

«مقاله پژوهشی»

## بررسی ویژگی‌های اپتیکی نانوذرات فلزی بیضوی شکل در مقیاس و محیط‌های دی الکتریک متفاوت

مجید ابراهیم زاده<sup>۱\*</sup>، معصومه سالکی<sup>۲</sup>

۱. دکتری فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۳۰

## Investigation of Optical Properties of Ellipsoidal Metal Nanoparticles at Different Scales and Dielectric Environments

M. Ebrahimzadeh<sup>\*1</sup>, M. Salaki<sup>2</sup>

1. Ph.D. of Physics, Shiraz University, Shiraz, Iran

2. M.A. of Physics, Payame Noor University

Received: 2020/04/04 Accepted: 2020/05/19

### Abstract

Plasmonic science has been noticed by researchers, with the increasing development of knowledge and technology in nanometer dimensions. Gold and silver ellipsoidal metal nanoparticles can exhibit unique optical properties due to their ellipsoidal structure with special symmetry and are therefore very suitable options for use in the new generation of optical sensors. Therefore, in this work, the optical properties of gold and silver metal ellipsoidal nanoparticles were simulated in different dielectric environments as well as in different sizes with using the MATLAB program. The results show that with increasing the diameter of the ellipsoidal nanoparticles (flattened state) of gold, the peak of the absorption, scattering and extinction spectra increases, which can be a good option for plasmonic applications and optical devices. Also, compared to ellipsoidal nanoparticles (elongated state), the absorption and extinction efficiencies intensity are higher and the scattering peak appears at higher wavelengths, while for the elongated state, ellipsoidal nanoparticles do not show such a case. Due to the small number of conducting electrons in nanoparticles and the homogeneous displacement of free charges within the nanoparticle, it is only the bipolar distribution of free charges that causes single peaks in the extinction and absorption spectrum of ellipsoidal gold and silver nanoparticles.

### Keywords

Nanoparticles, Gold, Silver, Simulation, Optical Properties, Plasmonic.

### چکیده

با گسترش روزافزون دانش و فناوری در ابعاد نانومتری، دانش پلاسمونیک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. نانوذرات فلزی بیضوی شکل طلا و نقره به دلیل ساختار بیضوی شکل با تقارن خاص، خواص اپتیکی منحصر به فردی را می‌توانند از خود نشان دهند؛ بنابراین گزینه‌های بسیار مناسبی جهت استفاده در نسل جدید حسگرهای نوری هستند. در این کار، خواص اپتیکی نانوذرات بیضوی شکل فلزی طلا و نقره در محیط‌های دی الکتریک متفاوت و همچنین در اندازه‌های مختلف با برنامه متلب شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر نانو ذرات بیضوی شکل (حالت پهن شده) طلا، قله طیف جذب، پراکندگی و خاموشی افزایش یافته است که مورد فوق می‌تواند گزینه خوبی برای کاربردهای پلاسمونیک و ادوات اپتیکی باشد. همچنین در مقایسه با نانوذرات بیضوی شکل (حالت کشیده) بازدهی جذب و خاموشی دارای مقدار بالاتری است و قله پراکندگی در طول موج‌های بالاتر ظاهر می‌شود؛ در حالی که برای حالت کشیده نانوذرات بیضوی شکل چنین موردی مشاهده نمی‌گردد. به دلیل کم بودن تعداد الکترون‌های رسانش در نانو ذرات و جابه‌جایی همگن بارهای آزاد در درون نانو ذره، تنها توزیع دو قطبی بارهای آزاد است که سبب ایجاد تک قله‌هایی در طیف خاموشی و جذب نانوذرات بیضوی شکل طلا و نقره می‌شود.

### واژگان کلیدی

نانوذرات، طلا، نقره، شبیه‌سازی، خواص اپتیکی، پلاسمونیک.

\*Corresponding Author: [physics1396@gmail.com](mailto:physics1396@gmail.com)

\* نویسنده مسئول: مجید ابراهیم‌زاده

## مقدمه

نانوساختارها به دلیل ویژگی‌های اپتیکی، الکترونی و مغناطیسی منحصر به فرد در زمینه‌های متفاوت علوم، همانند علوم پزشکی، زیست‌شناسی، الکترونیک، فوتونیک دیگر علوم مورد توجه قرار گرفته‌اند. از دیدگاه اپتیکی، چگونگی پراکندگی و جذب امواج الکترومغناطیسی به وسیله نانو ساختارها سبب پیدایش نظریه‌هایی همانند نظریه ریلی، ریلی-گانس و لورنز-مای شد. از آنجا که نظریه مای محدود به امواج تخت و نانو ساختارهای کروی بود، نظریه‌ای کامل‌تر به نام نظریه لورنز-مای تعمیم یافته برای توصیف اپتیکی نانو ساختارها پا به عرصه نهاد؛ این نظریه نیز مانند نظریه کلاسیکی لورنز-مای، یک روش حل روابط ماکسول است؛ با این تفاوت که این نظریه برای شکل‌های محدود دیگری غیر از اشکال کروی نانو ذرات که در مقابل امواج تخت و یا غیر تخت قرار می‌گیرند، قابل کاربرد است. با بهره‌گیری از این نظریه می‌توان سطح مقطع‌های پراکندگی، جذب و خاموشی نانو ساختارهای دربر گیرنده در این نظریه را مورد مطالعه قرار داد [۱۰-۱۱].

در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم میلادی، نظریه‌های گوناگونی از جمله نظریه ریلی در مورد اجسام بسیار کوچک و ارتباط آن با پراکندگی امواج الکترومغناطیسی مطرح شد. اما مهم‌ترین آنها، نظریه کلاسیکی لورنز-مای است [۱۴-۱۱]. این نظریه در مورد اجسام کروی، همگن و همسانگرد کوچکی است که از لحاظ ابعادی در حدود مرتبه طول موج فرودی و حتی کوچک‌تر از آن، کاربرد دارد و در محیطی با ویژگی‌های غیرجذبی و همگن قرار می‌گیرند. پس از اختراع لیزر و دیگر منابع امواج الکترومغناطیسی که تولید کننده امواجی متفاوت از امواج تخت و از الزامات نظریه کلاسیکی لورنز-مای است [۱۹-۱۵] و به کارگیری نانو ساختارهایی با شکل‌های گوناگون، نظریه کلاسیکی لورنز-مای دست‌خوش تغییرات شگرفی شد [۲۰]؛ تا آنجا که این نظریه به نظریه‌ای کامل‌تر برای اشکالی از نانو ساختارها مانند کروی، بیضوی و نیز برخی انواع امواج الکترومغناطیسی مانند تخت، کروی، گاؤس-هرمیتی و... تبدیل شد [۲۱]. این نظریه به نظریه لورنز-مای تعمیم یافته نامیده شد. از این رو در این مقاله به مطالعه ویژگی‌های اپتیکی نانوذرات بیضوی شکل در ابعاد و

محیط‌های دی الکتریک متفاوت با استفاده از روش بالا می‌پردازیم.

