

شانزدتهمين سمينار ملى مهتدسي سطح

انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

مدل بهینه شده وابستگی دمای ذوب نانو ذرات فلزی به اندازه نانو ذره

پارسا همقلم'، محمود على اف خضرايي'، محمود فاميل صابريان'، رضا جعفرى'

<sup>۱</sup>. دانشگاه تربیت مدرس (دانشجوی کارشناسی ارشد) ۲. دانشگاه تربیت مدرس(استادیار بخش آموزشی مهندسی مواد)

چکیدہ

مدلی برای بیان وابستگی دمای ذوب نانو ذرات فلزی به اندازه، شکل و نوع شبکه آنها ارائه شده است. داده های آزمایشگاهی گزارش شده با این مدل از سازگاری خوبی به ویژه در مورد سایزهای بسیار کوچک نانوذره بر خورداراند. این مدل با اصلاح مدل های پیشین در زمینه تغییر عدد همسایگی اتم های سطحی، به پیش بینی های بهتری از تغییرات دمای ذوب به هنگام کوچک شدن ذرات رسیده است و سازگاری بهتری نسبت به مدل های پیشین دارد. معادله ای عمومی پیشنهاد شده در مدل های گذشته اصلاح شده است و این معادله به همراه اصلاحات مربوط به عدد همسایگی سطحی ظرفیت بالایی برای استفاده در تحقیق و توسعه دارا هستند. **واژه های کلیدی:** نانوساختارها؛ ذوب نانوذرات؛ ساختار بلوری؛ عدد همسایگی سطحی.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>. khazraei@modares.ac.ir

مدل بهينه شده وابستگي ...

مقدمه

مشخص شده است که دمای ذوب نانو ذرات فلزی، آلی و نیمه هادی پایین تر از تودهای از همان ماده است و این مقدار با کاهش ابعاد ذرات کاهش مییابد. درک این رفتار حرارتی نوین نانوذرات می تواند منجر به پیدایش خواص جدیدی از مواد با کاربردهای گسترده بشود[3–1]. کاهش دمای ذوب می تواند با اثر نسبت سطح به حجم ماده توجیه شود. مدل هایی برای بیان توجیه وابستگی

دمای ذوب به ابعاد ذرات ساخته شدهاند که در بسیاری از این مدلها نانو ذرات کروی فرض شدهاند. این مدلها عبار تند از: مدل قطره مایع، مدل گرمای نهان و مدل انرژی پیوند. عموماً انتظار میرود دمای ذوب تابعی خطی از معکوس اندازه نانو ذره باشد[6–1,4].

پیش تر عطاریان و همکارانش مدلی را ایجاد کرده بودند که نشان می داد دمای ذوب نانو ذره، تابعی خطی از معکوس اندازه نانو ذره نیست[7]. در این مقاله ما با مبنا قرار دادن برخی از دست یافت های آن ها، مدل اصلاح شدهای ارائه خواهیم داد که این فرض را تایید می کند. این مدل دمای ذوب نانوذرات را – به ویژه در اندازه های بسیار کوچک- با دقت بیشتر از مدل های پیشین پیش بینی می کند. در فرمول نهایی این مدل تاثیر شکل ذره، نوع شبکه کریستالی و فاکتور تراکم در نظر گرفته شده است و برای بررسی تغییر عدد همسایگی اتم ها در سطح فلز، در قیاس با درون آن فرضیات تازه ای مطرح شده است.

## مدل

نقطه ذوب نانو ذرات فلزی به عوامل متعددی بستگی دارد از جمله دمای ذوب فلز، اندازه نانو ذارت، شکل هندسی و ساختار شبکه کریستالی.

انرژی لازم برای جدا کردن اتمهای نانو ذره به اتمهای جدا از هم برابر است با[7]:

 $E_{p} = \left(\frac{1}{2}n_{i}\beta_{L} + \frac{1}{2}n_{s}\beta_{s}\right)\varepsilon$ (1)  $\sum_{k=1}^{\infty} \beta_{s} = e^{-\frac{1}{2}n_{i}\beta_{L}} + \frac{1}{2}n_{s}\beta_{s}\varepsilon$   $\sum_{k=1}^{\infty} \beta_{s} = e^{-\frac{1}{2}n_{s}\beta_{s}}\varepsilon$   $\sum_{k=1}^{\infty} \beta_{k} = e^{-\frac{1}{2}n_{s}}\varepsilon$ 

 $T_{mb} = \frac{0.032}{k_b} E_0 \tag{(Y)}$   $T_{mp} = \frac{0.032}{k_b} E_p \tag{(Y)}$   $\frac{T_{mp}}{T_{mb}} = \frac{E_P}{E_0} \tag{(Y)}$ 

