



Investigating the Effect of Environment on the Synthesis of Nickel and Nickel Oxide Nanoparticles Using the Laser Ablation Method with a Nanosecond Fiber Laser

Shahin Torkamani¹, Hamed Naderi-Samani^{1*}, Reza Shoja Razavi¹, Mohammad Gavahian Jahromi¹, Ehsan Naderi-Samani¹, Mohammad Reza Borhnai¹ and Atefeh Heidarian²

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

2- Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran

* Corresponding author, Email: h.naderi@mut.ac.ir

(Received: 31 July 2024; Revised: 9 February 2025; Accepted: 11 February 2025; Available online: 5 March 2025)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: Nickel nanoparticles are utilized in electronic printing, multilayer ceramic capacitors, magnetic devices, and supercapacitor electrodes in the electronics industry due to their favorable physical, chemical, and magnetic properties, low cost, and optimal sintering temperature. The objective of this study is to synthesize nickel nanoparticles via laser ablation in liquid.

Materials and Methods: To characterize the synthesized nanoparticles, field-emission scanning electron microscopy, dynamic light scattering, X-ray diffraction, and ultraviolet-visible spectroscopy were employed.

Results: The results revealed that nanoparticles synthesized in distilled water consisted of nickel nanoparticles with FCC crystalline structure and a nickel/nickel oxide (Ni/NiO) core-shell structure. These particles exhibited an average size of 70 nm, spherical morphology, and a rough surface. In contrast, nanoparticles synthesized in a solvent containing Polyvinylpyrrolidone as a stabilizer comprised pure nickel nanoparticles with an average size of 60 nm, spherical morphology, and an FCC crystalline structure. The Polyvinylpyrrolidone-stabilized nanoparticles, owing to their uniform morphology, narrow particle size distribution, and absence of oxide formation, are a promising candidate for nickel nanoparticle synthesis.

Conclusion: The nickel nanoparticles synthesized in the Polyvinylpyrrolidone-containing solvent, due to their optimal morphology, uniform particle size distribution, and lack of oxide formation, are well-suited for the production of conductive inks.

Keywords: Laser ablation, Nickel nanoparticle synthesis, Polyvinylpyrrolidone (PVP) stabilizer, Nanosecond laser.

How to Cite: Torkamani Sh, Naderi-Samani H, Shoja Razavi R, Gavahian Jahromi M, Naderi-Samani E, Borhnai MR, Heidarian A. Investigating the effect of environment on the synthesis of nickel and nickel oxide nanoparticles using the laser ablation method with a nanosecond fiber laser. J Adv Mater Eng. 2025;44(2):105–118. <https://doi.org/10.47176/jame.44.2.1060>

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



بررسی اثر محیط بر سنتز نانوذرات نیکل و اکسید نیکل به روش فرسایش لیزری با لیزر فیبری نانو ثانیه

شاهین ترکمانی^۱، حامد نادری سامانی^{۱*}، رضا شجاع رضوی^۱، محمد گواهیان جهرمی^۱، احسان نادری سامانی^۱،
محمدرضا برهانی^۱ و عاطفه حیدریان^۲

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، ایران

۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h.naderi@mut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۵/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳، انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵)

چکیده

مقدمه و اهداف: نانوذرات نیکل به دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی، قیمت ارزان و دمای تف‌جوشی مطلوب، در چاپ الکترونیک، ساخت خازن‌های سرمایی چندلایه، دستگاه‌های مغناطیسی و الکتروادهای ابر خازن‌ها در صنعت الکترونیک استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش سنتز نانوذرات نیکل به روش فرسایش لیزری در مایع می باشد.

مواد و روش‌ها: به منظور ارزیابی نانوذرات سنتز شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، پراش نور دینامیکی، الگوهای پراش اشعه ایکس و طیف‌سنجی نوری مرئی-فرابنفش استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که نانوذرات سنتز شده در حلال آب مقطر، شامل نانوذرات نیکل با ساختار کریستالی FCC و ساختار هسته-پوسته نیکل/اکسید نیکل (NiO/Ni) با میانگین اندازه ذرات ۷۰ nm، مورفولوژی کروی و سطح زبر است؛ اما برای نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی پایدارکننده پلی وینیل پیرولیدون، شامل نانوذرات نیکل خالص با اندازه‌ای در حدود ۶۰ nm، مورفولوژی کروی با ساختار کریستالی FCC است. نانوذرات نیکل سنتز شده در حلال حاوی پایدارکننده پلی وینیل پیرولیدون به علت مورفولوژی مناسب، توزیع مناسب اندازه ذرات و عدم تشکیل اکسید در آن می‌تواند گزینه مناسبی برای سنتز نانوذرات نیکل باشد.

نتیجه‌گیری: نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی پایدارکننده پلی وینیل پیرولیدون به علت مورفولوژی مناسب، توزیع مناسب اندازه ذرات و عدم تشکیل اکسید در آن می‌تواند گزینه مناسبی برای تولید جوهرهای رسانا باشد.

کلمات کلیدی: فرسایش لیزری، سنتز نانوذرات نیکل، پایدارکننده پلی وینیل پیرولیدون (PVP)، لیزر نانو ثانیه.



۱- مقدمه

در مقایسه روش‌های موجود برای تولید نانوذرات فلزی از قبیل روش‌های سل-ژل، احیای شیمیایی، فرسایش لیزری در مایع^۱ و غیره، روش فرسایش لیزری دارای مزایای بیش‌تری نظیر سهولت و سرعت بالای تولید نانوذرات، تک‌مرحله‌ای بودن، زیست‌سازگاری به دلیل عدم نیاز به مواد شیمیایی در روند تولید نانوذرات و عدم نیاز به دمای بالا است که امروزه مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (۱ و ۲). روش فرسایش لیزری یک روش فیزیکی از بالا به پایین برای تولید انواع مختلف نانوذرات در محلول‌های مختلف بدون هیچ‌گونه مواد شیمیایی است. در روش فرسایش لیزری نانوذرات با لیزر پالسی در مایع تولید می‌شوند. معمولاً برای تولید نانوذرات به روش فرسایش لیزری از لیزرهایی با مدت زمان پالس‌های کوتاه نظیر لیزرهای نانو ثانیه، فمتو ثانیه و پیکو ثانیه استفاده می‌شود. با کنترل پارامترهای لیزر و نوع محلول می‌توان اندازه و مورفولوژی نانوذرات را کنترل کرد. نانوذرات تولید شده به روش فرسایش لیزری به دلیل تشکیل شدن با واکنش‌های فیزیکی (برهمکنش لیزر با زیرلایه غوطه‌ور در محلول)، عاری از هرگونه ناخالصی‌ها هستند (۳ و ۴). به‌طور خلاصه، در این روش، پرتو لیزر پالسی روی توده هدف متمرکز شده و سطح ماده را تحت تأثیر کندوپاش و فرسایش قرار می‌دهد. در طول فرآیند LAL، انرژی فوتون‌های لیزر توسط هدف فلزی جذب می‌شود و موجب گرمایش و یونیزه شدن در ناحیه تحت تابش می‌گردد. این فرآیندها شامل ذوب، تبخیر و تشکیل پلازما هستند. این تعاملات باعث می‌شوند که مواد از سطح هدف جامد به‌صورت بخار و قطرات مایع خارج شده و در محیط مایع، نانوذرات را تشکیل دهند.

محققین روش‌های مختلفی را برای تهیه ساختار نانوذرات نیکل با استفاده از رسوب الکتروشیمیایی، تبخیر حرارتی و فرآیندهای احیای شیمیایی گزارش کرده‌اند (۵-۷). با این حال، روش‌های فوق دارای معایبی همچون پیچیده بودن فرایند، گران قیمت بودن مواد و تجهیزات و سمی بودن مواد مورد استفاده

هستند. علاوه بر این، این روش‌ها در فرآیندهای چندمرحله‌ای خود در معرض هوا قرار می‌گیرند؛ بنابراین، در این حالت جلوگیری از اکسید شدن نانوذرات نیکل سنتز شده دشوار است (۸-۱۰).

