

# تأثیر پتانسیل زتا بر نحوه رسوب نانوذرات خنثی در پوشش‌های نانوکامپوزیتی حاصل از آبکاری الکتریکی منقطع

علیرضا نصر اصفهانی<sup>۱</sup>، سید جواد دانشی<sup>۲</sup> و خسرو فرمنش<sup>۳</sup>

۱- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

۲- کارشناس ارشد خوردگی، ذوب آهن اصفهان

۳- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

nasr\_alireza@mut-es.ac.ir

## چکیده

در فرآیند آبکاری الکتریکی به خوبی می‌توان با استفاده از اضافه شونده‌های کمپلکس‌ساز درصد عناصر آلیاژی را در پوشش‌های آلیاژی کنترل نمود و این در حالی است که برای ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی دارای ذرات خنثی به راحتی نمی‌توان نوع و درصد ذرات رسوبی را کنترل نمود. در این تحقیق جهت کنترل درصد ذرات خنثی در پوشش‌های کامپوزیتی از خاصیت پتانسیل زتا و عوامل مؤثر بر آن استفاده شده است. به این ترتیب با استفاده از حمام واتر و ذرات نانو آلومینا پوشش کامپوزیتی زمینه نیکلی بر روی ورقه‌های مسی به روش آبکاری الکتریکی منقطع تهیه و ضمن تغییر پارامترهای آبکاری، پوشش به دست آمده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM همراه با روش‌های آنالیزی EDX و XRD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می‌دهد با توجه به اینکه افزایش pH محلول عموماً، کاهش پتانسیل زتا را به دنبال دارد، پس می‌توان نتیجه گرفت که pH محلول و چگالی جریان از مهمترین پارامترهای مؤثر بر میزان رسوب نانوذرات خنثی در پوشش خواهد بود. لذا با تغییر این دو پارامتر می‌توان به طور نسبی درصد ذرات نانو را در پوشش تحت کنترل قرار داد.

## واژه‌های کلیدی:

پتانسیل زتا، نانوذرات آلومینا، نیکل آلومینا، آبکاری الکتریکی منقطع، پوشش‌های نانو کامپوزیتی.

## ۱- مقدمه

آبکاری الکتریکی منقطع است [۹-۱۱]. تاکنون تحقیقات فراوانی در خصوص پوشش‌دهی کامپوزیتها و نانوکامپوزیت‌های زمینه نیکلی به روش آبکاری الکتریکی انجام شده است [۱۶-۱۲]. با توجه به اینکه در آبکاری الکتریکی از بار الکتریکی یون‌ها جهت حرکتشان به سمت کاتد و احیاء در سطح آن

پوشش‌های کامپوزیتی زمینه فلزی از جمله پوشش‌هایی هستند که دارای خواص مکانیکی مناسبی از جمله ضریب اصطکاک کم، مقاومت سایشی بالا و چقرمگی خوبی در برابر عوامل مخرب می‌باشند [۸-۱]. یکی از روش‌های ایجاد این پوشش‌ها استفاده از

در پوشش نمی‌کند. به گونه‌ای که عموماً خواص پوشش را با درصد ذرات موجود در پوشش مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، نقش پتانسیل زتا به عنوان یک خاصیت فیزیکی منحصر به فرد ذرات خنثی در فرآیند آبکاری الکتریکی منقطع به منظور پوشش دهی نانو کامپوزیتی نیکل آلومینا مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این فرضیه پتانسیل زتای نانوذرات خنثی در محیط‌های گوناگون دارای مقادیر مختلفی خواهند بود [۱۸].