که T<sub>mb</sub> و T<sub>mb</sub> به ترتیب دمای ذوب توده ماده و نانو ذره میباشد و E<sub>0</sub> انرژی همدوسی توده ماده میباشد[6,8]. عطاریان و همکاران برای پیشبینی کاهش دمای ذوب فلز با تغییرات اندازه ذرات آن رابطه زیر را ارائه کردهاند[7]: شانزدهمين سمينار ملي مهندسي سطح

$$\frac{T_{mp}}{T_{mb}} = \frac{P_L + 8\left(q - \frac{1}{2}\right)\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 8\left(q - \frac{1}{2}\right)\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} \qquad (\Delta)$$

$$\sum P_L = \frac{P_L + 4$$

که S و S به ترتیب مساحت سطح نانوذره کروی و نانوذره غیر کروی با حجم برابر می باشد. پارامتر p در رابطه ۵ بیان گر نسبت عدد همسایگی اتم در سطح نانو ذره به عدد همسایگی شبکه بلوری می باشد. مقادیر p برای ساختارها و اندازه های مختلف متفاوت در نظر گرفته شده است. در مطالعات پیشین مقدار q=1/2 برای ساختار مکعب مرکز وجه پر (که در آن عدد همسایگی اتم سطح ۶ و ماده ۱۲ فرض شده) به دست آمده است. هم چنین مقدار p=1/4 برای نانو ذرات کوچک تر از ۱۰ نانومتر تطابق بیشتری با داده های تجربی نسبت به p=1/2 نشان می داد [8]. پس می توان ادعا نمود که در مدل های ارائه شده پیشین انطباق مناسب تری برای مقادیر کمتر p، با نانو ذرات کوچک تر دارد. در تحقیقات پیشین با جای گزینی مقادیر ثابت q=1/4 می مقادیر کمتر p، با نانو ذرات کوچک تر دارد. در تحقیقات پیشین با جای گزینی مقادیر ثابت

$$\frac{T_{mp}}{T_{mb}} = \frac{P_L - 2\alpha P_{s\overline{D}}}{P_L + 4\alpha P_{s\overline{D}}}$$
(V)

$$\frac{T_{mp}}{T_{mb}} = \frac{P_L}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}$$
(A)  
به منظور بدست آوردن مقادیر بهتری برای P که انطباق مناسبی برای نانو ذرات در اندازه های مختلف داشته  
باشد، مدلی بر پایه تغییرات P با کاهش اندازه نانو ذره، درادامه ارائه میشود.

هدف ما در این بخش یافتن رابطهای بین اندازه ذره و پارامتر q است که با جای گذاری آن در معادلـه ۵ بتـوان بـه رابطه جدیدی دست یافت، که در آن هرچه ذره کوچک تر می شود عدد q به سمت مقادیر کسری کوچک تـری میل کند.

<sup>1</sup>.Qi

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>.Face-centered Cubic

مدل بهینه شده وابستگی ...

که این مقدار متفاوت از فرضیات مدل های قبلی می باشد () حال با فرض ذرهای کروی که سطح آن از اتم همایی با چینش شکل ۱ تشکیل شده، به دنبال این هستیم که با کوچک شدن ذره، ۹ چگونه تغییر می کند. (برای راحت تر شدن درک سه بعدی فرض کنید که صفحه کاغذ شکل ۱ را به صورت یک کره که در حال کوچک شدن زمان، تحذب می دهیم.)  
شدن است، تحذب می دهیم.)  
شکل ۲ مسئله را به صورت دو بعدی بررسی می کند و موقعیت نسبی اتم های سطحی را در شبکه FCC نشان  
می دهد.  
می دهد که با کوچکتر شدن م R (شعاع ذره) اتم های سطحی نسبت به هم و یا نسبت به کل ذره تغییر  
می دونجن سبی را نسبت به هم عقبتر می روند.  
این تغییر نسبی را نسبت به موقعی که ذره بی نهایت بزرگ است به عنوان معیاری از تغییرات ۹ بر حسب شعاع  
دره در نظر می گیریم.  
وقتی که ذره از اندازه بی نهایت (نوده ماده) رو به کوچک شدن می گذارد ۹ هم از مقدار اولیه یعنی ا// به  
درادامه مقدار این جابجایی نسبی را بر حسب اندازه ذره بادست می آوریم.  
محت مقادیر کم تر می رود.  
محت مقادیر کم تر می رود.  
(۱۰)  

$$P = \frac{4 r}{D}$$
  
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
 $P = \frac{4 r}{D}$   
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱۰)  
(۱