نیکل به دلیل خواص فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی وابسته به اندازه و شکل، به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و نانوذرات آن به دلیل ارزان بودن و دمای ذوب مطلوب، در چاپ الکترونیک، ساخت خازن‌های سرامیکی چندلایه، دستگاه‌های مغناطیسی و الکتروادهای ابر خازن‌ها در صنعت الکترونیک استفاده می‌شود (۱۱). از معایب مهم فلز نیکل، تمایل آن به اکسید شدن است. فاز اکسیدی نیکل پایداری ترمودینامیکی بالایی دارد و در دماهای کمتر از دمای ذوب نیکل (۱۴۵۵ درجه سانتی‌گراد) یعنی دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود. در نتیجه مقاومت به اکسید شدن این فلز در محیط و در معرض عوامل اکسیدکننده به شدت کاهش می‌یابد (۱۱ و ۱۲). یکی از رویکردهای جدید برای افزایش پایداری اکسید شدن نانوذرات نیکل ایجاد ساختار هسته - پوسته نیکل / پلیمر پلی وینیل پیرولیدون^۲ است (۱۳).

با توجه به اطلاعات نویسندگان این مقاله تا به امروز، مطالعه‌ای در حوزه سنتز نانوذرات نیکل به روش فرسایش لیزری در داخل کشور انجام پذیرفته است. از طرفی دیگر نیکل می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای برخی از کاربردها، جانشین نانوذرات گران قیمت طلا و نقره شود. همچنین در مقابل نانوذرات مس نیز از مقاومت به اکسید شدن بالاتری برخوردار می‌باشد.

در پروژه حاضر سعی بر آن است تا با انتخاب حلال مناسب از تشکیل لایه اکسیدی جلوگیری شود و نانوذرات با ابعاد و مورفولوژی مناسب تولید شوند. در پژوهش حاضر، تأثیر حلال‌های آب مقطر و آب مقطر به همراه ۰/۱۶ مول پایدارکننده پلی وینیل پیرولیدون (PVP) در سنتز نانوذرات نیکل به روش فرسایش لیزری توسط لیزر فیبری پیوسته با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر بررسی شده است.

فرسایش لیزری قرار گرفت. طرح‌واره سنتز نانوذرات به روش فرسایش لیزری در شکل (۱) نشان داده شده است (۱۴).

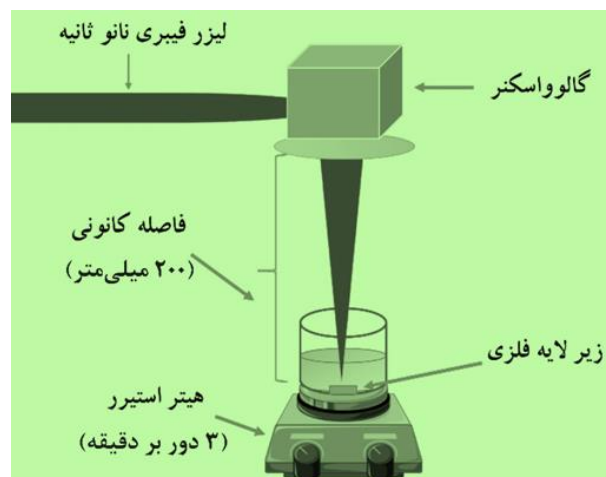
به منظور توزیع مناسب نانوذرات سنتز شده از یک مگنت چرخان با سرعت ۳۰۰ rpm استفاده شد. بعد از اتمام آزمایش، محلول‌های کلئیدی تیره‌رنگ حاوی ذرات فرسایش یافته از سطح نمونه هدف در هر دو حلال به دست آمد. برای بررسی مورفولوژی، آنالیز ریزساختاری و آنالیز نیمه کمی از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۳ مدل Tescan مجهز به آنالیز نیمه کمی طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۴ با ولتاژ ۲۰ کیلوولت استفاده شد. جهت شناسایی فازهای موجود از پراش اشعه ایکس^۵ تحت ولتاژ ۱۰ کیلوولت، شدت جریان ۱۰ mA و اشعه تک‌رنگ $\text{Fe-K}\alpha$ ($\lambda = 1.93609 \text{ \AA}$) استفاده شد. زاویه آنالیز پرتو از $2\theta = 10^\circ$ تا $2\theta = 90^\circ$ تنظیم شد و روبش اشعه در هر ۰/۲ درجه و با زمان توقف ۵ ثانیه صورت گرفت. به منظور بررسی توزیع اندازه نانوذرات و شناسایی نوع آن‌ها آزمون‌های دیگری نظیر پراش نور دینامیکی^۶ و آزمون طیف‌سنجی نوری مرئی - فرابنفش^۷ در محدوده ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نانوذرات سنتز شده در آب مقطر

الگوی XRD نانوذرات نیکل سنتز شده در آب مقطر در شکل (۲) نشان داده شده است. خلوص فاز نمونه سنتز شده از طریق مطالعات XRD مشخص شد. پیک‌های XRD در زوایای (۲۰)، (۳۷/۳)، (۴۳/۵)، (۶۳)، (۷۵/۴) و (۷۹/۵) درجه مربوط به صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) اکسید نیکل (NiO) منطبق با شماره کارت (JCPDS Card No. 78-0643)، ظاهر شدند. نتایج به دست آمده از XRD حاکی از اکسید شدن نانوذرات نیکل در آب مقطر خالص است.

اندازه بلورک‌های نانوذرات اکسید نیکل با استفاده از رابطه دبای - شرر مطابق رابطه (۱) محاسبه شد (۱۵). در این رابطه $K = 0.9$ فاکتور شکلی، λ طول موج پرتو ایکس (معادل

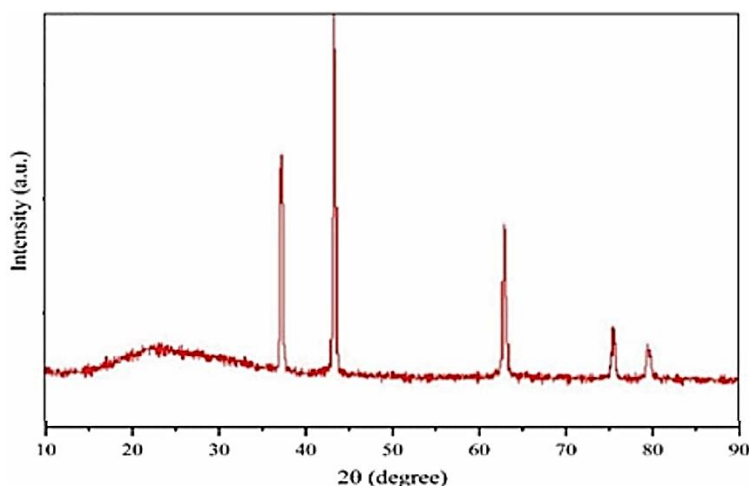


شکل ۱- طرح‌واره سنتز نانوذرات نیکل به روش فرسایش لیزری با لیزر فیبری نانوثانیه.

