

## مشخصه‌یابی نانوذرات کامپوزیتی آلومینیوم-CNT سنتز شده به روش انفجار الکتریکی سیم در استون

عبداله مصلح، حمیدرضا شاهرودی\* و رضا پورصالحی  
گروه نانومواد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۴/۲۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۵/۲۵)

**چکیده** - در این پژوهش از روش انفجار الکتریکی سیم برای تولید نانوکامپوزیت آلومینیوم-CNT در محیط استون استفاده شد. به منظور سنتز نانوکامپوزیت آلومینیوم-CNT، ابتدا نانولوله‌های کربنی توسط دستگاه فراآوا در استون پخش شدند. سپس سیم آلومینیومی در این محیط منفجر شد. نمونه‌های سنتز شده به منظور مشخصه‌یابی تحت آزمون‌های طیف سنجی FTIR و TEM قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نانوذرات سنتز شده کروی شکل و دارای میانگین اندازه ذرات ۴ نانومتر هستند. هم‌چنین نانوذرات تولید شده در استون پایدار ماندند. نتایج نشان داد که برهم‌کنش خوبی بین نانوذرات آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی در محیط استون وجود دارد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که استون، محیطی مناسب برای سنتز نانوکامپوزیت آلومینیوم-CNT است چون در این محیط کامپوزیتی یکپارچه با توزیع مناسب نانوذرات به دست می‌آید.

واژگان کلیدی: انفجار الکتریکی سیم، نانوکامپوزیت، آلومینیوم، نانولوله کربنی، سنتز نانوذرات، محیط مایع

## Characterization of Al-CNT Composite Nanoparticles Synthesized by Electrical Explosion of Wire in Acetone

A. Mosleh, H. Shahverdi\* and R. Poursalehi

Nano Materials Group, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: shahverdi@modares.ac.ir

**Abstract:** In this study, electrical wire explosion has been used to produce aluminum carbon nanotube (Al-CNT) nanocomposite particles in acetone medium. In order to synthesize Al-CNT nanocomposites, initially, CNTs were ultrasonically dispersed. Then, aluminum wire was exploded in this medium. Synthesized samples were characterized by Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy and Transmission Electron Microscopy (TEM) methods. The results exhibited formation of spherical nanoparticles in the medium. The average diameter of nanoparticles was 4 nm. Moreover, attained nanoparticles remained stable in acetone. Results revealed a good interaction between aluminum nanoparticles and CNTs in this medium. It is concluded that acetone is a suitable medium for synthesizing Al-CNT nanocomposite as appropriate dispersion of Al-CNT nanoparticles can be achieved in this medium.

