندازه ذره و لکه کانونی در این نتیجه نیز مؤثر است.

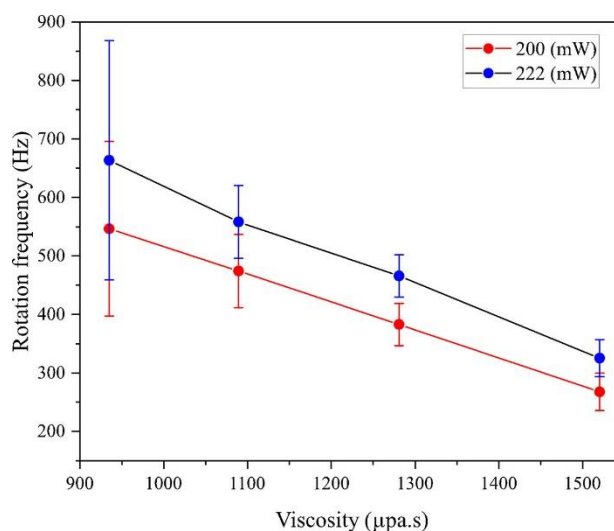


شکل ۴. نتایج اثر تغییر گشودگی عددی بر روی (الف) بسامد چرخش و (ب) پهنای بسامدی قله چرخشی که با استفاده از روش طیف توانی به دست آمده است.

در ادامه، اثر گشودگی عددی شیبی بر روی سرعت چرخش را بررسی کرده‌ایم. این نتایج در شکل ۴. الف نمایش داده شده است. هرکدام از نقاط در این نمودار متوسط داده‌گیری برای سه ذره و سه داده برای هر ذره است. برای این داده‌گیری توان قبل از عدسی شیبی ثابت نگه داشته شده و با باز و بسته‌کردن دریچه قابل تنظیم داخل عدسی مقدار گشودگی عددی را تغییر می‌دهیم. به این معنی که در توان لیزر یکسان، شدت رسیده به نمونه با کوچک شدن گشودگی عددی کاهش می‌یابد. با این وجود در نتایج شکل ۴. الف مشاهده می‌شود که بسامد چرخش در گشودگی عددی ۱ به صورت واضح خیلی بزرگ‌تر از بسامد چرخش در گشودگی عددی‌های بزرگ‌تر است.

است. شکل ۴. ب پهنای بسامدی قله‌های طیف توانی را بر حسب گشودگی عددی نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان دید، پهنای قله طیف توانی در گشودگی عددی‌های مختلف به صورت یک نمودار با یک بیشینه در گشودگی عددی‌های بین $0.9-1$ است. با توجه به این که پهنای قله طیف توانی برابر با $\Gamma = (\pi\tau_c)^{-1}$ است [۸] و از آنجا که در این رابطه همه پارامترها ثابت و فقط دما و ضریب وشکسانی محیط که خود وابستگی به دما دارد، تغییر می‌کند، این نشان می‌دهد که در یک گشودگی در بازه $0.9-1$ نسبت وشکسانی به دما به کمینه مقدار خود می‌رسد. برای بررسی بیشتر، داده‌گیری در چندین توان لیزر مختلف تکرار شده است و یک رفتار مشابه در توان‌های مختلف لیزر مشاهده می‌شود. تحلیل این داده‌ها با کمک تابع خودهمبستگی نیز انجام شده است. که نتایج در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۵. ب مشاهده می‌شود در گشودگی عددی‌های بین $0.9-1$ زمان فروافت خودهمبستگی در توان‌های مختلف کمترین مقدار را نشان می‌دهد که به معنی بزرگ شدن پهنای قله طیف توانی است و با نتایج شکل ۴. ب سازگاری دارد.

بسامد چرخش به وشکسانی محیط اطراف به طور وارون وابسته است [۱۰]؛ به طوری که با افزایش ضریب وشکسانی محیط، سرعت چرخش کاهش می‌یابد. برای بررسی این موضوع، چرخش نانوذرات طلا در محلول‌هایی از آب و گلیسرین با نسبت‌های حجمی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ اندازه‌گیری شد. وشکسانی دینامیکی این ترکیب‌ها از محلول گلیسرین و آب به ترتیب ۹۳۵، ۱۰۸۹، ۱۲۸۰ و $1520 \mu Pa.s$ است [۱۳]. شکل ۶ رفتار چرخش در وشکسانی متفاوت را نشان می‌دهد که سرعت چرخش با افزایش وشکسانی محیط به تدریج کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که جذب گلیسرین در طول موج لیزر مورد استفاده بسیار کم است [۱۴] و به همین دلیل تغییر سرعت چرخش مشاهده شده را می‌توان با تقریب خوبی فقط ناشی از جذب و گرم شدن نانوذره در نظر گرفت. از این خاصیت می‌توان برای اندازه‌گیری تغییرات موضعی وشکسانی محیط در مقیاس میکرومتر در یک سیال یا یک نمونه زیستی استفاده کرد.