## تعریف پارامترهای ورودی

برای محاسبه ماتریس T و سطح مقطع‌های پراکندگی، جذب و خاموشی پارامترهای زیر در نظر گرفته می‌شود:

a: شعاع بیضی برحسب نانومتر - در طول محور x, y  
 c: شعاع دیگر بیضی برحسب نانومتر - در طول محور z

$K_1$ : بردار موج در محیطی که بیضی قرار گرفته است.  
 $S$ : ضریب شکست نسبی  
 در پارامترهای بالا،  $K_1$  نمایانگر بردار موج خارج از ذره است و ضریب شکست  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$  است.

$$K_1 = \frac{w}{c} \sqrt{\epsilon_1} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_1} \Rightarrow S = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}} \quad (1)$$

$\epsilon_2$  و S ممکن است که هر دو مختلط باشند.

## مراحل و تئوری شبیه‌سازی

برای استفاده از روش ماتریس T، هندسه مورد نظر ابتدا در مختصات کروی؛ سپس یک نقطه M با  $(r, \theta, \varphi)$  در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases} \begin{cases} r \geq 0 \rightarrow \\ 0 \leq \theta \leq \pi \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

ابتدا بیضی در مختصات کروی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$r(\theta) = \frac{ac}{\sqrt{a^2 \cos^2 \theta + c^2 \sin^2 \theta}}, \quad (3)$$

$$\frac{dr}{d\theta} = r_0 = \frac{a^2 - c^2}{a^2 c^2} r^3(\theta) \sin \theta \cos \theta$$

با خطی‌سازی معادلات پراکندگی، ضرائب بسط به صورت خطی با هم مرتبطند و می‌توان ۴ ماتریس زیر را تعریف کرد  $P = (n, m)$  که:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} &= -P \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} &= Q \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} &= T \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} &= R \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (۷)$$

هر بلوک در ماتریس دارای بعد  $N(N+2) \times N(N+2)$  که:

$$Q = \begin{pmatrix} Q^{11} & Q^{12} \\ Q^{21} & Q^{22} \end{pmatrix} \quad (۸)$$

روش معمول برای محاسبه ماتریس مای فوق روش شرایط مرزی بسط یافته است که عناصر ماتریسی  $P$  و  $Q$  به عنوان انتگرال‌های سطحی روی ذره به دست می‌آیند. در عمل، ضرائب بسط میدان ورودی ( $a$  و  $b$ ) شناخته شده است و میدان پراکندگی از  $T$  به دست می‌آید [۳۰-۲۶]. در حالی که میدان داخلی از  $R$  به دست می‌آید. از معادلات بالا:

$$T = -PQ^{-1}, \quad R = Q^{-1}$$

بنابراین ماتریس  $T$  شامل همه اطلاعات در زمینه پراکنده کننده یا ذره است.

که در این حالت دو نوع بیضی را می‌توان در نظر گرفت: بیضی کشیده شده  $a > c$  و بیضی پهن شده  $c > a$  که در حالتی که  $a=c$  باشد تبدیل به کره می‌شود.

$$h_{\text{aspect ratio}} = \frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{min}}} = \begin{cases} \frac{a}{c} & \text{بیضی کشیده} \\ \frac{c}{a} & \text{بیضی پهن شده} \end{cases} \quad (۴)$$

برای هندسه پراکندگی ذرات غیرکروی در هر دو نظریه مای و تی ماتریس، میدان‌ها در مجموعه‌ای از بردار توابع موج کروی بسط داده می‌شوند.