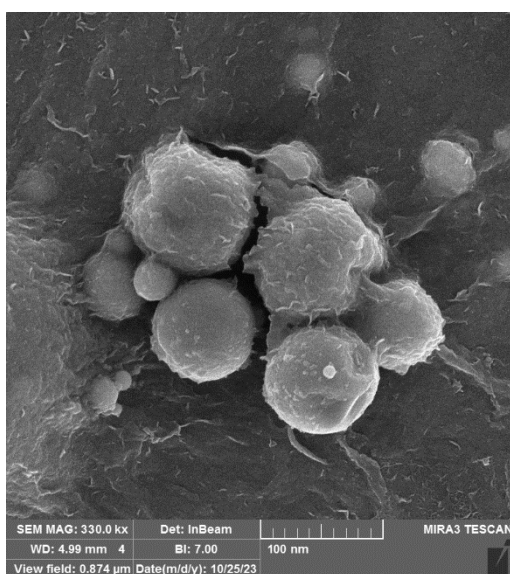
۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از یک هدف نیکل با خلوص ۹۹/۹۹ درصد با ابعاد $2 \times 15 \times 15$ میلی متر به عنوان ماده هدف استفاده شد. سطح هدف نیکل توسط سنباده از مش ۸۰ تا ۲۰۰۰، آماده‌سازی شد. در این پژوهش از دو حلال مختلف استفاده شد؛ محلول اول حاوی ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر و محلول دوم حاوی پلی وینیل پیرولیدون (PVP) با فرمول شیمیایی $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$ با وزن مولکولی متوسط ۲۵۰۰۰ از حل کردن ۰/۱۶ مول از این پلیمر در ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر به دست آمد. لازم به ذکر است که این مقدار مول در آزمایشگاه بهینه‌سازی شده است. برخی از کارهای انجام شده توسط محققین نیز در این محدوده بوده است.

برای فرآیند فرسایش لیزری، از لیزر فیبری پیوسته نانوثانیه با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، سرعت اسکن ۵۰۰۰ میلی متر بر ثانیه استفاده شد. سطح ماده هدف تحت فرسایش لیزری قرار گرفت، به طوری که پرتو لیزر توسط عدسی با فاصله کانونی ۲۰۰ میلی متر روی هدف متمرکز شده بود. زیر لایه نیکل به عنوان ماده هدف یکبار در ۲۰۰ میلی لیتر حلال شماره ۱ (آب مقطر) و بار دیگر در ۲۰۰ میلی لیتر حلال شماره ۲ (حاوی پایدارکننده PVP) درون بشر به منظور انجام فرآیند



شکل ۲- الگوی XRD از نانوذرات نیکل سنتز شده در حلال آب مقطر.



شکل ۳- تصویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) از نانوذرات نیکل سنتز شده در آب مقطر.

β پهنای کامل در نصف حداکثری پیک پراش و θ زاویه مربوط به پیک پراش می باشد. اندازه بلورک های نانوذرات اکسید نیکل محاسبه شده از رابطه (۱)، برابر با ۶۷ nm می باشد. اندازه بلورک های حاصل شده، نانوساختار بودن نانوذرات اکسید نیکل را تأیید می کند.

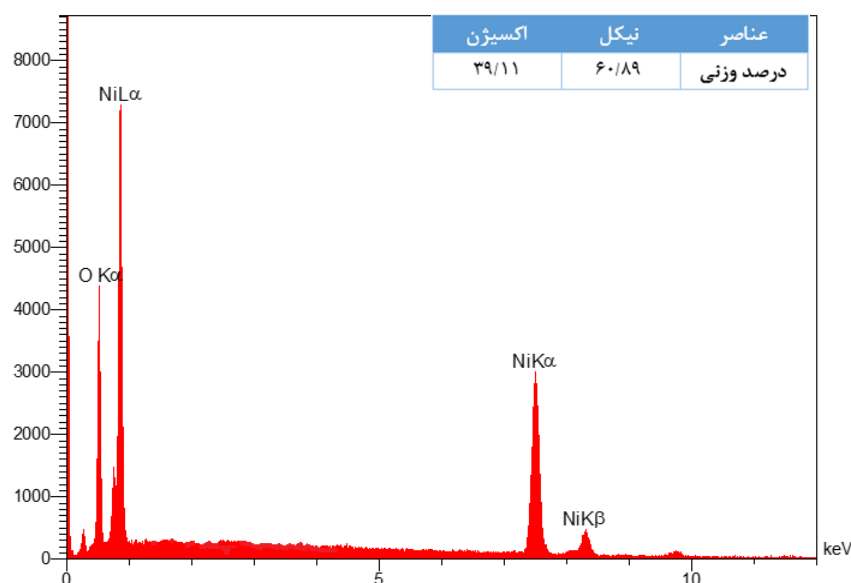
$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

به منظور بررسی ساختار و مورفولوژی نانوذرات سنتز شده نیکل از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) استفاده شد. تصاویر مربوط به نانوذرات سنتز شده در شکل (۳) ارائه شده است که به صورت روشن در تصویر مشخص است. با توجه به تصویر (۳)، نانوذرات سنتز شده با میانگین اندازه ذرات ۷۰ نانومتر با مورفولوژی کروی و سطح زیر مشاهده می شوند. علت زیر بودن سطح نانوذرات، تشکیل لایه اکسیدی NiO بر سطح نانوذرات است. علت تشکیل اکسید نیکل روی سطح نانوذرات نیکل آن است که هنگامی که انرژی پالس لیزر به مولکول های آب برخورد می کند، پیوندهای هیدروژن و اکسیژن شکسته می شوند و اتم های اکسیژن آزاد می شوند، این اتم ها با اتم های نیکل موجود در ستون پلاسما^۸ پیوندهای جدید ایجاد می کنند که در نهایت منجر به ایجاد اکسید نیکل می شود (۱۶) و (۱۷).

در فرآیند فرسایش لیزری، ستون پلاسما ایجاد شده شامل

مخلوطی از مواد فرسایش یافته (نانوذرات)، فازهای مایع و بخار است که در فشار موضعی قرار دارند. تفاوت فشار بین فاز مایع و بخار در مرز ستون پلاسما به همراه امواج ضربه ای ناشی از برخورد پرتو لیزر با هدف ماده، موجب تشکیل نانوذرات با مورفولوژی کروی می شود (۱۸).

برای نانوذرات سنتز شده در آب مقطر در شکل (۴)، آنالیز EDS ارائه شده است. این نتایج نشان دهنده حضور دو عنصر نیکل و اکسیژن، به ترتیب با مقادیر وزنی ۶۰/۸۹ و ۳۹/۱۱



شکل ۴- نتایج آنالیز نقطه‌ای (EDS) از نانوذرات سنتز شده نیکل در آب مقطر.

است. به‌طور کلی، نانوذرات فلزی نظیر نیکل، دارای پیک جذب پلاسمونی سطحی^۹ هستند که معمولاً در ناحیه مرئی ظاهر می‌شوند؛ در حالی که نانوذرات نیمه‌رسانا یعنی اکسید نیکل، دارای پیک جذب پلاسمونی در ناحیه فرابنفش هستند. بر اساس تئوری مای^{۱۰} که طیف نوری نانوذرات فلزی مختلفی را در آب و خلأ اندازه‌گیری کرده‌اند (۱۹). برای نانوذرات نیکل عدد جذب پلاسمونی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر تعیین شده است. همان‌طور که مشخص است، یک پیک جذب در محدوده ۲۶۰ نانومتر مربوط به اکسید نیکل است. یک پیک دیگر نیز در محدوده ۳۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر مربوط به نانوذرات نیکل مشاهده می‌شود (۶ و ۷).