شکل ۶. اثر وشکسانی محیط بر روی سرعت چرخش ذره. بسامد چرخش بر حسب وشکسانی مخلوط آب و گلیسرین با نسبت‌های مختلف، برای دو توان لیزر مختلف $200 mW$ و $222 mW$ قبل از عدسی شیئی رسم شده است.

۵. نتایج

شکل ۴. الف با نتیجه‌ای که در مطالعه قبلی برای بررسی بیشینه سرعت چرخش ذراتی از جنس بلور کلسیت با قطر حدودی $2/5 \mu m$ ، در تله نوری سه‌بعدی به دست آمده است، همخوانی دارد [۴]. به همین دلیل به نظر می‌رسد که در بحث چرخش میزان هم‌پوشانی اندازه ذره و لکه کانونی را نمی‌توان به عنوان عامل مؤثر دانست. احتمالاً افزایش انتقال اندازه حرکت را بتوان به حذف حاشیه سطح مقطع گوسی لیزر در گشودگی عددی نزدیک به ۱ نسبت داد.

بزرگ‌ترین بسامد چرخش در این بررسی با گشودگی عددی ۱ و مقدار $1479 Hz$ برای توان لیزر $337 mW$ قبل از عدسی شیئی اندازه‌گیری شده است. این بسامد چرخش خیلی بزرگ‌تر از بسامدهای چرخشی است که برای ذرات میکرومتری در آب گزارش شده است [۴]. با افزایش توان لیزر بیشتر از این مقدار به دلیل جذب این ذرات و افزایش دمای سطح آنها که باعث ذوب سطحی آنها می‌شود [۱۲]، معمولاً ذرات به سطح بالا می‌چسبند. از طرف دیگر در شکل ۴ می‌توان دید که حداقل توان لیزر برای چرخاندن این ذرات برای گشودگی عددی 0.7 مقدار $337 mW$ قبل از عدسی شیئی است که بیشتر از حداقل توان لیزر برای چرخاندن ذرات در گشودگی عددی‌های بالاتر

۵. جمع‌بندی

محیط مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در تلهٔ دوبعدی نیز مانند سه‌بعدی در گشودگی عددی نزدیک به ۱ بیشترین سرعت چرخش وجود دارد و به نظر می‌رسد که این نتیجه مستقل از هم‌پوشانی اندازهٔ ذره و لکهٔ کانونی دارد.

حرکت چرخشی میکروکرهٔ ۴۰۰ نانومتری طلا در تلهٔ نوری در نزدیک سطح بررسی شده است. در اینجا اثر پارامترهای مختلفی مانند گشودگی عددی، توان‌های مختلف لیزر، و اثر وشکسانی

مراجع

1. L Tong, V D Miljkovic', and M Käll, *Nano Lett.* **10** (2010) 268.
2. A A G Requicha, *Proc. IEEE* **91** (2003) 1922.
3. E Hasman, *Nat. Nanotechnol.* **5** (2010) 563.
4. M Hosseinzadeh, F Hajizadeh, M Habibi, H M Moghaddam, S Nader, S Reihani, *Appl. Phys. Lett.* **113** (2018) 223701.
5. L Shao, Z J Yang, D Andrén, P Johansson, and M Käll, *ACS Nano* **9** (2015) 12542.
6. H Šípová, L Shao, N O Länk, D Andrén, and M Käll, *ACS Photonics* **5** (2018) 2168.
7. F Gittes and C F Schmidt, *Opt. Lett.* **23** (1998) 7-9.
8. F Hajizadeh and S N S Reihani, *Opt. Exp.* **18** (2010) 551.
9. F Hajizadeh, L Shao, D Andrén, P Johansson, H Rubinsztein-Dunlop, and M Käll, *Optica* **4** (2017) 746.
10. A Lehmuskero, R Ogier, T Gschneidner, P Johansson, and M Käll, *Nano Lett.* **13** (2013) 3129.
11. S Chandrasekhar, *Rev. Mod. Phys.* **15** (1943) 1.
12. H Y Ma, P M Bendix, L B Oddershede, *Nano Lett.* **12** (2012) 3954.
13. N S Cheng, *Industrial & engineering chemistry research* **47** (2008) 3285.
14. W Zhang, L Zhan, T Xian, and L Gao, in *Journal of Lightwave Technology* **37** (2019) 3756.