### ۱-۲- مکانیزم پتانسیل زتا

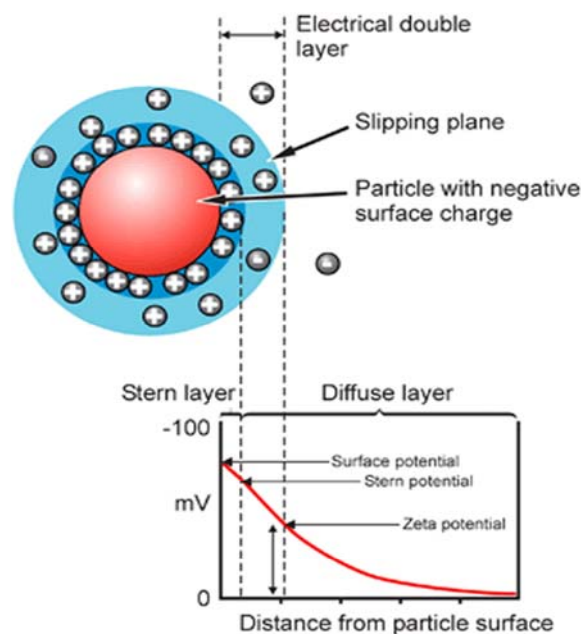
پتانسیل زتا یک خاصیت فیزیکی ذرات خنثی است که در فصل مشترک (با جدایش فازی) فاز جامد با محلول‌های الکترولیتی بروز می‌کند. در شکل (۱) یک ذره خنثی به طور شماتیک درون محلول نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود وجود این پدیده موجب ایجاد یک لایه دوپل در اطراف ذره می‌گردد. لایه دوپل اطراف ذره شامل دو قسمت است:

۱- لایه غیر مشترک (لایه استرن<sup>۳</sup>) که شامل بار الکتریکی ثابت و غیر متحرک در مرز جامد- مایع می‌باشد.

۲- لایه نفوذی که متأثر از حرکت‌های گرمایی خواهد بود.

پتانسیل الکتریکی حاصل از این لایه را پتانسیل الکتروستاتیک یا پتانسیل زتا می‌گویند. این پتانسیل تابع عواملی از قبیل اندازه و نوع ذرات، pH و سایر عوامل مؤثر بر لایه دوپل خواهد بود [۱۹-۲۲]. شکل (۲) پتانسیل زتا چند ذره را در pHهای مختلف نشان می‌دهد.

این شکل نشان‌دهنده آن است که عموماً افزایش pH موجب کاهش پتانسیل زتا خواهد شد. نکته قابل تأمل اینکه هر ذره در pHهای گوناگون رفتار منحصر به فردی از خود نشان می‌دهد. به طوری که نه تنها مقدار پتانسیل آن تغییر خواهد کرد، بلکه مثبت و منفی بودن آن نیز به راحتی قابل تغییر خواهد بود (شکل ۳). به این ترتیب می‌توان با انتخاب درست pH رفتار و عکس‌العمل ذره را در محیط‌های گوناگون تحت کنترل قرار داد.



شکل (۱): شماتیک حضور یک ذره خنثی در الکترولیت [۱۸].

استفاده می‌شود، لذا حرکت دادن ذرات بدون بار به طرف کاتد و رسوب آنها در پوشش و نیز کنترل درصد آنها به راحتی امکان‌پذیر نخواهد بود. تاکنون، این سؤال مطرح بوده است که نانوذرات خنثی در فرآیند آبکاری الکتریکی با چه مکانیزمی به سمت کاتد حرکت کرده و درون زمینه فلزی رسوب می‌کنند. نظریه‌های ارائه شده در رابطه با مکانیزم حضور ذرات در پوشش عموماً مسیرهای احتمالی را مورد بررسی قرار داده است. بولنز<sup>۱</sup> [۱۷]، در مورد هم‌نشست ذرات خنثی سه نوع مکانیزم را ارائه داده است که عبارتند از:

۱- ذرات خنثی درون الکترولیت توسط تعدادی از یونها احاطه شده و مجموعه به صورت یک ذره باردار به سمت کاتد حرکت می‌کند.

۲- ذرات خنثی به واسطه تلاطمی که در الکترولیت وجود دارد به طور اتفاقی به سطح کاتد رسیده و در اثر احیاء یونهای فلزی در همانجا به دام می‌افتند.

۳- کاتد می‌تواند ذرات را با استفاده از نیروی جذبی والس<sup>۲</sup> جذب نماید.

مکانیزم‌های فوق همگی حرکت نانوذرات خنثی به سمت پوشش را توجیه می‌کنند. در صورتی که بحثی از نحوه قرارگیری آنها

جدول (۱): فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها جهت پوشش‌دهی.