۲-۳- بررسی نانوذرات سنتز شده در آب مقطر حاوی

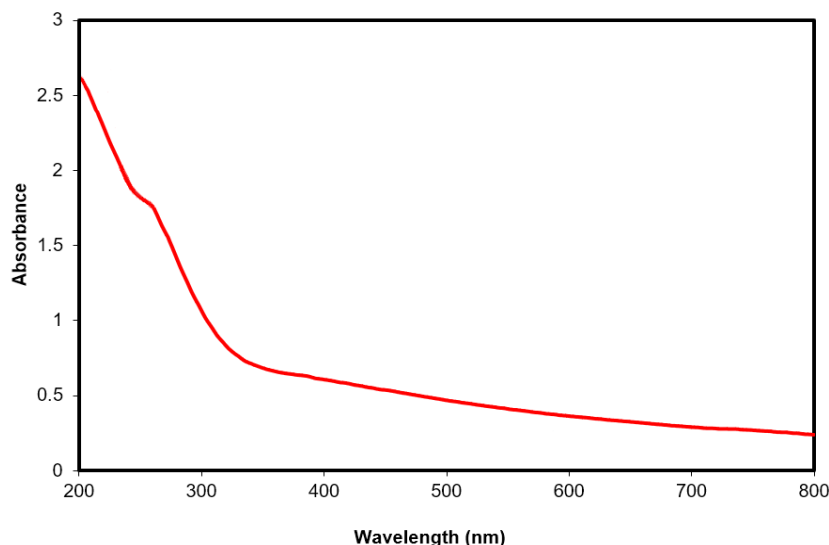
پایدارکننده PVP

در این بخش نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی آب مقطر همراه پایدارکننده PVP بررسی می‌شوند. به‌منظور بررسی نوع نانوذرات سنتز شده در این حلال، نمونه تحت آنالیز XRD قرار گرفت. الگوی XRD مربوط به نمونه نانو ذرات نیکل سنتز شده در حلال حاوی آب مقطر همراه پایدارکننده PVP در شکل (۶)

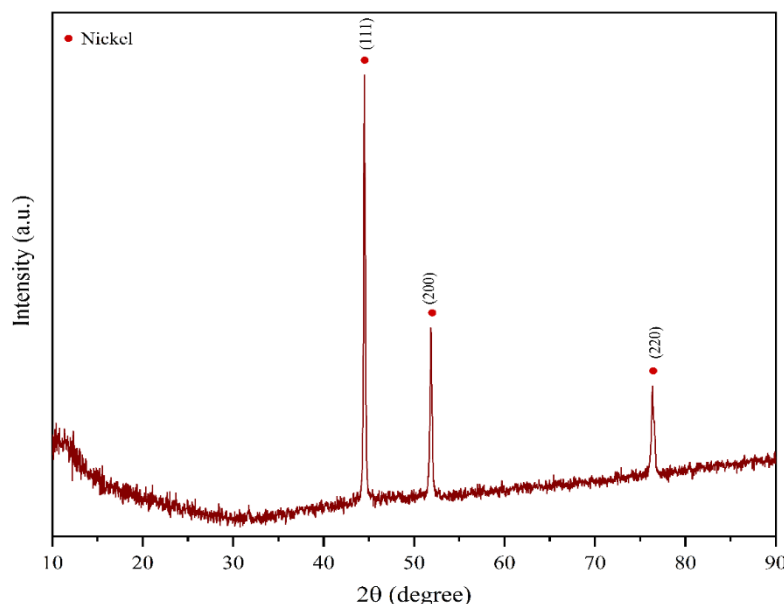
درصد است. این مقادیر بسیار حائز اهمیت هستند و می‌توانند چندین نکته کلیدی را در مورد ترکیب و ساختار نانوذرات سنتز شده بیان کنند. حضور عنصر نیکل به‌عنوان عمده‌ترین عنصر در این نانوذرات، نشان‌دهنده موفقیت در فرآیند سنتز و دستیابی به نانوذرات نیکل است. با این حال، نسبت قابل توجهی از اکسیژن (۳۹/۱۱ درصد)، می‌تواند به‌وضوح بیانگر تشکیل اکسید نیکل در طی فرآیند سنتز باشد. اکسید نیکل به‌عنوان یک فاز ناخواسته در نانوذرات می‌تواند بر خواص الکتریکی آن‌ها تأثیر بگذارد و در نتیجه به کارایی نانوذرات در کاربردهای مختلف، به‌ویژه در جوهرهای رسانا، لطمه بزند.

تحلیل دقیق این داده‌ها نشان می‌دهد که کنترل پارامترهای سنتز مانند نوع حلال می‌تواند به‌طور چشمگیری بر نسبت این عناصر تأثیر بگذارد. به‌علاوه، روابط بین این عناصر و ساختار نانوذرات نیز نیاز به بررسی بیشتر دارد، چرا که حضور اکسید ممکن است ناشی از تماس نانوذرات با اکسیژن موجود در محیط باشد. در قسمت بعدی این پژوهش، تأثیر محافظت‌کننده پلیمری PVP روی نانوذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج آزمون طیف‌سنجی نوری مرئی - فرابنفش (UV-Vis) برای نانوذرات سنتز شده در آب مقطر در شکل (۵) ارائه شده



شکل ۵- نتایج آزمون طیف‌سنجی نوری مرئی- فرابنفش (UV-VIS) برای نانوذرات سنتز شده در آب مقطر.



شکل ۶- الگوی XRD از نانوذرات نیکل سنتز شده در حلال حاوی آب مقطر و پایدارکننده PVP.

نیکل است. اکسید نیکل باعث کاهش رسانایی نانوذرات نیکل می‌شود و جوهر نیکل حاوی فاز اکسیدی نمی‌تواند خواص مناسبی از خود نشان دهد؛ اما در مقابل، سنتز نانوذرات نیکل خالص منجر به تولید جوهر رسانای باکیفیت و با رسانایی مطلوب می‌شود. بررسی‌ها نشان داد پایدارکننده PVP مانع از اکسید شدن نانوذرات نیکل شده است. سورفکتانت PVP می‌تواند از طریق اتم‌های نیتروژن روی سطح نانوذرات نیکل

ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، پیک‌های ایجاد شده مطابق با نتایج ارائه شده در گزارش‌های قبلی و منطبق با شماره کارت (JCPDS Card No. 87-0712) در زوایای 44.5° ، 51.8° و 77.5° درجه است که به ترتیب مربوط به صفحات کریستالی (111)، (200) و (220) فاز نیکل خالص با ساختار مکعبی وجوه مرکزدار^{۱۱} می‌باشد (۲۰ و ۲۱). جلوگیری از تشکیل اکسید نیکل، امر مهمی در تهیه نانوذرات

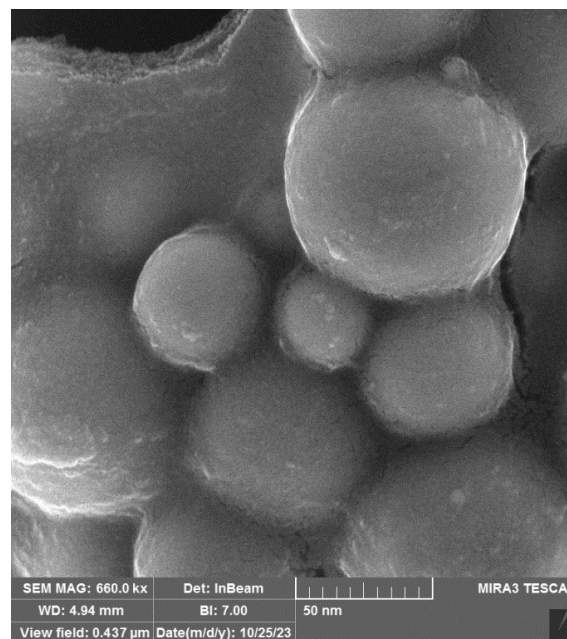
نانومتر) است. علت افزایش اندازه نانوذرات در آب مقطر خالص می‌تواند به خاطر تشکیل لایه اکسیدی در اطراف نانوذرات باشد.

به منظور بررسی ساختار و مورفولوژی نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی پایدارکننده PVP، نمونه تحت آنالیز با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) قرار گرفت که تصاویر مربوط به آن در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است، نانوذرات نیکل سنتز شده با میانگین اندازه ذرات ۶۰ نانومتر، مورفولوژی کروی و سطح صاف مشاهده می‌شوند. حضور پایدارکننده PVP و عدم تشکیل اکسید نیکل در نانوذرات، باعث تشکیل سطح صاف می‌شود (۲۲ و ۲۳). در شکل (۷)، لایه پلیمری نانوذرات را احاطه کرده است که نشان‌دهنده حضور PVP در اطراف نانوذرات است.

نتایج آنالیز EDS در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، عناصر نیکل و کربن، با درصدای وزنی ۷۲/۵ و ۲۷/۵ شناسایی شدند. علت وجود کربن را می‌توان به حضور پایدارکننده PVP نسبت داد که اطراف نانوذره نیکل را احاطه کرده است. عدم شناسایی عنصر اکسیژن، نشان‌دهنده سنتز نانوذرات نیکل خالص و عدم وجود اکسید در نانو ذرات است.