**Keywords:** Electrical wire explosion, Nanocomposite, Aluminum, CNT, Nanoparticle synthesis, Liquid media

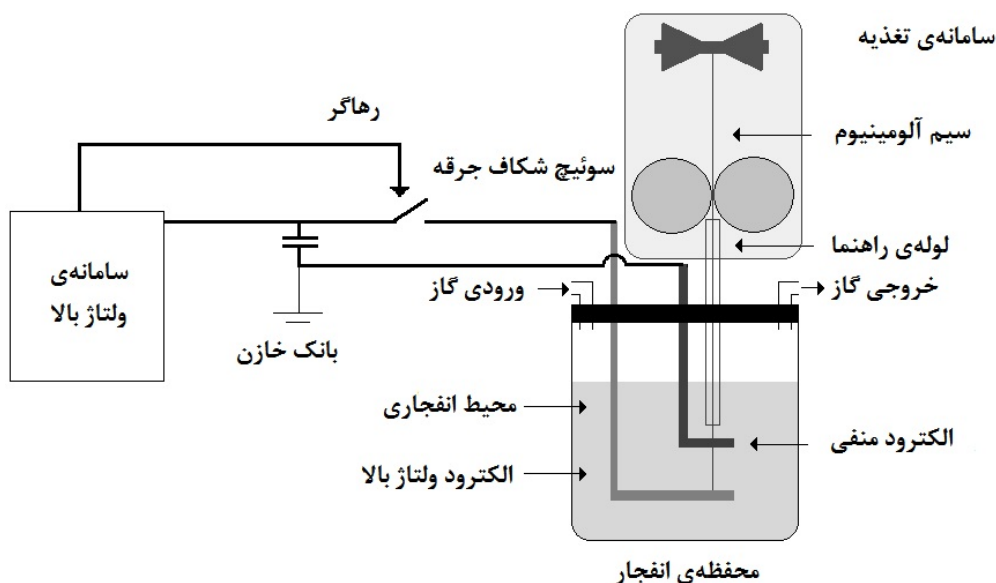
## ۱- مقدمه

نیاز روز افزون تجهیزات صنعتی به مواد با ویژگی‌های بهینه شده از قبیل وزن کم‌تر، هزینه تولید پایین‌تر و استحکام بالا، دانش و صنعت امروز را به مطالعه و تولید مواد با چنین ویژگی‌هایی سوق داده است. در این راستا یکی از موادی که امروزه توجه پژوهشگران و صنعتگران را به خود جلب کرده است، مواد کامپوزیتی است. از این رو پژوهش‌ها و تلاش‌های بسیاری برای تولید این دسته از مواد صورت گرفته است. این مواد امروزه به بخش مهمی از زندگی روزمره تبدیل شده‌اند.

روش‌های بیشماری برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با نانولوله کربنی پیشنهاد شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به متالورژی پودر، ریخته‌گری، پاشش حرارتی و روش‌های الکتروشیمیایی اشاره کرد [۱-۴]. روش‌های متالورژی پودر و ریخته‌گری، روش‌های معمول برای تولید کامپوزیت‌های آلومینیوم-CNT هستند اما با این حال در این روش‌ها مقداری از نانولوله کربنی با آلومینیوم واکنش می‌دهد و منجر به تولید کاربید آلومینیوم می‌شود [۵]. هم‌چنین از آن‌جایی که پخش کردن نانولوله‌های کربنی در زمینه فلزی کار ساده‌ای نیست، در برخی موارد نانولوله‌های کربنی در زمینه فلزی به شکل خوشه‌های در هم پیچیده شده در می‌آیند که این خود عاملی برای ایجاد نقاط تمرکز تنش در کامپوزیت می‌شود [۶]. تمرکز تنش در کامپوزیت سبب کاهش کارایی، کاهش طول عمر مفید کامپوزیت و هم‌چنین سبب کاهش انعطاف پذیری آن خواهد شد. به همین منظور،

تولید کامپوزیتی مستحکم‌تر با کمترین نقاط تمرکز تنش، هدف اصلی صنعتگران است. برای ساخت چنین کامپوزیتی، نیاز به تولید کامپوزیت در ابعاد نانو بیش از پیش احساس می‌شود.

انفجار الکتریکی سیم در اصل یکی از روش‌های تولید نانوذرات فلزی است. نانوذرات تولید شده به این روش در مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. در پژوهش‌های گوناگونی از روش انفجار الکتریکی سیم برای تولید نانوذرات فلزی و اکسیدی مانند آلومینیوم، تنگستن و نیکل استفاده شده است [۸-۱۰]. تاکنون پژوهش‌هایی در مورد سنتز نانوذرات فلزی به روش انفجار سیم در محیط‌های مایع و گازی صورت گرفته است [۱۱، ۱۲]. در روش انفجار الکتریکی سیم، یک پالس با جریان و ولتاژ بالا سیم فلزی نازک را در محیط مایع منفجر می‌کند [۱۱]. سنتز نانوذرات فلزی در محیط مایع به روش انفجار الکتریکی سیم چندین مزیت دارد. یکی از این مزیت‌ها، تولید پودرهای غیر اکسیدی بدون نیاز به محیط خلاء است. سنتز نانوذرات کامپوزیتی نیز یکی دیگر از این مزیت‌هاست. با استفاده از این روش می‌توان نانوذرات فلزی و غیر فلزی را با قطر زیر ۱۰۰ نانومتر تولید کرد [۱۳-۱۵]. هم‌چنین استون به دلیل داشتن ساختار قطبی و گشتاور دو قطبی نسبتاً بالا، محیطی مناسب برای تولید نانوذرات است [۱۶]. در این پژوهش از روش انفجار الکتریکی سیم، به‌عنوان روشی جدید و مناسب برای تولید نانو کامپوزیت آلومینیوم-CNT در محیط استون استفاده شده و تأثیر محیط مایع بر اندازه، شکل و پایداری نانوذرات بررسی شده است.