مشخصات	فرآیند
سنباده‌های ۲۸۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و پولیش با نمک	پولیش
محلول ۲۰٪ وزنی هیدروکسید سدیم و پتاسیم	چربی‌زدایی
محلول ۱۰٪ اسید سولفوریک	اسید شویی
شستشو با آب مقطر، الکل و خشک کردن	مرحله نهایی

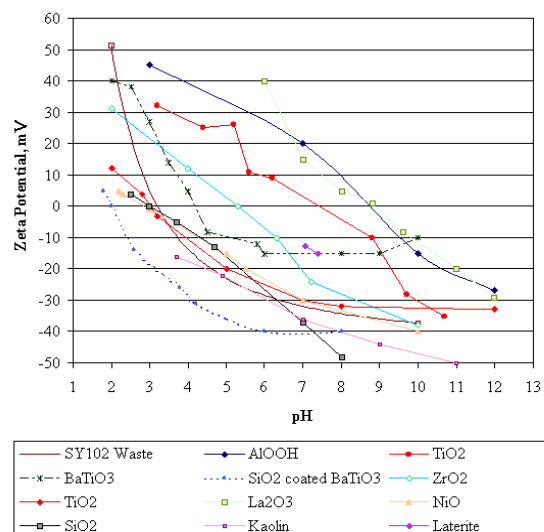
جدول (۲): ترکیب وان پوشش‌دهی.

غلظت	ترکیب
۳۰۰ gr/lit	سولفات نیکل $NiSO_4 \cdot 6H_2O$
۵۰ gr/lit	کلرید نیکل $NiCl_2 \cdot 6H_2O$
۴۰ gr/lit	اسید بوریک $H_3BO_4$
نیکل خالص تجاری	آند از نوع مصرفی
۴/۵	pH
۶۰ درجه سانتی‌گراد	دمای آزمایش
۸۰ گرم در لیتر	درصد آلومینا در محلول

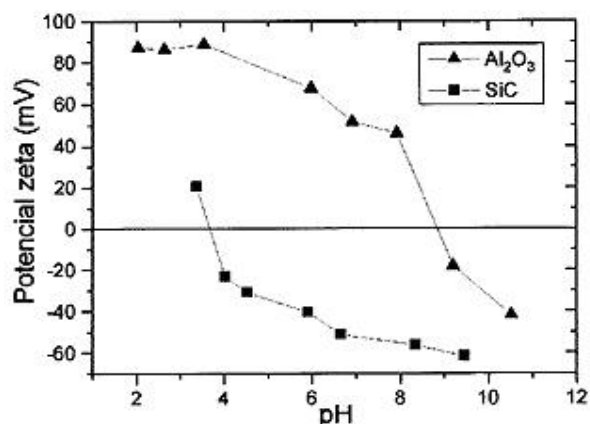
جدول (۳): شرایط پوشش‌دهی به روش آبکاری الکتریکی منقطع.

شماره نمونه	چگالی جریان ( $A/dm^2$ )	سیکل کاری (%)	فرکانس Hz	pH
P1	۲	۱۰	۵۰	۴/۵
P2	۲	۱۰	۵۰	۶
P3	۲	۱۰	۵۰	۷/۵
P4	۱	۱۰	۵۰	۴/۵
P5	۳	۱۰	۵۰	۴/۵
P6	۴	۱۰	۵۰	۴/۵

(۳) انجام شد. همانگونه که در جدول (۳) آمده‌است، در فرآیند پوشش‌دهی بجز دو پارامتر pH و چگالی جریان، سایر پارامترها ثابت نگه داشته شد تا بهتر بتوان تأثیر این دو عامل را در میزان رسوب ذرات در پوشش مورد بررسی قرار داد. پوشش‌های بدست آمده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روشی SEM مدل فلیپس<sup>۶</sup> مورد ارزیابی ساختاری و توپوگرافی قرار گرفته و سپس با روشهای EDX و XRD (موج تکفام  $Cu_{K\alpha}$ ) به ترتیب تحت آنالیز عنصری و فازی قرار گرفت.



شکل (۲): تأثیر pH بر پتانسیل زتا برای ذرات مختلف [۱۸].



شکل (۳): تأثیر pH بر پتانسیل زتا ذرات  $Al_2O_3$  و SiC [۲۳].