حضور نیکل به عنوان عنصر اصلی در این نانوذرات تأییدی بر موفقیت فرایند سنتز نانوذرات نیکل خالص است که قابلیت‌های آن را در کاربردهای مختلف همچون جوهرهای رسانا تقویت می‌کند. علت وجود کربن را می‌توان به حضور پایدارکننده PVP نسبت داد که به طور عمده برای جلوگیری از اکسید شدن نانوذرات نیکل و ایجاد یک لایه محافظ اطراف آن‌ها استفاده شده است. این لایه علاوه بر جلوگیری از اکسید شدن، می‌تواند بر خواص سطحی نانوذرات تأثیر بگذارد و به بهبود پایداری شیمیایی و فیزیکی نانوذرات کمک کند.

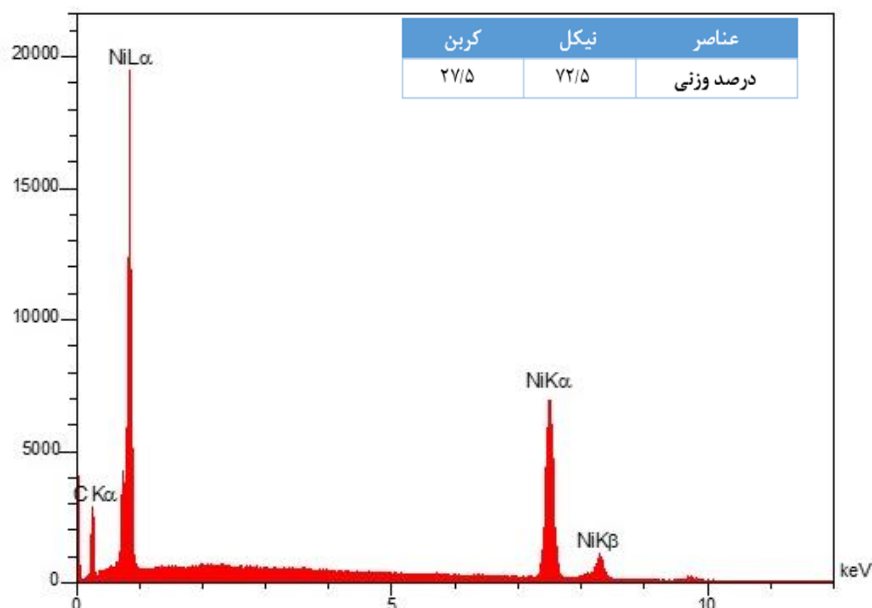
عدم شناسایی عنصر اکسیژن در این آنالیز یک نکته مثبت است، چراکه می‌تواند نشان‌دهنده خلوص نانوذرات و عدم



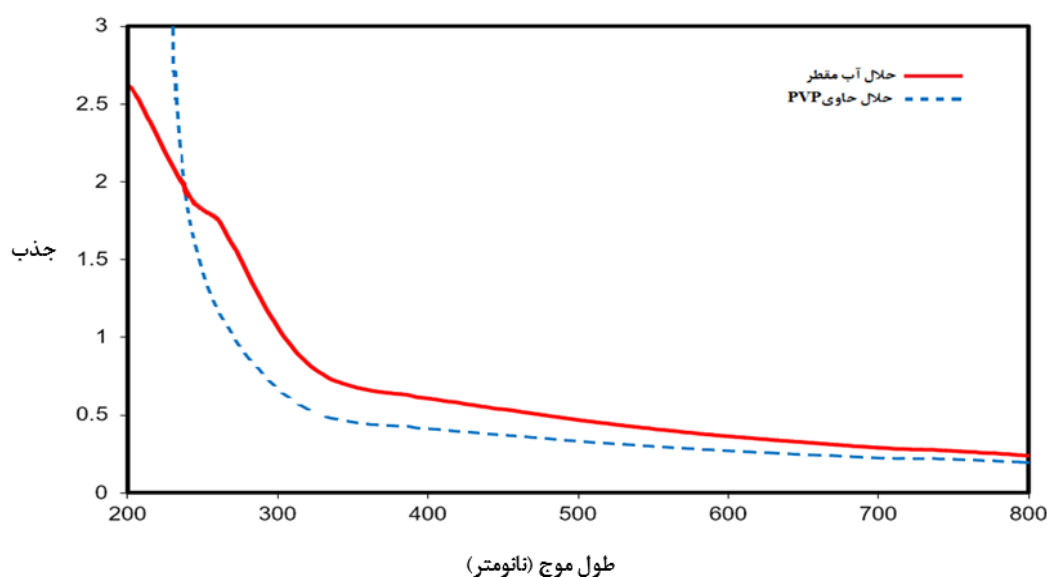
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) از نانوذرات نیکل سنتز شده در آب مقطر حاوی پایدارکننده PVP.

جذب شود و برهمکنش قوی با آن‌ها داشته باشد؛ بنابراین یک لایه پوششی کامل روی سطح نانوذرات ایجاد می‌کند که از اکسید شدن، رشد و تجمع نانوذرات نقره جلوگیری می‌کند.

عدم حضور فاز اکسیدی در الگوهای XRD نشان‌دهنده نانوذرات نیکل خالص است که می‌تواند الگوهای رسانای مناسب ایجاد کند. لازم به ذکر است که این میزان دقت نتایج به دست آمده از الگوهای XRD برای تأیید خالص بودن نانوذرات، برای الگوهای مدارهای چاپی کافی است. مکانیسم عمل بدین صورت است که در حین فرسایش، پایدارکننده PVP با قرارگیری در اطراف نانوذرات مانع از تشکیل پیوند بین اتم‌های نیکل و اکسیژن می‌شود؛ در نتیجه از اکسید شدن نیکل حین فرسایش لیزری جلوگیری می‌شود. به منظور محاسبه اندازه بلورک نانوذرات نیکل از رابطه شرر استفاده شد. اندازه بلورک محاسبه شده طبق رابطه (۱)، برای نانوذرات نیکل سنتز شده در آب مقطر حاوی PVP، مقدار ۵۳ نانومتر برآورد شد که مقدار به دست آمده کمتر از نانوذرات سنتز شده در آب مقطر (۶۷



شکل ۸- نتایج آنالیز نقطه‌ای (EDS) از نانوذرات سنتز شده نیکل در حلال حاوی آب مقطر و پایدارکننده PVP.



شکل ۹- نتایج آزمون طیف‌سنجی نوری مرئی-فرابنفش (UV-VIS) برای نانوذرات سنتز شده در حلال آب مقطر حاوی PVP.

نتایج آزمون طیف‌سنجی نوری مرئی-فرابنفش (UV-Vis) برای نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی پایدارکننده PVP در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد برای پیک جذب نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی PVP که با خط چین مشخص شده است، پیک جذب پلاسما نیکل در محدوده ۳۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر تشکیل شده است. نکته قابل توجهی که

وجود اکسید نیکل باشد. این نکته به‌ویژه برای کاربردهایی که نیازمند خواص الکتریکی است، حائز اهمیت می‌باشد. اکسید شدن نانوذرات می‌تواند خواص آن‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار دهد و به این ترتیب، نبود اکسیژن در نتایج EDS، نشان‌دهنده موفقیت در کنترل شرایط سنتز و تولید نانوذرات بدون آلودگی اکسیدی است.