شکل ۱- تصویر نمادین دستگاه آزمایش

## ۲- روش تحقیق

سوییچ شکاف جرقه رهاگر وارد سیم می‌شود. سیم بین الکتروود های منفی و ولتاژ بالا قرار می‌گیرد و ۲۵ میلی‌متر از آن در هر پالس منفجر می‌شود. ولتاژ ۵۰۰ ولت از سیم عبور می‌کند، در نتیجه فقط سیم قرار گرفته بین دو الکتروود گرم می‌شود. سپس سیم در کسری از ثانیه در حدود ۱۰ میلی‌ثانیه منفجر شده و تکه تکه می‌شود.

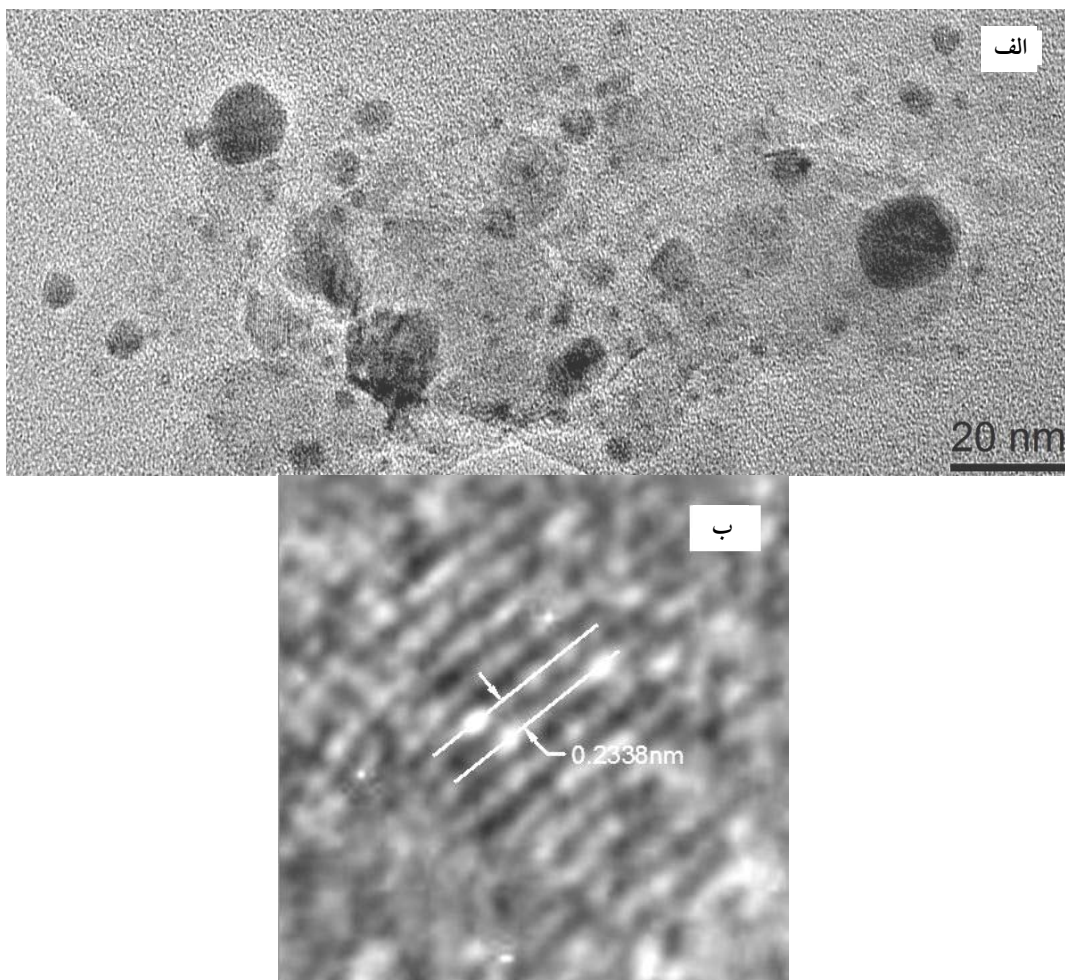
در این پژوهش سنتز نانوذرات کامپوزیتی در محیط استون مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور تهیه محلول کلوییدی حاوی نانولوله های کربنی، مقدار ۰/۴ میلی‌گرم نانولوله کربنی (نانوسیل، بلژیک) به محیط‌های ساخت اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه توسط دستگاه فرا آوا در محیط پخش شد. مشخصه‌یابی نانوذرات کامپوزیتی آلومینیوم-CNT توسط آزمون‌های طیفسنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) شناسایی و میکروسکوپ الکترونی عبوری انجام پذیرفت.