## ۲- مواد و روش تحقیق

ابتدا ورقه‌هایی از جنس مس خالص تجاری با ابعاد  $10 \times 3 \times 0.1$  cm تهیه و فرآیندهای آماده‌سازی طبق جدول (۱) بر روی آنها انجام شد. محلول آبکاری با ترکیب جدول (۲) تهیه و پس از ۲۴ ساعت به میزان ۸۰ gr/lit پودر نانوالومینا (ساخت شرکت اینفرامات<sup>۴</sup> آمریکا) با اندازه ذره متوسط ۱۰۰ nm به آن اضافه و محلول به مدت یک ساعت با استفاده از همزن آلتراسونیک (ساخت شرکت هیلشر<sup>۵</sup> آلمان) هم زده شد. آنگاه بدون آنکه همزدن قطع شود، پوشش‌دهی با شرایط جدول

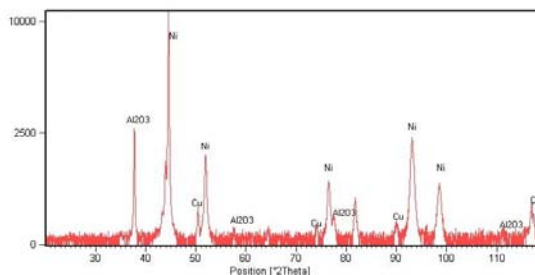
پایه) مشاهده می‌شود. در نتیجه می‌توان درصد‌های اکسیژن و آلومینیوم را به‌طور تقریب به ذرات نانوآلومینا نسبت داد. به این ترتیب می‌توان به‌طور نسبی تأثیر تغییر چگالی جریان و pH را در میزان رسوب ذرات نانوآلومینا ملاحظه نمود.

جدول (۴) نتایج حاصل از اندازه‌گیری تقریبی درصد آلومینا در پوشش به‌روش EDX و اندازه تقریبی دانه‌های نیکل با استفاده از پهنای پیک XRD را نشان می‌دهد.

شکل‌های (۸ و ۹) نیز تأثیر چگالی جریان و pH را بر درصد آلومینا نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش pH موجب کاهش ذرات آلومینا در پوشش شده‌است، ولی این موضوع برای چگالی جریان برعکس است. به گونه‌ای که افزایش آن موجب افزایش درصد آلومینا در پوشش شده‌است.

از طرفی با اندازه‌گیری پتانسیل زتا مشخص شده‌است که اگر pH محلول از ۴ به ۷/۵ افزایش یابد، پتانسیل زتا به‌طور ناگهانی کاهش خواهد یافت (شکل ۳) [۲۳-۲۵]. یکی از علل این رفتار را می‌توان در پدیده الکتروفورتیک توده‌های یونی در محلول دانست. به این صورت که در اطراف ذرات معلق در محلول یک ابر الکترونی به‌وجود خواهد آمد که تا حدودی متمایل به جذب سایر یونها خواهد بود [۲۵]. همچنین با افزایش pH تشکیل یونهای کمپلکس در محلول افزایش یافته و ذرات آلومینا در دام یونهایی از قبیل  $SO_4^{2-}$  گرفتار می‌شوند و لذا کمتر وارد پوشش خواهند شد [۱۸ و ۲۳-۲۸]. به این ترتیب درصد نانوذرات آلومینا در پوشش کاهش خواهد یافت.

حال اگر شرایط به گونه‌ای باشد که مقاومت محلول ثابت در نظر گرفته شود، افزایش چگالی جریان با افزایش پتانسیل کاتد همراه است. در نتیجه می‌توان پیش‌بینی نمود که اگر پتانسیل زتا دارای بیشترین مقدار مثبت خود باشد و pH نیز کمترین مقدار ممکن را داشته باشد، در نتیجه پوشش حاصله درصد بیشتری از نانوذرات آلومینا را در خود جای خواهد داد و این موضوع به‌وضوح در شکل (۹) ملاحظه می‌شود.



شکل (۴): آنالیز XRD از سطح پوشش P2.

جدول (۴): درصد وزنی آلومینا و اندازه دانه‌های نیکل در پوشش.