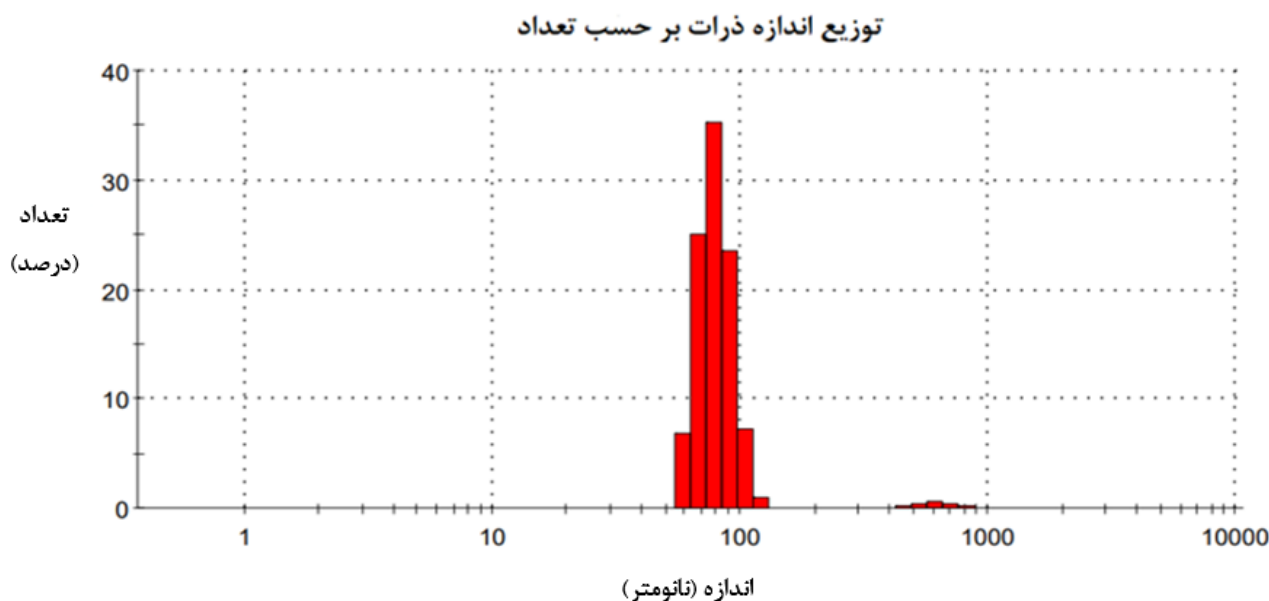
بهینه در نظر گرفته شد؛ آزمون تفرق دینامیکی نور (DLS) انجام شد. نتایج مربوط به این آزمون در شکل (۱۰) ارائه شده است. با توجه به آنچه در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، در نمودار توزیع اندازه ذرات برحسب تعداد، دو پیک مشاهده می‌شود. این دو پیک نشان‌دهنده وجود دودسته نانوذرات سنتز شده است. دسته اول نانوذرات نیکل با ابعاد حدوداً ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر و دسته دوم شامل نانوذرات با ابعاد چندصد نانومتر است. غالب نانوذرات دارای توزیع در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر (۹۸/۵ درصد از نانوذرات سنتز شده) و تعدادی از آن‌ها نیز در محدوده ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر (۱/۵ درصد از نانوذرات سنتز شده) هستند. نکته‌ای که در خصوص نتایج آزمون DLS وجود دارد این است که این آنالیز اندازه قطر هیدرودینامیکی را می‌دهد و به همین علت اندازه ذرات اعلام شده بزرگ‌تر از مقدار واقعی آن‌ها است (۲۷).

درواقع، تقریب ریلی می‌تواند نشان دهد که شدت پراکندگی متناسب با D^6 (که D قطر ذره است) می‌باشد. به عنوان مثال، اگر دو ذره را در نظر بگیریم که قطر یکی از آن‌ها ۱۰ برابر بزرگ‌تر از دیگری باشد، فاکتور D^6 بیانگر این حقیقت است که بزرگ‌ترین ذره می‌تواند تا 10^6 برابر بیشتر از کوچک‌ترین ذره نور را پراکنده کند. این یک نکته کلیدی در درک پدیده‌های پراش نوری و تأثیر اندازه ذرات بر نتایج تجربی است.

از سوی دیگر، نور پراکنده‌شده توسط ذرات بزرگ‌تر می‌تواند نور پراکنده‌شده از ذرات کوچک‌تر را پنهان کند. این پدیده به‌ویژه در تکنیک‌هایی مانند تجزیه و تحلیل پراش نور دینامیکی (DLS) بسیار حائز اهمیت است، زیرا می‌تواند منجر به منحرف شدن نتایج اندازه‌گیری شود و اندازه نانوذرات به دست آمده را بزرگ‌تر از اندازه واقعی آن‌ها نشان دهد. به عبارتی دیگر، وقتی نانوذرات در حال تأثیر بر بازخورد نوری هستند، ممکن است نانوذرات کوچک‌تر به دلیل پراکندگی ضعیف‌تری که دارند، در پس زمینه پنهان شوند و این باعث می‌شود که اندازه‌گیری‌های ارائه شده به وسیله DLS در مقایسه با اندازه واقعی آن‌ها افزایش یابد.

وجود دارد آن است که پیک جذب پلاسمونی مربوط به اکسید نیکل که در نانوذرات سنتز شده در حلال آب مقطر (نمودار قرمز رنگ) در محدوده ۲۶۰ نانومتر وجود داشت، کاملاً از بین رفته است که این موضوع اثر پایدارکنندگی PVP و ممانعت آن از تشکیل اکسید را به خوبی نشان می‌دهد. از طرف دیگر نتایج آزمون طیف UV-Vis نشان می‌دهد که سنتز نانوذرات نیکل در حلال حاوی آب مقطر نسبت به حلال حاوی پایدارکننده PVP دارای بازده تولید بالاتری است. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است، نمودار مربوط به نانوذرات سنتز شده در حلال آب مقطر (رنگ قرمز)، بالاتر از نمودار نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی PVP است. به علت افزایش زیاد چگالی و ویسکوزیته در محلول آب مقطر حاوی PVP، به عنوان مانعی بر سر راه عبور پرتو لیزر عمل کرده و باعث کاهش بازده می‌گردد. این موضوع در رنگ محلول‌های کلئیدی ایجاد شده از هر دو حلال نیز قابل مشاهده بود. محلول کلئیدی حاوی نانوذرات سنتز شده در آب مقطر نسبت به محلول کلئیدی حاوی نانوذرات سنتز شده در PVP، کدرتر بود. درواقع علت تغییر رنگ کلئید نانوذرات نیکل مربوط به پدیده تشدید پلاسمون سطحی است. پدیده پلاسمونی به نوسان‌های جمعی و هماهنگ الکترون‌های باند هدایت یک فلز بر اثر امواج الکترومغناطیسی مربوط می‌شود (۲۴). الکترون‌های آزاد نانوذرات فلزی، تحت تأثیر امواج الکترومغناطیسی شروع به نوسان می‌کنند. هنگامی که فرکانس نوسان‌های موج الکترومغناطیس بر فرکانس ذاتی نوسان‌های الکترون‌های آزاد نانوذره (پلاسمون سطحی) منطبق شود، پدیده تشدید پلاسمون سطحی رخ می‌دهد. این پدیده موجب جذب قابل توجه انرژی موج نزدیک فرکانسی با عنوان فرکانس تشدید پلاسمون سطحی می‌شود. بر اثر جذب امواج نورانی توسط فلز، پدیده‌های گرمایی با منشأهای متفاوتی اتفاق می‌افتد که خود باعث تغییرات خواص نوری محیط می‌شود (۲۵ و ۲۶).

به منظور ارزیابی توزیع یکنواختی و اندازه نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی پایدارکننده PVP که به عنوان حلال



شکل ۱۰- نتایج آزمون تفرق دینامیکی نور (DLS) برای نانوذرات نیکل سنتز شده در حلال حاوی آب مقطر و پایدارکننده PVP.