## ۳- نتایج و بحث

شکل ۲- الف تصویر نانوذرات آلومینیوم سنتز شده به روش انفجار الکتریکی سیم در محیط استون را نشان می‌دهد.

در این پژوهش از سیم آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹۹٪ و با ضخامت ۱۳۰ میکرومتر (پیام آوران نانوفناوری فردانگر، تهران، ایران) استفاده شد. شکل ۱ تصویر نمادین محفظه انفجار را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ سیم آلومینیوم توسط سامانه تغذیه وارد لوله راهنما می‌شود. سیم از درون لوله راهنما عبور می‌کند و بین الکتروود منفی و الکتروود ولتاژ بالا قرار می‌گیرد. الکتروودها درون محفظه‌ای از جنس پلی اتیلن ترفتالات (PET) با حجمی برابر ۲۵۰ میلی‌لیتر که محیط استون (دکتر مجلی، ایران) در آن است، قرار دارند. از سوی دیگر، به دلیل حل شدن اکسیژن در حلال‌های آلی، حلال استون قبل از انفجار الکتریکی سیم به مدت ۲۰ دقیقه با گاز آرگون زدایی شد. فضای بالایی محفظه برای جریان گاز آرگون خالی رها شده تا از انفجار خطرناک احتمالی که ناشی از انفجار در محلول است، جلوگیری شود. فاصله بین دو الکتروود حدود ۲۵ میلی‌متر است. هم‌چنین فاصله بین لوله راهنما و الکتروود ولتاژ بالا ۲ میلی‌متر است.

انرژی الکتریکی از سامانه ولتاژ بالا به دست می‌آید. این انرژی در بانک خازن ۵۰۰ میکروفاراد ذخیره شده و توسط



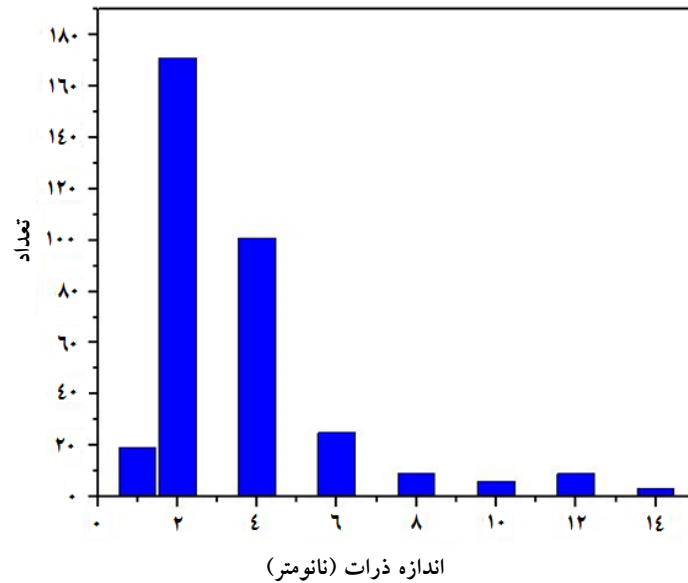
شکل ۲- (الف) نانوذرات آلومینیوم سنتز شده در محیط استون و (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری نانوذره ۴ نانومتری با وضوح بالا. فاصله صفحات بلوری مربوط به صفحه (۱۱۱) آلومینیوم خالص است.

داده شده است. با توجه به شکل ۳ بیش تر نانوذرات تولید شده با قطر ۲ و ۴ نانومترند. میانگین اندازه نانوذرات تولید شده ۴ نانومتر است. شکل ۴ تصویر نانوکامپوزیت تولید شده توسط فرایند انفجار الکتریکی سیم را نشان می دهد. با توجه به شکل ۴ نانو کامپوزیت سنتز شده شامل نانوذراتی با اندازه های گوناگون است که روی نانولوله های کربنی قرار گرفته اند. قرار گرفتن نانوذرات آلومینیوم روی نانولوله های کربنی سبب ایجاد نانوکامپوزیت آلومینیوم-CNT می شود.