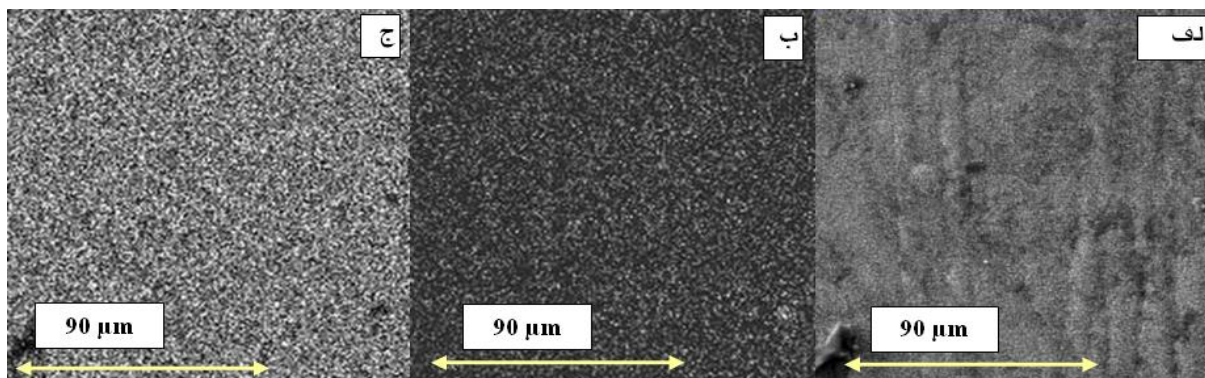
شماره نمونه	اندازه دانه‌های نیکل (نانومتر)	درصد وزنی آلومینا
P1	۱۰۵	۵/۹۹
P2	۱۰۲/۷	۴/۵۳
P3	۱۲۰/۵	۲/۵۸
P4	۱۱۷	۴/۲۷
P5	۹۸	۱۰/۴۸
P6	۷۶	۱۹/۵۷

### ۳- نتایج و مباحث

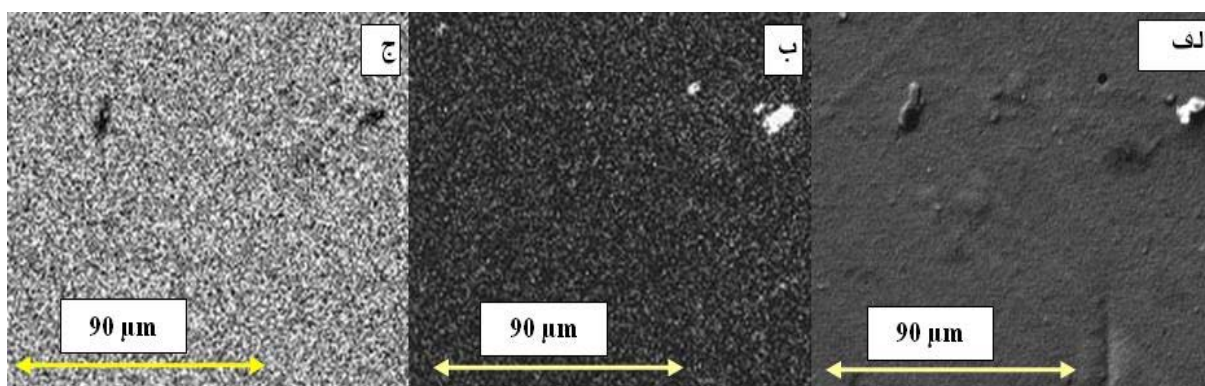
شکل (۴) یک نمونه از نتایج حاصل از XRD مربوط به پوشش P2 را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، پیک مربوط به فاز آلومینا ( $Al_2O_3$ ) بوضوح مشاهده می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که ذرات نانوآلومینا به‌خوبی در پوشش جای گرفته است.

همچنین با استفاده از نمودارهای XRD و میانگین پهنای پیک نیکل اندازه کریستالهای نیکل به‌صورت تقریبی محاسبه شد که عموماً در محدوده ۱۰۰ نانومتر بود (جدول ۴). همانگونه که ملاحظه می‌شود افزایش چگالی جریان و کاهش pH موجب ریز شدن دانه‌بندی شده‌است که این می‌تواند ناشی از افزایش سرعت جوانه‌زنی باشد.