$$O\frac{r}{r} = \frac{1}{4} = \frac{1}{D}$$

شانزدهمين سمينار ملي مهندسي سطح

در شرایط حدی 
$$\infty \leftarrow D$$
 یعنی وقتی ذره کروی بینهایت بزرگ شود، p به نسبت <sup>4</sup><sup>k</sup> میل می کند که با در  
نظر داشتن فرضیه کره بینهایت بزرگ، منطقی است. به عنوان فرضیه دیگر با در نظر گرفتن اشتراک پیوندهای  
اتم سطحی بین دو اتم، به جای کاستن  $\frac{P_f}{r}$ ، عبارت  $\frac{P_f}{r}$  را از نسبت p کسر می کنیم:  
(۱۶)  
(۱۶)  
حال می توان p را به عنوان تابعی از D در مدلهای دیگر از جمله مدلهای ارائه شده در معادله ۵ جایگزین کرد.  
از معادلات (۵) و (۱۵) نتیجه می شود :  
 $2(r)$  عبوده  $r$  می کنیم  $\frac{r}{r}$  می کنیم و از جمله مدلهای ارائه شده در معادله ۵ جایگزین کرد.  
 $2(r)$  عبود :

$$\frac{\mathrm{T}_{\mathrm{mp}}}{\mathrm{T}_{\mathrm{mb}}} = \frac{P_L + 8\left(\left(\frac{3}{4} - \frac{24r}{D}\right) - \frac{1}{2}\right)\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D} - 192\alpha P_s \left(\frac{r}{D}\right)^2} = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D} - 192\alpha P_s \left(\frac{r}{D}\right)^2}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}$$
(1V)

و از معادلات (۵) و (۱۶) خواهیم داشت:

$$\frac{\mathrm{T}_{\mathrm{mp}}}{\mathrm{T}_{\mathrm{mb}}} = \frac{P_L + 8\left(\left(\frac{3}{4} - \frac{12r}{D}\right) - \frac{1}{2}\right)\alpha P_s \frac{r}{D}}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}} = \frac{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D} - 96\alpha P_s \left(\frac{r}{D}\right)^2}{P_L + 4\alpha P_s \frac{r}{D}}$$
(1A)

با توجه به این که در شبکه مکعب مرکز پر'، هر اتم سطحی در صفحه فشرده (۱۱۰) با ۴ اتم دیگر در همان صفحه پیوند دارد،می توان مقادیر مختلف q را به ازای این ساختار به صورت زیر به دست آورد:

$$q = \frac{3}{4} - 4\frac{r_f}{r} = \frac{3}{4} - \frac{10r}{D}$$
(19)  
$$q = \frac{3}{4} - 2\frac{P_f}{r} = \frac{3}{4} - \frac{8r}{D}$$
(19)

که معادلات ۱۹ و ۲۰ هم ارز معادلات ۱۵و ۱۶ به ازای ساختار BCC است با قرار دهی معادلات ۱۹ و ۲۰ در معادله ۵ نسبت دمای ذوب نانوذره فلزی با ساختار BCC به دمای ذوب فلز با شبکه BCC را می توان بدست آورد.

نتایج و بحث در این بخش ما به مقایسه نتایج پژوهش های تجربی و همچنین دو مدل از مدل های پیشین با معادلات به دست آمده از این مدل بهینه شده می پردازیم. فرض پیشین ما مبنی بر تشکیل سطح نانو ذره از صفحات فشرده FCC ، (۱۱۱) این جا هم بر قرار است پس در این نمودارها P<sub>L</sub>=0.74 و P<sub>S</sub>=0.91 در نظر گرفته می شوند همچنین فرض ما کماکان بر کروی بودن ذرات است (1 = α) . در شکل ۴ و ۵ نمودار حاصل از فرمول مدل های قبلی به ازای مقادیر مختلف q ، داده های تجربی و همچنین نمودارهای به دست آمده از مدل کنونی رسم گردیده است . شکل کلی نمودار بدست آمده از مدل این مطالعه نزدیکی بیشتری با شکل داده های آزمایشگاهی نسبت به مدل های قبلی دارد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>.Body-centered Cubic

مدل بهينه شده وابستگي ...

شکلهای ۴ و ۵ نشان میدهند که نمودار معادله ۱۷ و ۱۸ مبتنی بر مدل حاضر انطباق خوبی بـا دادههـای تجربی نسبت به مدلهـای پبشـین دارد . ایـن هـمخوانی بـرای مقـادیر نـانو ذرات کوچک تـر از ۱۰ نـانومتر و معادلـه ۱۷ مشهودتر است.