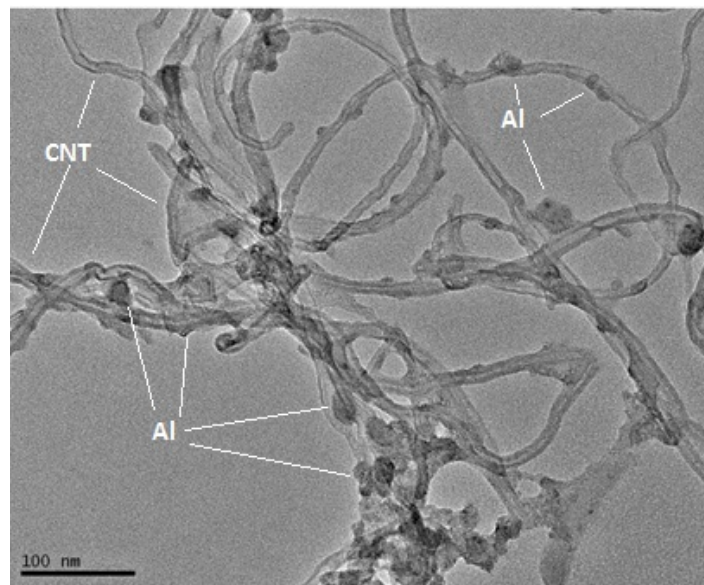
شکل ۵ تصویر طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) این محلول را نشان می دهد. همان طور که در

نانو ذرات آلومینیوم مشاهده شده کاملاً کروی اند یا نسبت ابعادی برابر یک دارند. با توجه به شکل ۲- الف ذرات آلومینیوم تولید شده نانو ساختارند و در ذرات تولید شده هیچ گونه توده ای شدن، جوش خوردگی و یا ایجاد شبکه های نانوذرات مشاهده نشد. شکل ۲- ب فاصله صفحات بلوری نانوذرات را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود فاصله صفحات بلوری به دست آمده برابر با  $0.2338$  نانومتر است. این مربوط به فاصله صفحات بلوری مکعبی آلومینیوم خالص است. بنابراین نانوذرات تولید شده آلومینیوم که در محیط استون سنتز شده اند خالص اند.

توزیع اندازه نانوذرات تولید شده نیز در شکل ۳ نشان



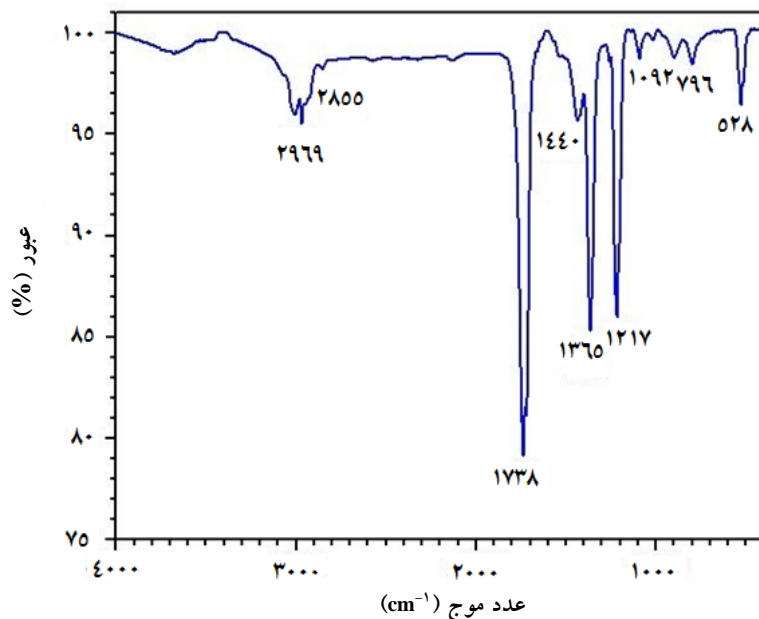
شکل ۳- نمودار میله‌ای پراکندگی نانوذرات سنتز شده به روش انفجار الکتریکی سیم در محلول استون