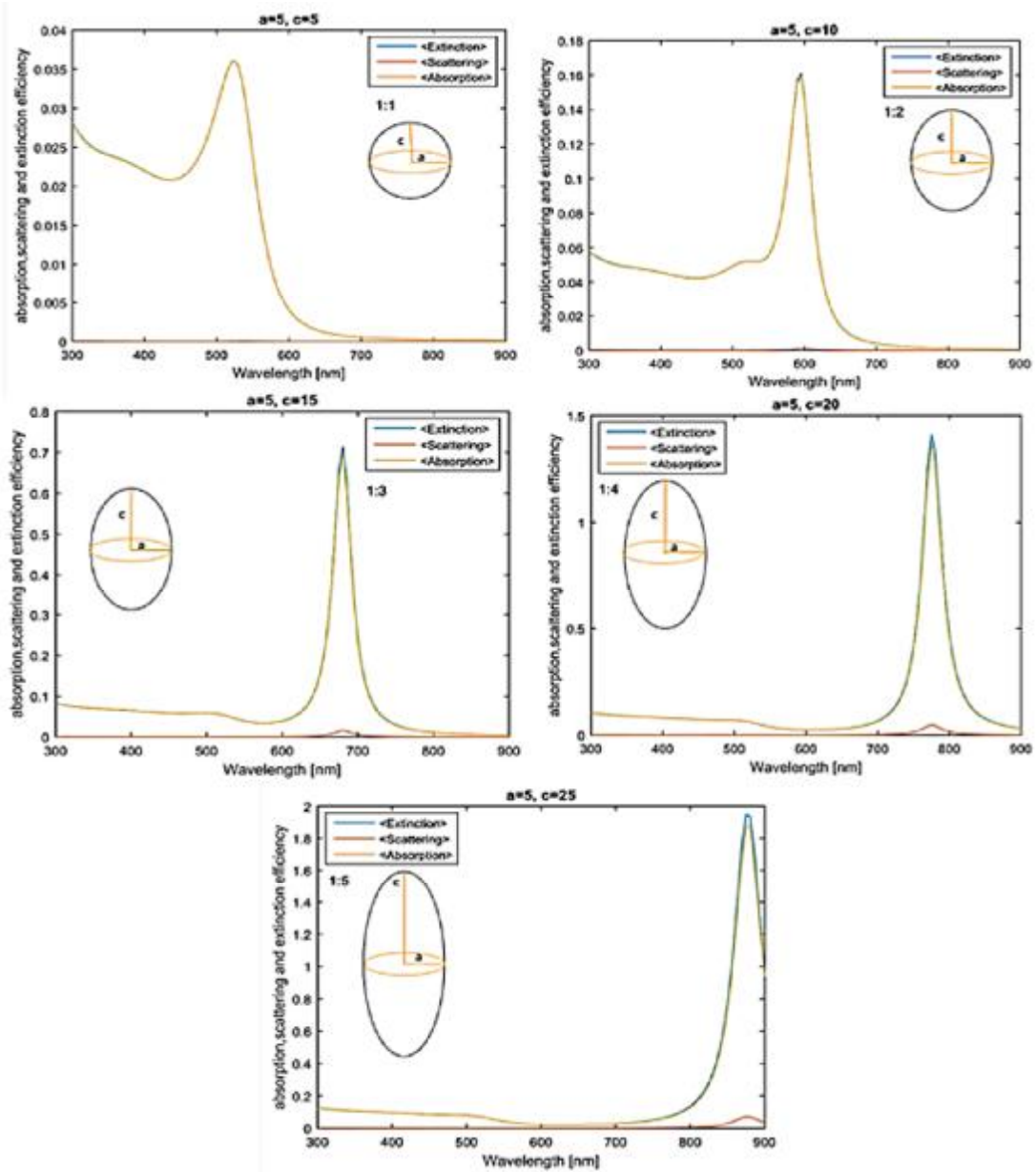
$$\begin{aligned} E_{\text{inc}} &= E_0 \sum_{n,m} a_{nm} \vec{M}_{nm}^{(1)}(K_1 \vec{r}) + b_{nm} N_{nm}^{(1)}(K_1 \vec{r}) \\ E_{\text{aca}} &= E_0 \sum_{n,m} p_{nm} \vec{M}_{nm}^{(3)}(K_1 \vec{r}) + q_{nm} N_{nm}^{(3)}(K_1 \vec{r}) \\ E_{\text{int}} &= E_0 \sum_{n,m} c_{nm} \vec{M}_{nm}^{(1)}(K_2 \vec{r}) + d_{nm} N_{nm}^{(1)}(K_2 \vec{r}) \end{aligned} \quad (۵)$$

میدان خارجی، جمع میدان پراکندگی و داخلی است [۲۵-۲۲].  $E_{\text{out}} = E_{\text{inc}} + E_{\text{sca}}$  که  $K_1$  بردار موج محیط و  $K_2$  بردار موج در ذره است.  $M^{(1)}$  و  $N^{(1)}$  که در میدان مغناطیسی و الکتریکی معمولی است و  $M^{(3)}$  و  $N^{(3)}$  میدان مغناطیسی و الکتریکی است. ضرائب  $m$  و  $n$  اشاره به تکانه زاویه‌ای کلی و تصویر شده دارد که به ترتیب

$$|m| \leq n, \quad n = 1, \dots, \infty$$

$$E_0 = 1$$

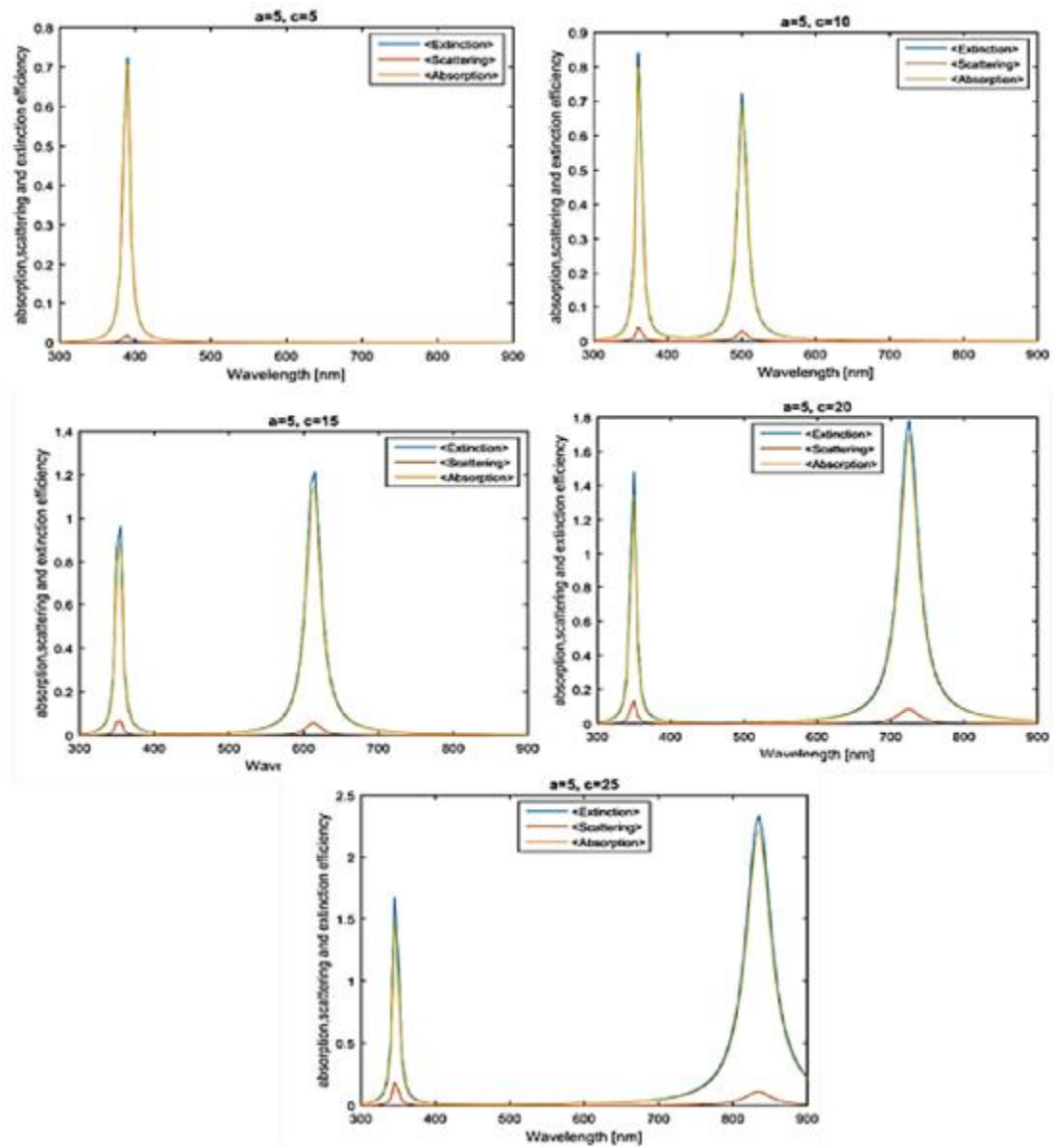
$$\vec{E}(r, t) = R_c(\vec{E}(r) e^{-i\omega t}) \quad (۶)$$