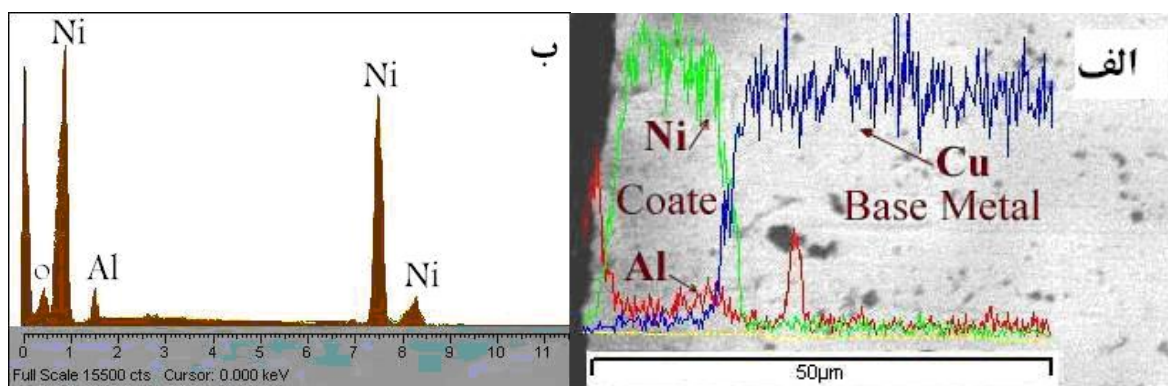
شکل‌های (۵) و (۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز نقطه‌ای آلومینیوم و نیکل را در سطح نمونه‌های P1 و P2 نشان می‌دهد. شکل (۷) نیز آنالیز EDX از عناصر موجود در پوشش را به‌صورت خطی در مقطع و به‌صورت نقطه‌ای از سطح آن نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود در این آنالیزها عناصر آلومینیوم، نیکل (زمینه کامپوزیتی)، اکسیژن و مس (فلز



شکل (۵): الف) تصویر SEM از سطح نمونه P1، ب) نقاط روشن نشان‌دهنده عنصر آلومینیوم و ج) نقاط روشن نشان‌دهنده عنصر نیکل.



شکل (۶): الف) تصویر SEM از سطح نمونه P2، ب) نقاط روشن نشان‌دهنده عنصر آلومینیوم و ج) نقاط روشن نشان‌دهنده عنصر نیکل.



شکل (۷): الف) آنالیز خطی EDX از مقطع پوشش و فلز پایه و ب) آنالیز نقطه‌ای EDX از سطح پوشش (نمونه P2).

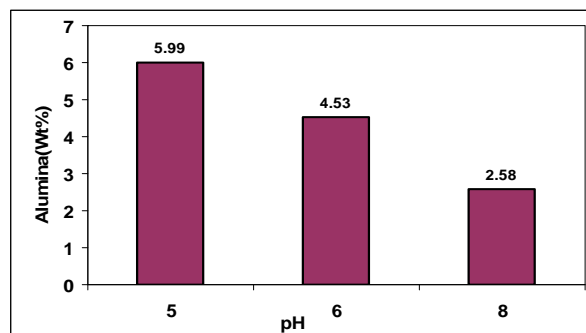


۳- در pH ثابت اگر پتانسیل زتای یک ذره مثبت باشد، افزایش چگالی جریان موجب افزایش ذرات نانوالومینا در پوشش می شود و این در حالی است که اگر پتانسیل زتا منفی باشد، همین افزایش چگالی جریان موجب کاهش ذرات فوق در پوشش خواهد شد.

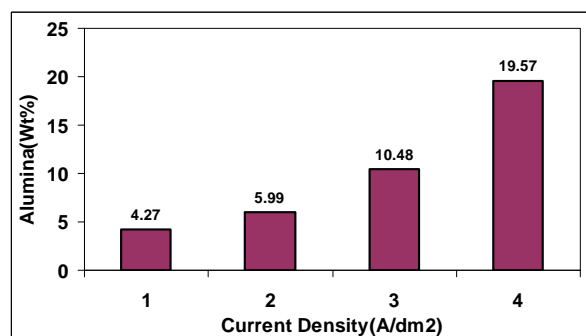
۴- با بررسی تأثیر پتانسیل زتا و عوامل مؤثر بر آن به این جمع بندی می توان رسید که با مشخص نمودن شرایط بهینه از نظر درصد وزنی عناصر خنثی درون پوشش و شرایط آبرکاری امکان ایجاد یک پوشش نانوکامپوزیت بدون استفاده از اضافه شونده ها و با کیفیت مطلوب امکان پذیر می گردد.