شکل ۴- تصویر شکل‌گیری نانوذرات آلومینیوم روی نانولوله‌های کربنی

شکل ۵ سایر عناصر را ایجاد می‌کند. قله‌های شاخصی در شکل ۵ وجود دارد که مربوط به وجود استون در محیط ساخت است. به‌طور مثال، عدد موج  $2969\text{ cm}^{-1}$  مربوط به پیوند یگانه کربن با هیدروژن (C-H) و عدد موج  $1738\text{ cm}^{-1}$  مربوط به پیوند دوگانه کربن با اکسیژن (C=O) است. عدد موج  $1092\text{ cm}^{-1}$  نیز مربوط به پیوند یگانه کربن با اکسیژن

شکل ۵ مشاهده می‌شود به جز چند قله شاخصی که مربوط به استون و ترکیبات آلی در محلول است در عدد موج  $1365$ ،  $1440$  و  $2855\text{ cm}^{-1}$  قله‌هایی مشاهده می‌شود که مربوط به وجود پیوند یگانه آلومینیوم با دیگر عناصر است. در اثر سنتز نانوذرات آلومینیوم در استون، ترکیباتی از آلومینیوم در محیط استون تشکیل می‌شود و پیوند آلومینیوم با



شکل ۵- تصویر طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه یافته (FTIR) نمونه سنتز شده در استون

صورت پایدار در محلول می‌مانند. در نهایت نمونه سنتز شده در محیط استون تشکیل کلئیدی پایدار از نانوذرات آلومینیوم می‌دهد.

۴- نانوذرات آلومینیوم اطراف نانولوله‌های کربنی قرار گرفته و نانوکامپوزیت آلومینیوم-CNT سنتز شده را تشکیل دادند. با قرار گرفتن نانوذرات با اندازه‌های مختلف دور نانولوله‌های کربنی، نانوکامپوزیت آلومینیوم-CNT تشکیل شد. در محیط استون پس از پخش شدن نانولوله‌های کربنی در محیط، این نانولوله‌ها از یکدیگر فاصله گرفتند و محل مناسبی برای قرار گرفتن نانوذرات را تشکیل دادند. در نهایت نانوکامپوزیت آلومینیوم-CNT تشکیل شده در محیط استون برهم‌کنش خوبی از نانوذرات آلومینیوم و نانولوله کربنی را دارا بود.

۵- علاوه بر پخش شدگی خوب نانولوله‌های کربنی در محیط استون، اندازه کوچک نانوذرات آلومینیوم تولید شده در محیط استون، زمینه ایجاد برهم‌کنش بهتر نانوذرات آلومینیوم با نانولوله‌های کربنی را فراهم کرد.

(C-O) است [۱۷].

نانوذرات آلومینیوم تولید شده در استون به شکل کلئید در می‌آیند و بیش‌تر نانوذرات تولید شده به صورت معلق در محلول می‌مانند و ذرات میکرومتری و بزرگ‌تر، ته نشین می‌شوند. پایداری نانوذرات آلومینیوم تولید شده در استون بسیار بالاست. این ذرات به مدت شش ماه در استون پایدار ماندند. به همین دلیل در آزمون طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) چون از نمونه محلول آزمون به عمل آمد، قله‌های مربوط به پیوند آلومینیوم با دیگر عناصر مشاهده شد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- نانوذرات آلومینیوم سنتز شده به روش انفجار الکتریکی سیم همه به شکل کروی تشکیل شدند.
- ۲- میانگین اندازه نانوذرات آلومینیوم سنتز شده به روش انفجار الکتریکی سیم در محیط استون ۴ نانومتر بود.
- ۳- نانوذرات تولید شده در استون به نسبت زیادی پایدار ماندند. هم‌چنین به سبب ویژگی استون، این ذرات به