منبسط می‌شود، فلز مذاب به دلیل ناپایداری کلوین- هلمهولتز، قطراتی با شعاع‌هایی در مقیاس ده‌ها نانومتر تشکیل می‌دهد. ناپایداری رالی- تیلور، زمانی ایجاد می‌شود که سیالی با چگالی بالاتر به دلیل گرانش یا شتاب، به سیالی با چگالی کمتر فشار داده شود. این نوع ناپایداری برای توضیح تشکیل قطرات در مورد اهداف با سطوح موج‌دار پیشنهاد می‌شود. هنگامی که این مدل برای فرسایش لیزری اعمال می‌شود، تصور می‌شود که امواج در نتیجه ناپایداری مویرگی لایه سطحی ذوب شده تشکیل می‌شوند. برای پالس بعدی، مذاب در امتداد دره‌ها و تپه‌ها حرکت می‌کند. شتاب گریز از مرکز در نتیجه ممکن است باعث ایجاد برآمدگی‌هایی در سطح مشترک بخار- مایع شود که منجر به ایجاد قطرات می‌شود. مکانیسم‌های فوق برای توضیح حضور ذرات بزرگ‌تر استفاده شده‌اند؛ اما در بحث فرسایش لیزری در فاز مایع، تشکیل قطرات به دلیل اثر پاشش، زمانی که یک قطره مایع روی یک لایه مایع می‌افتد، رخ می‌دهد. برای اعداد وبر به اندازه کافی بالا و قطر قطره بزرگ‌تر از ضخامت لایه مایع (معمولاً این نسبت حدود ۱۰ است) پس از برخورد، ورقه‌ای از مایع به سمت بیرون و بالا پرتاب می‌شود. ورقه پرتاب شده مانند جت، دیواره‌ای را تشکیل می‌دهد که در نهایت به قطرات تجزیه می‌شود.

بر اساس مطالعات صورت گرفته، دو مکانیسم فیزیکی انفجار فاز^{۱۲} و ناپایداری ریلی- فلات^{۱۳} را می‌توان به عنوان علت دودسته شدن توزیع اندازه نانوذرات دانست (۱۶ و ۲۸). انفجار فاز فرآیندی از جوانه‌زنی همگن در طی فرسایش لیزری پالسی با شدت بالا است که منجر به تشکیل مخلوطی از قطرات و بخار در مقیاس نانو می‌شود. انفجار فاز، به عنوان علت تشکیل اندازه نانومتری ذرات شناسایی شده است. مدل‌هایی برای تشکیل ذرات بزرگ‌تر در طول لایه‌نشانی با فرسایش لیزری، بر اساس مکانیسم‌های فیزیکی مختلف، مانند پوسته‌پوسته شدن^{۱۴} (تجزیه مکانیکی) و اثرات هیدرودینامیکی مانند ناپایداری جبهه تبخیر، ناپایداری‌های رالی- تیلور^{۱۵} و کلوین- هلمهولتز^{۱۶} پیشنهاد شده‌اند. ناپایداری جبهه تبخیر، به دلیل تشکیل موج مویرگی در سطح ذوب شده رخ می‌دهد. موج رشد می‌کند، زیرا فشار در دره‌ها بیشتر از تپه‌ها است که منجر به افزایش مثبت ناپایداری می‌شود. ناپایداری کلوین هلمهولتز، در حضور یک جریان برشی با سرعت اتفاق می‌افتد که ممکن است در فصل مشترک مایع و گاز رخ دهد. این پدیده به عنوان توضیحی برای ذرات بزرگ مشاهده شده استفاده شده است. همان‌طور که ستون بخار به صورت جانبی در امتداد سطح مذاب

۳- در توزیع اندازه نانوذرات سنتز شده با آنالیز DLS در حلال حاوی پایدارکننده PVP، دودسته نانوذرات با ابعاد در حدود ۶۰ تا ۸۰ نانومتر (۹۸/۵ درصد از نانوذرات سنتز شده) و ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر (۱/۵ درصد از نانوذرات سنتز شده) مشاهده شد که دو مکانیسم فیزیکی انفجار فاز و ناپایداری ریلی - فلات را می توان به عنوان علت دودسته شدن توزیع اندازه نانوذرات مطرح کرد.

۴- نانوذرات سنتز شده در حلال حاوی پایدارکننده PVP، به علت مورفولوژی مناسب، توزیع مناسب اندازه ذرات و عدم تشکیل اکسید در آن، می تواند جایگزین مناسبی برای تولید جوهرهای رسانا باشد.

تشکر و سپاسگزاری

مطالعه حاضر با حمایت های فنی و مالی کارکنان مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر به انجام رسیده است. بدین وسیله از کلیه کارکنان و اساتید آن مجتمع بابت کمک های علمی، آزمایشگاهی و مالی تقدیر و تشکر می شود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

شاهین ترکمانی: جمع آوری داده ها، نوشتن مقاله. **حامد نادری سامانی:** راهنمای پروژه، تحلیل و تفسیر داده ها، اعتبارسنجی، نوشتن مقاله. **رضا شجاع رضوی:** طراحی و ایده پردازی مطالعه. **احسان نادری سامانی:** طراحی و ایده پردازی مطالعه، تحلیل و تفسیر داده ها. **محمد گواهیان جهرمی:** طراحی و ایده پردازی مطالعه. **محمدرضا برهانی:** طراحی و ایده پردازی مطالعه. **عاطفه حیدریان:** طراحی و ایده پردازی مطالعه.

می توان یک قیاس بین فرسایش لیزری با پالس های نانو ثانیه ای با شدت بالا و تشکیل قطرات از طریق پاشش کراون ترسیم کرد. ذرات بزرگ به دلیل ناهمگنی فضایی شدت پرتو لیزر تولید می شوند که منجر به خروج هیدرودینامیکی مذاب در حاشیه نقطه تابش شده می شود. از این رو، ناهمگنی فضایی در مقیاس ۱۰-۱۰۰ میکرومتر در جهت جانبی روی سطح هدف وجود دارد. برای پروفیل های لیزری دیگر، این اثر مشابه خواهد بود زیرا دما در سراسر سطح یکنواخت نخواهد بود. به دلیل ناهمگن بودن شدت لیزر، توزیع دما در سطح هدف وجود خواهد داشت که بالاترین دما در مرکز نقطه تابش شده (کانون پرتو لیزر) است. از این رو، هنگامی که انفجار فاز در مرکز رخ می دهد، حلقه مذاب یک تکه از مرکز به سمت پیرامون می گیرد که منجر به تشکیل یک جت مایع می شود. ذرات بزرگ در نتیجه ناپایداری ریلی - فلات ایجاد شده در جت، شبیه به تجزیه یک جت مایع به یک اسپری از قطرات، تشکیل می شوند (۲۹). ناپایداری ریلی - فلات منجر به ایجاد قطراتی با اندازه های قابل مقایسه با ابعاد جانبی جت می شود (منظور عمق لایه ذوب شده است). از آنجایی که عمق لایه ذوب شده در حد میکرومتر است، اندازه ذرات حاصل می تواند از صدها نانومتر تا میکرومتر باشد.

۴- نتیجه گیری

مهم ترین نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر می باشد:

۱- نانوذرات سنتز شده با روش فرسایش لیزری در حلال حاوی آب مقطر، شامل نانوذرات نیکل با ساختار کریستالی FCC و نانوذرات هسته - پوسته نیکل / اکسید نیکل با مورفولوژی کروی و سطح زبر است.

۲- نانوذرات سنتز شده با روش فرسایش لیزری در حلال حاوی آب مقطر به همراه پایدارکننده PVP، شامل نانوذرات نیکل خالص با مورفولوژی کروی و سطح صاف با ساختار کریستالی FCC است. علت عدم تشکیل اکسید نیکل، احاطه - شدن نانوذرات نیکل حین سنتز توسط مولکول های PVP و ممانعت آن از تشکیل پیوند بین اتم های اکسیژن با نیکل است.