شکل ۱. نمودار تغییرات جذب، پراکندگی و خاموشی با طول موج نور مرئی برای نانوذرات بیضوی شکل (حالت بیضی کشیده) طلا در محیط دی الکتریک آب

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در محاسبه خواص اپتیکی نانوذرات بیضوی طلا و نقره

نقره	طلا	نماد	توضیح
۵۲	۴۲	$l$	طول مسیر آزاد میانگین الکترون‌ها (نانومتر)
$2.0/14 \times 10^{15}$	$2.0/17 \times 10^{15}$	$\omega_p$	فرکانس پلاسما (هرتز)
$1/39 \times 10^6$	$1/39 \times 10^6$	$v_F$	سرعت فرمی (متر بر ثانیه)
$1.0/49$	$1.9/32$	$\rho$	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)



شکل ۲. نمودار تغییرات جذب، پراکندگی و خاموشی با طول موج نور مرئی برای نانوذرات بیضوی شکل (حالت بیضی کشیده) نقره در محیط دی الکتریک آب

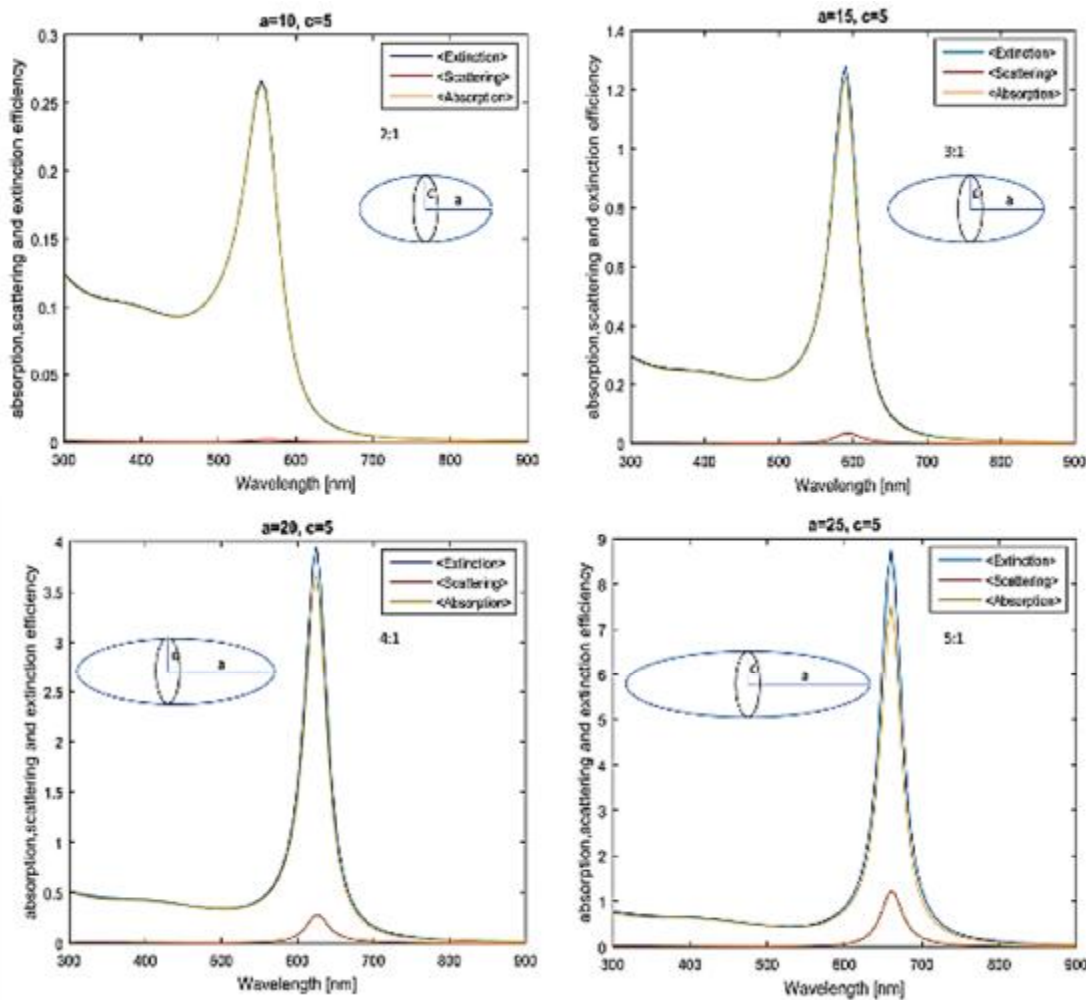
### یافته‌ها

در شکل ۱، ملاحظه می‌شود که نانو ذرات بیضوی شکل طلا با قطر کوچک ثابت پنج نانومتر و قطر بزرگ متغیر که به صورت دو برابر قطر کوچک در نظر گرفته شده است، دارای یک قله است که قلّه واقع شده در طول موج‌های نور مرئی، با افزایش قطر بزرگ بیضی به سمت طول موج‌های

خواص اپتیکی جذب، پراکندگی و خاموشی نانوذرات بیضوی شکل طلا و نقره در دو حالت کشیده و پهن شده با اندازه‌های متفاوت نمودار جذب، پراکندگی و خاموشی نانوذرات بیضوی شکل طلا در شرایط متفاوت نشان داده شده است.