### ۵- مراجع

- [1] J. Li, Y. Sun, X. Sun and J. Qiao, "Mechanical and Corrosion-Resistance Performance of Electrodeposited Titania-Nickel Nanocomposite Coatings", Surface & Coatings Technology 192, pp. 331-335, 2005.
- [2] N. Zhao-Xia, C. Fa-He, W. Wei, Z. Zhao, Z. Jian-Qing and C. Chu-Nanf, "Electrodeposition of Ni-SiC Nanocomposite Film", Trans. Nonferrous Met. SOC. China 17, pp. 9-15, 2007.
- [3] F. Hou, W. Wang and H. Guo, "Effect of the Dispersibility of  $ZrO_2$  Nanoparticles in Ni- $ZrO_2$  Electroplated Nanocomposite Coatings on the Mechanical Properties of Nanocomposite Coatings", Applied Surface Science 252, pp. 3812-3817, 2006.
- [4] M. E. Bahrololoom, R. Sani, "The Influence of Pulse Plating Parameters on the Hardness and Wear Resistance of Nickel-Alumina Composite Coatings", Surface and Coatings Technology, Vol. 192, pp. 154-163, 2005.
- [5] T. Lampke, B. Wielage, D. Dietrich and A. Leopold, "Details of Crystalline Growth in Co-Deposited Electroplated Nickel Films With Hard (Nano)Particles", Applied Surface Science 253, pp. 2399-2408, 2006.
- [6] C. Sun, P. Gao, F. Zhou and W. Liu, "Mechanical Properties and Wear and Corrosion Resistance of Electrodeposited Ni-Co/SiC Nanocomposite Coating", Lei Shi, Applied Surface Science 252, pp. 3591-3599, 2006.
- [7] S. C. Wang and Wen-Cheng J. Wei, "Characterization of Electroplated Ni/SiC and Ni/ $Al_2O_3$  Composite Coatings Bearing Nanoparticles", Materials Research Society, Vol. 18, No. 7, pp. 1566-1574, 2003.
- [8] Y. Wang, S. Lim, J. L., Z. H. X., "Tribological and Corrosion Behaviors of  $Al_2O_3$ /Polymer", Wear 260, pp. 976-983, 2006.
- [9] Fv. Zimmerman, "The Production and Determination of Mechanical Properties of Nanocomposite Nickel Silicon Carbide", Canada, pp. 40-47, 60-65, 1999.



شکل (۸): تأثیر چگالی جریان بر درصد ذرات نانوالومینا در پوشش (pH ثابت و برابر ۴/۵).



شکل (۹): تأثیر pH بر درصد ذرات نانوالومینا در پوشش (چگالی جریان ثابت و برابر ۲ A/dm<sup>2</sup>).

البته باید این نکته را مد نظر داشت که علی رغم آنکه افزایش چگالی جریان موجب افزایش درصد ذرات خنثی در پوشش کامپوزیتی می شود، ولی در عمل موجب ایجاد ترک هایی در پوشش می شود که کیفیت آن را تحت الشعاع قرار خواهد داد.

### ۴- نتیجه گیری

۱- پتانسیل زتا یک کمیت فیزیکی ذرات خنثی است که با pH محیط قابل تغییر می باشد. به عنوان مثال ذرات نانوالومینا در pH های ۴ و ۷/۵ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین پتانسیل زتا است.

۲- درصد ذرات خنثی در درون پوشش علاوه بر پارامترهای مؤثر در آبرکاری، تابع عوامل مؤثر بر میزان مثبت یا منفی بودن پتانسیل زتا نیز هستند.