واژه‌نامه

1. laser ablation in liquid (LAL)
2. polyvinylpyrrolidone (PVP)
3. field emission scanning electron microscope (FESEM)
4. energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
5. X-ray diffraction (XRD)
6. dynamic light diffraction (DLS)
7. ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis)
8. plume plasma
9. surface plasmon resonance (SPR)
10. Mie theory
11. face centered cubic (FCC)
12. phase explosion
13. Rayleigh–Plateau
14. spallation
15. Raleigh–Taylor
16. Kelvin–Helmholtz

مراجع

1. Zhang HX, Wu XX, Tao R, Shi LJ, Zhu CY, Li QZ. A Study on the anti-electromagnetic radiation performance of fabric with silver-plated fibers. *Adv Mater Res*. 2011;332:878-81. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.332-334.878>
2. Sonehara M, Noguchi S, Kurashina T, Sato T, Yamasawa K, Miura Y. Development of an electromagnetic wave shielding textile by electroless Ni-based alloy plating. *IEEE Trans Magn*. 2009;45(10):4173-5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2021403>
3. Ganjali M, Ganjali M, Sangpour P. Synthesis of bimetallic nanoalloy layer using simultaneous laser ablation of monometallic targets. *J Appl Spectrosc*. 2014; 80(6):991-7. <https://doi.org/10.1007/s10812-014-9877-x>
4. Ganjali M, Ganjali M, Khoby S, Meshkot MA. Synthesis of Au-Cu nano-alloy from monometallic colloids by simultaneous pulsed laser targeting and stirring. *Nanomicro Lett*. 2011;3:256-63. <http://dx.doi.org/10.3786/nml.v3i4.p256-263>
5. Kumar R, Mondal K, Panda PK, Kaushik A, Abolhassani R, Ahuja R, et al. Core-shell nanostructures: perspectives towards drug delivery applications. *J Mater Chem B*. 2020;8(39):8992-9027. <https://doi.org/10.1039/D0TB01559H>
6. Pajor-Swierzy A, Szczepanowicz K, Kamyshny A, Magdassi S. Metallic core-shell nanoparticles for conductive coatings and printing. *Adv Colloid Interface Sci*. 2022;299:102578. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102578>
7. Panahi A, Monsef R, Hussein SA, Hammood SA, Al-Azzawi WK, Raffik DE, et al. Multidisciplinary methods for synthesis of visible-light-driven TmVO₄ nanostructure photocatalyst with enhanced photocatalytic activity towards removal of toxic contaminants. *Int J Hydrogen Energy* 2023;48(85): 33155-65. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.125>
8. Kim CK, Lee G-J, Lee MK, Rhee CK. A novel method to prepare Cu@ Ag core-shell nanoparticles for printed flexible electronics. *Powder Technol*. 2014;263:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.064>
9. Jamdar M, Monsef R, Ganduh SH, Dawi EA, Jasim LS, Salavati-Niasari M. Unraveling the potential of sonochemically achieved DyMnO₃/Dy₂O₃ nanocomposites as highly efficient visible-light-driven photocatalysts in decolorization of organic contamination. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2024;269:115801. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115801>
10. Naderi-Samani H, Razavi RS, Abbaszadeh H, Amiri-Moghaddam A, Mashhadi M, Alizadeh A. Synthesis of WC-Co composite powder by in-situ solid carbothermic reduction method. In: *Advanced Ceramics Materials - Emerging Technologies*. IntechOpen; 2025. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007857>
11. Amin Y, Chen Q, Zheng L-R, Tenhunen H. Development and Analysis of Flexible UHF RFID Antennas for Green. *Prog Electromagn Res*. 2012; 130:1-15. <https://doi.org/10.2528/PIER12060609>
12. Rahman A, Guisbiers G. Synthesis of Nickel-Based Nanoparticles by Pulsed Laser Ablation in Liquids: Correlations between Laser Beam Power, Size Distribution and Cavitation Bubble Lifetime. *Metals* 2024;14(2):224. <https://doi.org/10.3390/met14020224>
13. Esmaeili E, Salavati-Niasari M, Mohandes F, Davar F, Seyghalkar H. Modified single-phase hematite nanoparticles via a facile approach for large-scale synthesis. *Chem Eng J*. 2011;170(1):278-85. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.010>
14. Naderi Samani H. Synthesis and study of properties of copper/silver core-shell nanoparticles by laser ablation for use in conductive ink [PhD thesis]. Tehran: Malek Ashtar University of Technology; 2023.
15. Naderi-Samani H, Razavi RS, Loghman-Estarki MR, Ramazani M. The effects of organoclay on the morphology and mechanical properties of PAI/clay nanocomposites coatings prepared by the ultrasonication assisted process. *Ultrason Sonochem*. 2017;38:306-16. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.009>
16. Nikov RG, Nedyalkov N, Karashanova D. Laser ablation of Ni in the presence of external magnetic field: Selection of micro-sized particles. *Appl Surf*

- Sci. 2020;518:146211.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146211>
17. Naderi-Samani H, Shoja Razavi R, Mozaffarinia R. Investigating the Effect of Laser Wavelength and Environment on the Synthesis of Copper and Copper Oxide Nanoparticles by Nanosecond Nd: YAG Laser in Liquid. *J Adv Mater (Esteghlal)* 2024;43(1):27-39. <https://doi.org/10.47176/jame.43.1.1037>
 18. Naderi-Samani E, Shoja Razavi R, Gholampour M, PooladZadeh M, Naderi-Samani H. Investigating Optical Properties, Morphology and Size of Silver Nanoparticles Prepared by Nanosecond Nd:YAG Laser in Liquid. *New Process Mater Eng.* 2024;18(2):47-61.
<https://doi.org/10.71753/ma.2024.1089865>
 19. Creighton JA, Eadon DG. Ultraviolet-visible absorption spectra of the colloidal metallic elements. *J Chem Soc.* 1991;87(24):3881-91.
<https://doi.org/10.1039/FT9918703881>
 20. Jung HJ, Choi MY. Specific solvent produces specific phase Ni nanoparticles: a pulsed laser ablation in solvents. *J Phys Chem C.* 2014;118(26):14647-54. <https://doi.org/10.1021/jp503009a>
 21. Ghdhaib BM, Rashid SN. Characterization of Nickel and Nickel Oxide Nanoparticles Prepared by Laser Ablation Technique: Effect of Laser Wavelength and Energy. *Iraqi J Appl Phys.* 2024;20(3):477-484.
 22. Choi H, Kim HS. In situ synthesis and stabilization of PVP-coated aluminum nanoparticles by one-step pulsed laser ablation in liquid: Investigation and quantification of PVP coverage effects. *Surf Interfaces* 2023;43: 103594.
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103594>
 23. Lasemi N, Rupprechter G, Liedl G, Eder D. Near-infrared femtosecond laser ablation of Au-coated Ni: effect of organic fluids and water on crater morphology, ablation efficiency and hydrodynamic properties of NiAu nanoparticles. *Mater.* 2021;14(19): 5544.
<https://doi.org/10.3390/ma14195544>
 24. Karami M, Ghanbari M, Amiri O, Salavati-Niasari M. Enhanced antibacterial activity and photocatalytic degradation of organic dyes under visible light using cesium lead iodide perovskite nanostructures prepared by hydrothermal method. *Sep Purif Technol.* 2020;253: 117526.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117526>
 25. Hadi AA, Badr BA, Mahdi RO, Khashan KS. Rapid laser fabrication of Nickel oxide nanoparticles for UV detector. *Optik* 2020;219:165019.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165019>
 26. Ganjali M, Vahdatkhah P, Marashi S. Synthesis of Ni nanoparticles by pulsed laser ablation method in liquid phase. *Procedia Mater Sci.* 2015;11:359-63.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.127>
 27. Naderi-Samani H, Razavi RS, Mozaffarinia R. Investigating the effect of 532 nm and 1064 nm wavelengths and different liquid media on the qualities of silver nanoparticles yielded through laser ablation. *Mater Chem Phys.* 2023;305:128001.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128001>
 28. Musaev O, Yan J, Dusevich V, Wrobel J, Kruger M. Ni nanoparticles fabricated by laser ablation in water. *Appl Phys A.* 2014;116:735-9.
<https://doi.org/10.1007/s00339-014-8569-y>
 29. Naderi-Samani H, Razavi RS. Synthesis of nanoparticles using pulsed laser. In: *Pulsed Laser Ablation - Recent Advances and Applications.* IntechOpen; 2024.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.1004415>