نظر کرده باشد، تنها یک قله در طول موج‌های کوتاه در منحنی جذب و خاموشی دیده می‌شود. همچنین برای نانوذرات بیضوی نقره مشاهده می‌شود که به علت پراکندگی الکترون‌های آزاد در سطح نانو ذرات نقره بازدهی جذب با افزایش قطر بزرگ پهن‌تر می‌شود. از آنجایی که قطر کوچک نسبت به قطر بزرگ در مقایسه با مسیر آزاد میانگین

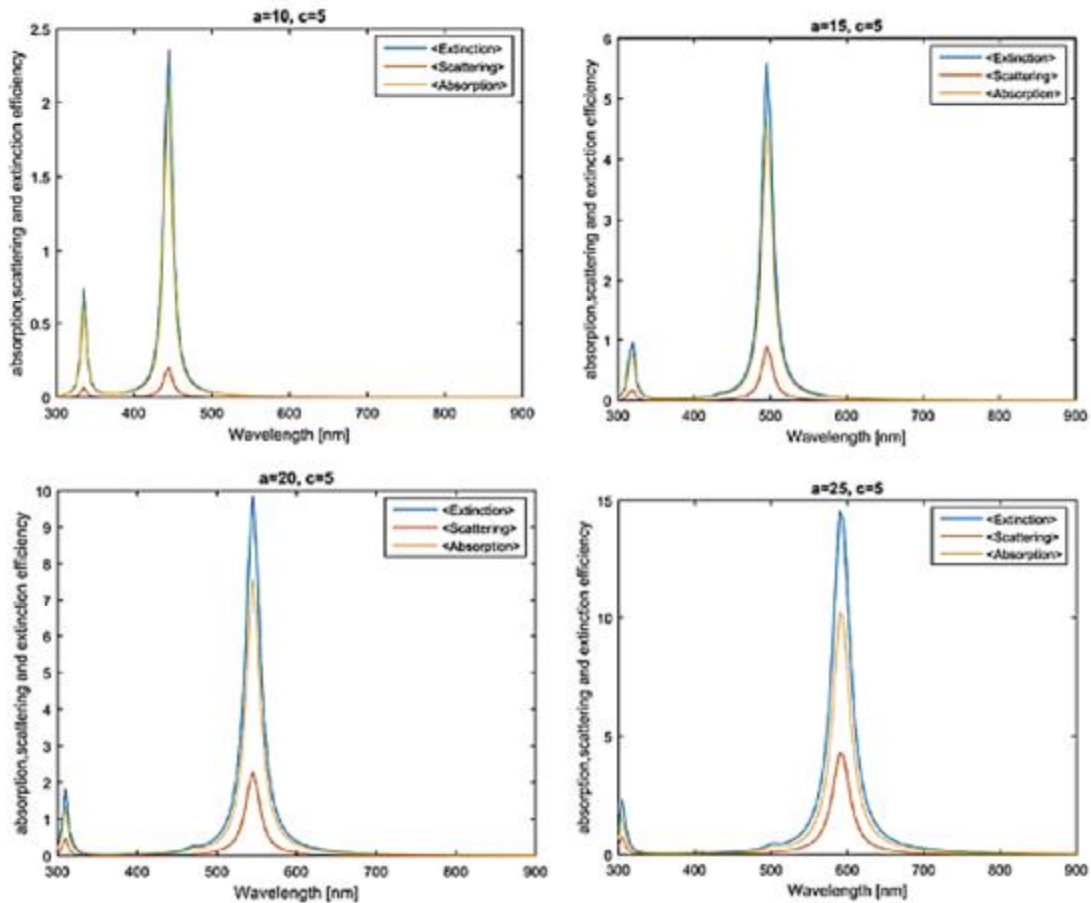
بزرگتر انتقال پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که با بزرگ شدن نانو ذره طلا (قطر بزرگ) بازدهی جذب به شدت افزایش می‌یابد؛ به صورتی که اختلاف جذب ناشی از قطر بزرگ نسبت به قطر کوچک چنان بزرگ می‌شود که قله ناشی از بازدهی جذب در طول موج کوچک‌تر (ناشی از قطر کوچک) حذف می‌شود.



شکل ۳. نمودار تغییرات جذب، پراکندگی و خاموشی با طول موج نور مرئی برای نانوذرات بیضوی شکل (حالت بیضی پهن شده) طلا در محیط دی الکتریک آب

الکترون در نانو ذره (جدول ۱)، به مقدار بیشتری کوچک‌تر است. انتظار می‌رود که بازدهی جذب ناشی از قطر کوچک بیضی در مقایسه با جذب ناشی از قطر بزرگ‌تر به میزان بیشتری پهن‌تر شود که همین اتفاق هم روی داده است.

در شکل ۲، منحنی تغییرات جذب، پراکندگی و خاموشی برای نانوذرات بیضوی شکل نقره در محیط دی الکتریک آب با اندازه‌های متفاوت نشان داده شده است. در حالی که قطر بزرگ و کوچک با هم برابر و هندسه مورد