- [22] Malven Instruments Report, "Zeta Potential An Introduction in 30 Minutes", Enigma Business Park, pp. 1-3, 2007.
- [23] I. R. de Oliveira, P-Sepulveda and V. C. Pandoif, "Heterodefloculation in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\_SiC System", *Cerâmica*, Vol. 44, No. 290, Nov. 1998.
- [24] H. K. Lee, H. Y. Lee and J. M. Jeon, "Codeposition of Micro-and Nano-Sized SiC Particles in the Nickel Matrix Composite Coatings Obtained by Electroplating", *Surface & Coatings Technology* 201, pp. 4711-4717, 2007.
- [25] Y. de Hazana, "Homogeneous Ni-P/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Coatings from Stable Dispersions in Electroless Nickel Baths", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 328, Issue 1, pp. 103-109, 1 December 2008.
- [26] B. G. Mellor, "Surface Coatings for Protection Against Wear", Woodhead Publishing Limited, ISBN-13: 978-1-85573-767-9, 2006.
- [27] N. Kanani, "Electroplating-Basic Principles Processes and Practice", Atotech Deutschland GmbH, Berlin, Germany, British Library Cataloguing in Publication Data, ISBN 1856174514, 2006.
- [28] Y. F. Tang, "Preparation of Composite Coating Particles of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> by Heterogeneous Nucleation-and-Growth Processing", *Materials Letters*, Vol. 56, Issue 4, pp. 446 - 449, October 2002.
- [10] W. Wang, F. Y. Hou, H. Wang and H. T. Guo, "Fabrication and Characterization of Ni-ZrO<sub>2</sub> Composite Nano-Coatings by Pulse Electrodeposition", *Scripta Materialia* 53, pp. 613-618, 2005.
- [11] K. H. Hou, W. H. Hwu, S. T. Ke and M. D. Ger, "Ni-P-SiC Composite Produced by Pulse and Direct Current Plating", *Materials Chemistry and Physics* 100, pp. 54-59, 2006.

[۱۲] ع. ر. نصراصفهان‌ای، س. ج. دانشی، "ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی میکروآلومینا و بررسی خواص آن"، نهمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه علم و صنعت ایران، اردیبهشت ۱۳۸۷

- [13] L. M. Chang, M. Z. An, H. F. Guo and S. Y. Shi, "Microstructure and Properties of Ni-Co/Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings by Pulse Reversal Current Electrodeposition", *Applied Surface Science* 253, pp. 2132-2137, 2006.
- [14] L. M. Changa, M. Z. Ana and S. Y. Shi, "Microstructure and Characterization of Ni-Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings by Pulse Reversal Electrodeposit", *Materials Chemistry and Physics* 100, pp. 395-399, 2006.
- [15] L. M. Chang, H. F. Guo and M. Z. An, "Effect of Ce<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> on Structure and Properties of Ni-Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coating Deposited by Pulse Reverse Current Method", *Applied Surface Science* 253, pp. 6085-6089, 2007.
- [16] H. Y. Zheng and M. Zhong An, "Electrodeposition of Zn-Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Coatings Under Ultrasound Conditions", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 459, Issues 1-2, pp. 548-552, 14 July 2008.
- [17] Buelens and H. Deng, "Electrochemical Deposition of Nanocrystalline Copper and Copper Based Composite Films", *NCSN Labraries*, URN. 20020103-173702, pp. 19, January 2002.
- [18] H. Bouzid and M. Rabiller-Baudry, "Impact of Zeta Potential and Size of Caseins as Precursors of Fouling Deposit on Limiting and Critical Fluxes in Spiral Ultrafiltration of Modified Skim Milks", *Journal of Membrane Science* 314, pp. 67-75, 2008.
- [19] O. Burgos-Montes and R. Moreno, "Stability of Concentrated Suspensions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Measured by Multiple Light Scattering", *Journal of the European Ceramic Society* 29, pp. 603-610, 2009.
- [20] Y. P. Zenga and A. Zimmermann, "Effect of Organic Additives on the Zeta Potential of PLZST and Rheological Properties of PLZST Slurries", *Journal of the European Ceramic Society* 28, pp. 2597-2604, 2008.
- [21] D. C. Koopman, "Factors Potentially Influencing the Tackiness of DWPF Streams", Westinghouse Savannah River Company Report No. Aiken, SC 29808, WSRC-TR-2000.

## ۶- پی‌نوشت

- 1- Buelens
- 2- Waals
- 3- Stern
- 4- Inframat
- 5- Hielscher
- 6- Philips