می توان گفت که مدل کنونی توانسته است اصلاحی بر مدل های ارائه شده قبلی، انجام دهد. با استفاده از پارامتر p به عنوان تابعی از اندازه ذره، شمای کلی نمودار حاصل از مدل بهینه شده به شکل کلی حاصل از دادههای آزمایشگاهی نزدیکتر شده است.

نمودار حاصل از معادله ی ۱۷ برای هر دو داده های آزمایشگاهی طلا و سرب در محدوده اندازه نانو ذرات کوچک تر از ۱۰ نانومتر هم خوانی بهتری نسبت به نمودار حاصل از معادله ۱۸ و دیگر مدل های ارائه شده دارد. در شکل ۵ مشاهده می شود که نمودار حاصل از معادله ۱۸برای نانو ذرات سرب بزرگ تر از ۱۵ نانومتر تطابق مناسب تری نشان می دهد. این در حالی است که در مورد نانو ذرات طلا بزرگ تر از ۱۰ نانومتر نمودار معادله ۱۷ و مدل ارائه شده عطاریان و همکاران ( معادله ۷) هم خوانی بهتری با داده های آزمایشگاهی طلا دارد.

## نتيجه گيري

مدلی بهینه شده برای پیش بینی دمای ذوب نانو ذرات فلزی در اندازههای مختلف ارائه شد. در ایـن مـدل تـاثیرات عوامل مختلفی همچون فاکتور شکل ذره (۵) و مشخصات شبکه بلوری مدنظر قرار گرفته است. با استفاده از این مدل می توان با دانستن ساختار بلـوری فلـز و پارامترهای مربـوط بـه آن، انـدازه نـانو ذره فلـزی و دمای ذوب فلز، مقدار دمای ذوب نانو ذره فلزی را با دقت بیشتر و بدون نیـاز بـه جـای گـذاری مقـادیر مختلف q (نسبت عدد همسایگی اتم در صفحات سطح به عدد همسایگی اتم درشبکه) پیش بینی نمود.

## مراجع

- 1. Q Jiang, H X Shi, and M Zhao. 1999. Melting thermodynamics of organic nanocrystals. *Journal of Chemical Physics* 111, 5: 2176–80.
- 2. Ph. Buffat and J-P. Borel. 1976. Size effect on the melting temperature of gold particles. *Physical Review A* 13, 6: 2287–98.
- 3. Mieko Takagi. 1954. Electron-diffraction study of liquid-solid transition of thin metal films. *Journal of the Physical Society of Japan* 9, 3: 359–63.
- 4. K K Nanda, S N Sahu, and S N Behera. 2002. Liquid-drop model for the sizedependent melting of low-dimensional systems. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics* 66, 1: 132081–8.
- 5. K K Nanda. 2006. A simple classical approach for the melting temperature of inert-gas nanoparticles. *Chemical Physics Letters* 419, 1-3: 195–200. 6. W H Qi, M P Wang, and G Y Xu. 2003. The particle size dependence of cohesive energy of metallic nanoparticles. *Chemical Physics Letters* 372, 5-6: 632–4.
- 7. M Attarian Shandiz, a. Safaei, S Sanjabi, and Z H Barber. 2007. Modeling size dependence of melting temperature of metallic nanoparticles. *Journal of Physics and*

شانزدهمين سمينار ملي مهندسي سطح

Chemistry of Solids 68, 7: 1396–9.

- 8. Wf Gale and Tc Totemeier. 2003. *Smithells metals reference book*.
- 9. W H Qi and M P Wang. 2004. Size and shape dependent melting temperature of metallic nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics* 88, 2-3: 280–4.
- 10. Gunter Schmid. 2010. Gunter schmid.
- S J Peppiatt and J R Sambles. 1975. The Melting of Small Particles. I. Lead. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 345, 1642: 387–99.

مدل بهینه شده وابستگی ...



شکل ۱ نحوه قرارگیری اتمها در صفحه فشرده (۱۱۱) FCC







شکل ۱-نمودار تغییرات دمای ذوب نانو ذرات طلا نسبت به اندازه نانو ذرات طلا .(ساختار طلا fcc است ، و دمای ذوب طلا 1337/6k است ) دادههای آزمایشگاهی از مرجع [10]

مدل بهینه شده وابستگی ...



شکل ۲ – نمودار تغییرات دمای ذوب نانو ذرات سرب نسبت به اندازه نانو ذرات سرب.(ساختار سرب fcc است ، r=0.1935nm و دمای ذوب سرب 600.6kاست ) دادههای آزمایشگاهی از مرجع [11]