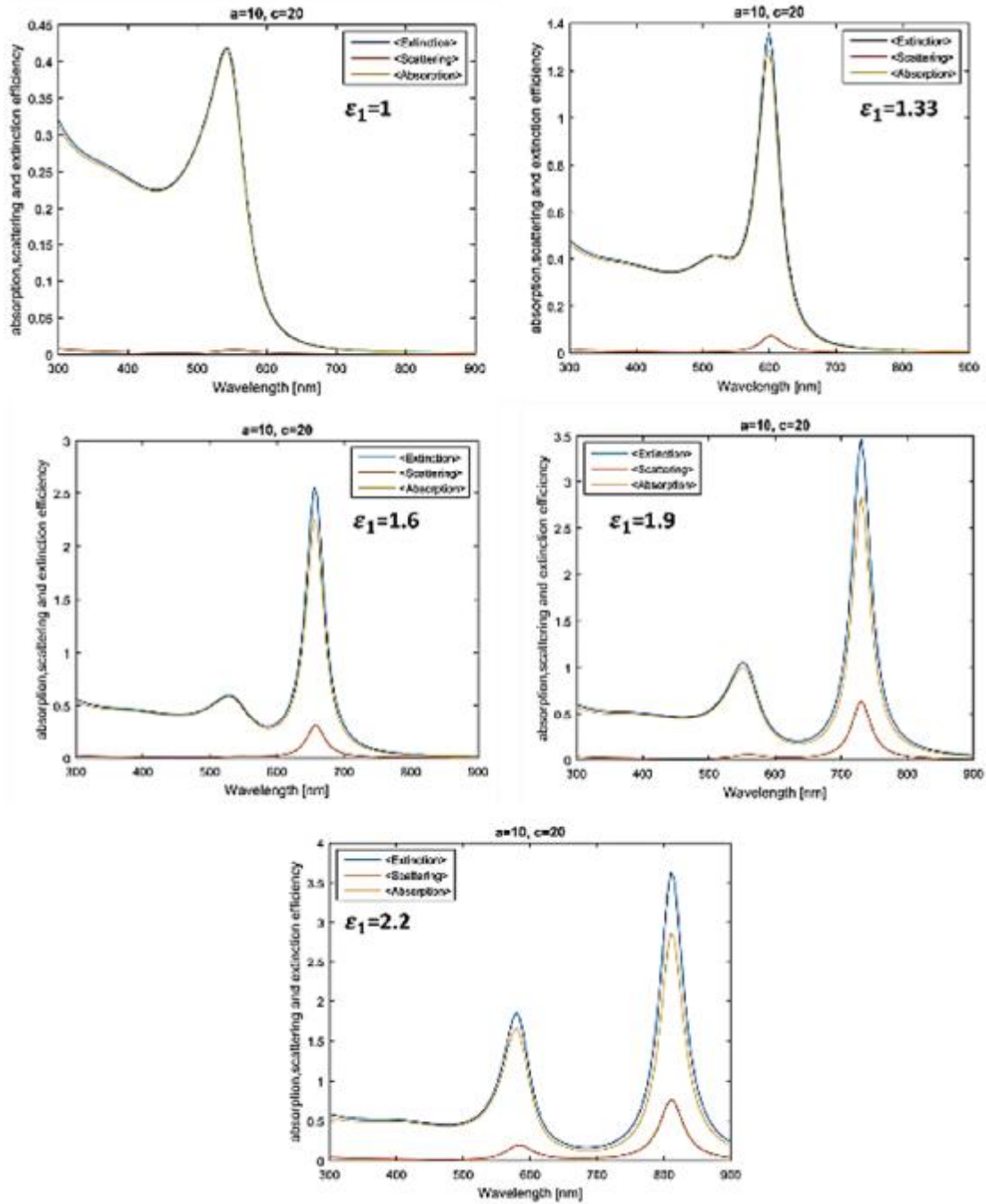


شکل ۴. نمودار تغییرات جذب، پراکندگی و خاموشی با طول موج نور مرئی برای نانوذرات بیضوی شکل (حالت بیضی پهن شده) نقره در محیط دی الکتریک آب

اتم‌های ذرات بیضوی شکل طلا در نتیجه نفوذ میدان الکتریکی اعمالی است. البته نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که تعداد الکترون‌های رسانش در نانوذرات بیضوی شکل طلا فوق‌العاده کم است و در نتیجه اعمال میدان الکتریکی، باعث جابه‌جایی بارهای همگن درون نانوذره می‌شود. این مسئله دلیل ایجاد تک‌قله‌هایی در طیف خاموشی و جذب نانوذرات بیضوی شکل طلا در اثر توزیع دو قطبی بارهای آزاد می‌شود.

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، منحنی جذب، پراکندگی و خاموشی نانوذرات بیضوی شکل (حالت پهن شده) نقره دارای دو قله است که قله اول با شدت کمتر

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش قطر نانو ذرات بیضوی شکل (حالت پهن شده) طلا، از طول موج ۵۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر، قله طیف جذب، پراکندگی و خاموشی افزایش قابل توجهی می‌یابد که می‌تواند گزینه خوبی برای کاربردهای پلاسمونیک و ادوات اپتیکی باشد. همچنین در مقایسه با نانوذرات بیضوی شکل (حالت کشیده) بازدهی جذب و خاموشی دارای مقدار بالاتری است و قله پراکندگی در طول موج‌های بالاتر ظاهر می‌شود؛ در حالی که برای حالت کشیده نانوذرات بیضوی شکل چنین موردی مشاهده نمی‌گردد. همچنین می‌توان گفت که جابه‌جایی الکترون‌های رسانش نسبت به زمینه بار مثبت در