1. Esawi, A.M. and El-Borady, M.A., "Carbon Nanotube-Reinforced Aluminium Strips", *Composites Science and Technology*, Vol. 68(2), pp. 486-492, 2008.
2. Bakshi, S.R., Singh, V., Seal, S., and Agarwal, A., "Aluminum Composite Reinforced with Multiwalled Carbon Nanotubes from Plasma Spraying of Spraydried Powders", *Surface and Coatings Technology*, Vol 203(10), pp. 1544-1554, 2009.
3. He, C., Zhao, N., Shi, C., Du, X., Li, J., Li, H. and Cui, Q., "An Approach Toobtaining Homogeneously Dispersed Carbon Nanotubes in Al Powders for Preparing Reinforced Al-Matrix Composites", *Advanced Materials*, Vol. 19(8), pp. 1128-1132, 2007.
4. Li, Q., Viereckl, A., Rottmair, C.A. and Singer, R.F., "Improved Processing of Carbon Nanotube/Magnesium Alloy Composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp. 1193-1199, 2009.
5. Esawi, A.M., Morsi, K., Sayed, A., Gawad, A.A. and Borah, P., "Fabrication and Properties of Dispersed Carbon Nanotube-Aluminum Composites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 508(1), pp. 167-173, 2009.
6. Kuzumaki, T., Miyazawa, K., Ichinose, H. and Ito, K., "Processing of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composite," *Journal of Materials Research*, Vol. 13, pp. 2445-2449, 1998.
7. Kotov and Yu, A., "Electric Explosion of Wires as a Method for Preparation of Nanopowders", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, pp. 539-550, 2003.
8. Fu, W., Yang, H., Chang, L., Li, M., Bala, H., Yu, Q. and Zou, G., "Preparation and Characteristics of Core-Shell Structure Nickel/Silica Nanoparticles", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 262(1), pp. 71-75, 2005.
9. Kwon, Y.S., Gromov, A.A., Ilyin, A.P., Ditts, A.A., Kim, J.S., Park, S.H. and Hong, M.H., "Features of Passivation, Oxidation and Combustion of Tungsten Nanopowders by Air", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 22(6), pp. 235-241, 2004.
10. Gromov, A.A., Förter-Barth, U. and Teipel, U., "Aluminum Nanopowders Produced by Electrical Explosion of Wires and Passivated by Non-Inert Coatings: Characterisation and Reactivity with Air and water", *Powder Technology*, Vol. 164(2), pp. 111-115, 2006.
11. Wan, J., Cai, S., Liu, Y., Xie, C., Xia, X. and Zeng, D., "Reaction Characteristics of Nano-Aluminum and Water by In-situ Investigation", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 136(2), pp. 466-471, 2012.
12. Popenko, E.M., Gromov, A.A., Pautova, Y.I., Chaplina, E.A. and Ritzhaupt-Kleissl, H.J., "SEM-EDX Study of the Crystal Structure of the Condensed Combustion Products of the Aluminum Nanopowder Burned in Air under the Different Pressures", *Applied Surface Science*, Vol. 257(8), pp. 3641-3644, 2011.
13. Sabourin, J.L., Risha, G.A., Yetter, R.A., Son, S.F. and Tappan, B.C., "Combustion Characteristics of Nanoaluminum, Liquid Water, and Hydrogen Peroxide Mixtures", *Combustion and Flame*, Vol. 154(3), pp. 587-600, 2008.
14. Qing, Z., Qiaogen, Z., Jun, Z., Junping, Z., Baozhong, R. and Lei, P., "Effect of the Circuit and Wire Parameters on Exploding an Al Wire in Water", *Plasma Science and Technology*, Vol. 13(6), pp. 661, 2011.
15. Mezziani, M.J., Bunker, C.E., Lu, F., Li, H., Wang, W., Gulians, E.A. and Sun, Y.P., "Formation and Properties of Stabilized Aluminum Nanoparticles", *ACS Applied Materials and Interfaces*, Vol. 1(3), pp. 703-709, 2009.
16. Georg, H.C., Coutinho, K. and Canuto, S., "Converged Electronic Polarization of Acetone in Liquid Water and the Role in the  $n-\pi^*$  Transition", *Chemical Physics Letters*, Vol. 429(1), pp. 119-123, 2006.
17. [http://sdfs.db.aist.go.jp/sdfs/cgi-bin/direct\\_frame\\_top.cgi](http://sdfs.db.aist.go.jp/sdfs/cgi-bin/direct_frame_top.cgi).