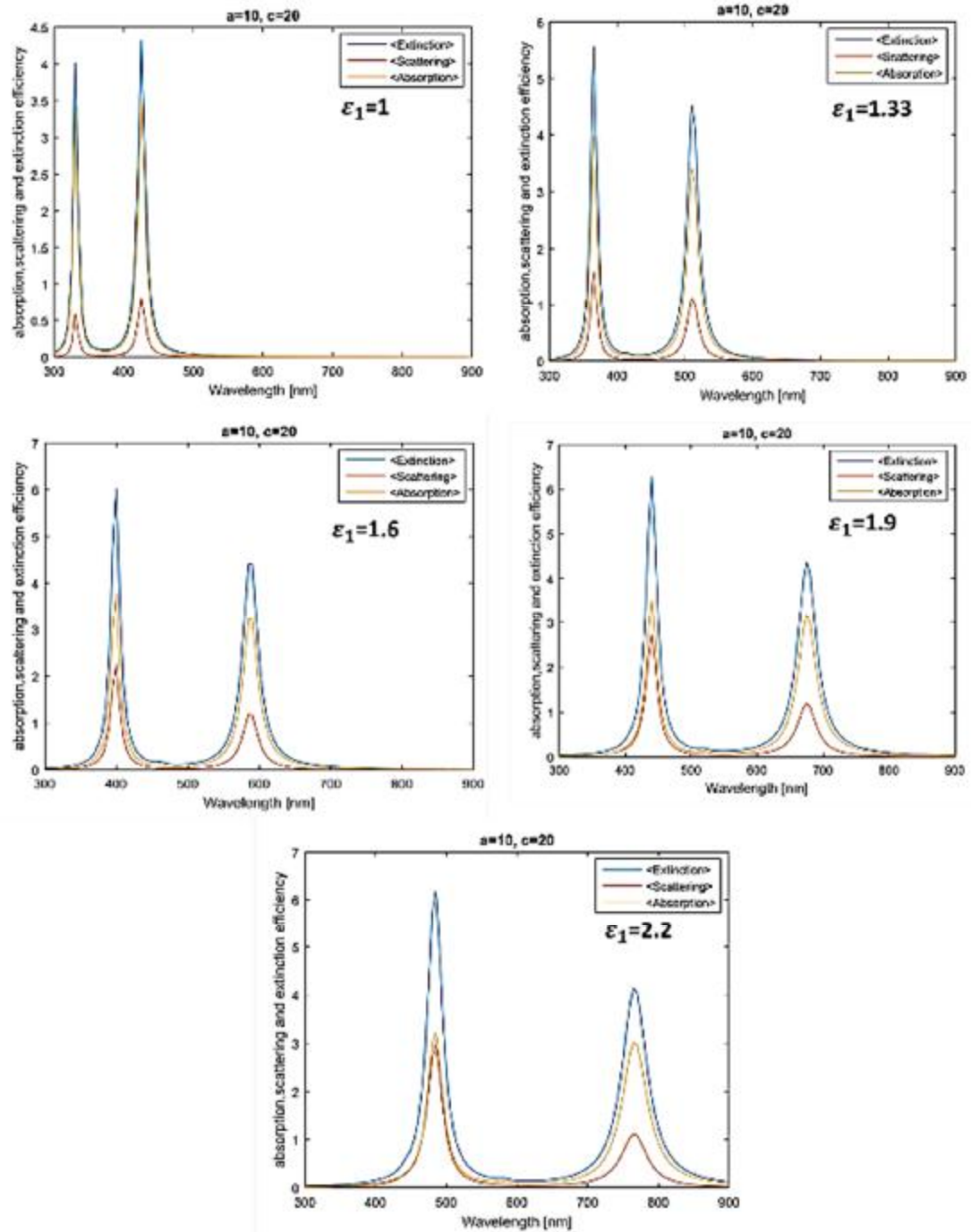


شکل ۵. نمودار تغییرات جذب، پراکندگی و خاموشی با طول موج نور مرئی برای نانوذرات بیضوی شکل (حالت بیضی کشیده) طلا در محیط هایی با ثابت دی الکتریک متفاوت

بازدهی جذب پراکندگی و خاموشی برای نانوذرات بیضوی شکل (حالت پهن شده) چندین برابر هندسه بیضوی (حالت کشیده) است.

در طول موج‌های پایین نزدیک ماورای بنفش رخ می‌دهد؛ در حالی‌که با افزایش قطر پهن‌شدگی قله دوم به سمت طول موج‌های بالاتر انتقال پیدا می‌کند. همچنین شدت





شکل ۶. نمودار تغییرات جذب، پراکندگی و خاموشی با طول موج نور مرئی برای نانوذرات بیضوی شکل (حالت بیضی کشیده) نقره در محیط‌هایی با ثابت دی الکتریک

ذرات بیضوی شکل تابع تغییر اندازه و حالت آنهاست. همچنین اثرهای ذاتی که مربوط به تغییرات نسبت سطح به حجم نانوذره است و اثرهای غیرذاتی، از مواردی است که نانو ذره در پاسخ به میدان‌های الکتریکی اعمالی از خود نشان می‌دهد.

### بحث و نتیجه‌گیری

خواص نوری نانو ساختارهای بیضوی شکل، طیف گسترده‌ای از کاربردهای ویژه را در ساخت دستگاه‌های اپتوالکترونیک، اپتیک غیرخطی و دیود نور گسیل، لیزرها، حسگرهای نوری، حافظه‌های نوری و سلول‌های خورشیدی دارند. با افزایش قطر بزرگ نانو ذره بیضوی شکل طلا بازدهی جذب به شدت افزایش می‌یابد به صورتی که اختلاف جذب ناشی از قطر بزرگ نسبت به قطر کوچک چنان بزرگ می‌شود که قله ناشی از بازدهی جذب در طول موج کوچک‌تر (ناشی از قطر کوچک) حذف می‌شود. با بررسی نانوذرات بیضوی نقره دیده می‌شود که به علت پراکندگی الکترون‌های آزاد در سطح نانوذرات نقره بازدهی جذب با افزایش قطر بزرگ پهن‌تر می‌شود. همچنین با افزایش قطر نانو ذرات بیضوی شکل (حالت پهن شده) طلا، در طول موج‌های بالاتر نور مرئی بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر، قله طیف جذب، پراکندگی و خاموشی افزایش قابل توجهی می‌یابد که می‌تواند گزینه خوبی برای کاربردهای پلاسمونیک و ادوات اپتیکی باشد.

وجود تعداد بالای اتم‌های سطحی در نانوذرات بیضوی شکل طلا باعث ارتقای اهمیت اثرات سطحی در قیاس با اثرات حجمی می‌شود. البته نکته حائز اهمیت این است که ارتباط قله‌های ایجاد شده در طیف اپتیکی نانوذرات به عنوان یک اثر خارجی، با درصد بالایی به ابعاد و هندسه نانوذره نسبت به پرتو الکترومغناطیسی وابسته است. البته برای نانوذرات بیضوی شکل طلا و نقره، تابع دی الکتریک آنها هم وابسته به اندازه و هم طول موج نور فرودی دارد. در شکل ۵ و ۶ نمودار تغییرات بازدهی جذب، پراکندگی و خاموشی برای نانوذرات بیضوی شکل طلا و نقره که درون محیط‌هایی با ثابت‌های دی الکتریک متفاوت قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. در شکل ۴ برای نانوذرات بیضوی شکل طلا تک قله‌هایی در ثابت دی الکتریک مشاهده می‌شوند که با افزایش اندازه تابع دی الکتریک محیط مشاهده می‌گردد که تعداد قله‌های پلاسمونی نیز افزوده می‌شود. همچنین با افزایش ثابت دی الکتریک قله‌های به سمت طول موج‌های بالاتر جابه‌جا می‌شوند که این نکته در طیف اپتیکی نانوذرات بیضوی نقره نیز مشاهده می‌گردد. مطابق شکل ۶ با مقایسه منحنی بازدهی پراکندگی، جذب و خاموشی نانو ذرات نقره و نانو ذرات طلا می‌توان دریافت که ارتفاع قله‌های ایجاد شده در طیف‌های جذب، پراکندگی و خاموشی برای نانو ذرات بیضوی شکل نقره بیش از نانو ذرات بیضوی شکل طلا است و قله‌های نانو ذرات بیضوی شکل نقره در طیف‌های فوق در طول موج‌های کوتاه‌تری نسبت به طلا مشاهده می‌شوند. به‌طور کلی خواص نانو

### References

- [1] Hornyak GL, Tibbals HF, Dutta J, Moore JJ. Introduction to nanoscience and nanotechnology. *CRC press*; 2008 Dec 22.
- [2] Nazarov YV, Nazarov Y, Blanter YM. Quantum transport: introduction to nanoscience. *Cambridge university press*; 2009 May 28.
- [3] Freestone I, Meeks N, Sax M, Higgitt C. The Lycurgus cup—a roman nanotechnology. *Gold bulletin*. 2007 Dec 1;40(4): 270-7.
- [4] Cummings PT. Opportunities and challenges in computational and theoretical nanoscience. Presentation at Fall Creek Falls Conference: Delivering Computational Science for the Nation.
- [5] Barnard AS. Using theory and modeling to investigate shape at the nanoscale. *Journal of Materials Chemistry*. 2006; 16 (9): 813-5.
- [6] Amiri IS, Ali J. Simulation of the single ring resonator based on the Z-transform method theory. *Quantum Matter*. 2014 Dec 1;3 (6): 519-22.

- [7] Neto OP. Intelligent computational nanotechnology: the role of computational intelligence in the development of nanoscience and nanotechnology. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2014 Apr 1;11 (4): 928-44.
- [8] Schommers W. Directions in theoretical and computational nanoscience. *Journal Of Computational And Theoretical Nanoscience*. 2007 Jun 1;4 (4): 705-14.
- [9] Ruivenkamp M, Rip A. Entanglement of imaging and imagining of nanotechnology. *Nanoethics*. 2011 Aug 1;5(2):185.
- [10] Gramse G, Casuso I, Toset J, Fumagalli L, Gomila G. Quantitative dielectric constant measurement of thin films by DC electrostatic force microscopy. *Nanotechnology*. 2009 Sep 2;20(39):395702.
- [11] Bhattacharya S, De D, Chowdhury S, Karmakar S, Basu DK, Pahari S, Ghatak KP. Simple theoretical analysis of the photoemission from quantum confined non-linear optical, optoelectronic, and related materials. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2006 Apr 1;3 (2): 280-95.
- [12] Liang H, Wang Z. Facile synthesis and photocatalytic activity of cocoon-like hollow hematite nanostructures. *Materials Letters*. 2013 Apr 1; 96:12-5.
- [13] Atwater HA, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices. *In Materials For Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group* 2011 (pp. 1-11).
- [14] Chrisey, Douglas B. and Graham K. Hubler, eds. "Pulsed laser deposition of thin films." (1994): 3.
- [15] Lehraki N, Aida MS, Abed S, Attaf N, Attaf A, Poulain M. ZnO thin films deposition by spray pyrolysis: Influence of precursor solution properties. *Current Applied Physics*. 2012 Sep 1;12 (5): 1283-7.
- [16] Forrest SR, Burrows PE, Ban VS, inventors; Princeton University, assignee. Low pressure vapor phase deposition of organic thin films. *United States patent US 6,337,102*. 2002 Jan 8.
- [17] Mane RS, Lokhande CD. Chemical deposition method for metal chalcogenide thin films. *Materials Chemistry and Physics*. 2000 Jun 15; 65 (1): 1-31.
- [18] Martin PJ, MacLeod HA, Netterfield RP, Pacey CG, Sainty WG. Ion-beam-assisted deposition of thin films. *Applied Optics*. 1983 Jan 1;22 (1): 178-84.
- [19] Ritala M, Kukli K, Rahtu A, Räisänen PI, Leskelä M, Sajavaara T, Keinonen J. Atomic layer deposition of oxide thin films with metal alkoxides as oxygen sources. *Science*. 2000 Apr 14; 288 (5464): 319-21.
- [20] Polman A. Plasmonics applied. *Science*. 2008 Nov 7;322 (5903): 868-9.
- [21] Gramotnev DK, Bozhevolnyi SI. Plasmonics beyond the diffraction limit. *Nature photonics*. 2010 Feb;4 (2): 83.
- [22] Pelton M, Aizpurua J, Bryant G. Metal-nanoparticle plasmonics. *Laser & Photonics Reviews*. 2008 Jul 7; 2 (3): 136-59.
- [23] Schuller JA, Barnard ES, Cai W, Jun YC, White JS, Brongersma ML. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation. *Nature materials*. 2010 Mar; 9 (3): 193-204.
- [24] Guler U, Boltasseva A, Shalaev VM. Refractory plasmonics. *Science*. 2014 Apr 18; 344 (6181): 263-4.
- [25] Maier SA, Brongersma ML, Kik PG, Meltzer S, Requicha AA, Atwater HA. Plasmonics—a route to nanoscale optical devices. *Advanced materials*. 2001 Oct; 13 (19): 1501-5.
- [26] Zhang AQ, Qian DJ, Chen M. Simulated optical properties of noble metallic nanopolyhedra with different shapes and structures. *The European*

- Physical Journal D*. 2013 Nov 1; 67(11): 231.
- [27] Mohammadi Bilankohi, Sara. Investigation and simulation of plasmonic properties of silver and nuclear metal nanocarriers - gold-silver shell. *Optoelectronics Quarterly Journal*, 2016; 1 (1): 57-61.
- [28] Mackowski DW, Mishchenko MI. Calculation of the T matrix and the scattering matrix for ensembles of spheres. *JOSA A*. 1996 Nov 1; 13(11): 2266-78.
- [29] Peterson B, Ström S. T matrix for electromagnetic scattering from an arbitrary number of scatterers and representations of E (3). *Physical review D*. 1973 Nov 15;8(10): 3661.
- [30] Somerville WR, Auguié B, Le Ru EC. Simplified expressions of the T-matrix integrals for electromagnetic scattering. *Optics letters*. 2011 Sep 1; 36(17): 3482-4.

#### COPYRIGHTS



© 2022 by the authors. Licensee PNU, Tehran, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY4.0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)