

## بررسی رفتار الکتروشیمیایی کربن اکتیو و کامپوزیت‌های کربن اکتیو / اکسید نیکل به عنوان الکترود در ابرخازن‌ها

نرجس باقری<sup>۱</sup>، علیرضا آقایی<sup>۱</sup>، محمد یگانه قطبی<sup>۲</sup>، احسان مرزبان راد<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، <sup>۲</sup> گروه سرامیک، دانشگاه ملایر، ملایر

nbs1384@yahoo.com

**چکیده:** هدف از این تحقیق بررسی رفتار الکتروشیمیایی اثر مقدار کربن اکتیو در الکترودهای تهیه شده از کامپوزیت‌های کربن اکتیو/اکسید نیکل (NiO/AC) در محلول الکترولیت KOH:1M و در سیستم سه الکترودی می‌باشد. چهار ترکیب مختلف از کامپوزیت ذکر شده، تهیه و رفتار ولتامتری چرخه‌ای آنها با کربن اکتیو مقایسه شد. همچنین با استفاده از روش گالوانوستاتیک شارژ-تخلیه، ظرفیت ویژه خازنی آنها در پنجره‌های پتانسیل مثبت و منفی بررسی شد. نتایج نشان داد حضور اکسید نیکل در الکترودهای کامپوزیتی کربن اکتیو/اکسید نیکل (NiO/AC)، باعث افزایش پنجره پتانسیل از ۰/۲V/SSCE در کربن اکتیو به حدود ۰/۵V/SSCE در کامپوزیت‌ها می‌شود. همچنین، با افزایش مقدار کربن، امکان استفاده از آنها در جریان‌های پایین کمتر می‌شود. کامپوزیت تهیه شده با نسبت وزنی کربن به نیکل، ۰/۴۲۶ ظرفیت ویژه بیشتری در مقایسه با الکترودهای دیگر دارد. **کلید واژه:** ابرخازن، کربن اکتیو، کامپوزیت کربن/اکسید نیکل.

### ۱- مقدمه

ابرخازن‌ها یا خازن‌های الکتروشیمیایی<sup>۱</sup> ابزارهای الکترونیکی هستند که قابلیت ذخیره انرژی بیشتری در مقایسه با خازن‌های سنتی را دارند [۱]. اهمیت این گروه از ابزارها نسبت به باتری‌ها در رهایش سریع تر انرژی می‌باشد. اگرچه در طی دهه گذشته، تحقیقات زیادی برای پیشرفت این گروه از ابزارها صورت گرفته است، اما هنوز موضوع تحقیقات بسیاری از محققان و مراکز تحقیقاتی می‌باشد.

مواد کربنی به‌ویژه کربن اکتیو<sup>۲</sup>، با سطح ویژه زیاد، شناخته شده‌ترین مواد خازنی برای ذخیره انرژی در تهیه ابرخازن‌ها هستند. در این دسته از مواد، قابلیت ذخیره انرژی مطابق با مکانیزم لایه دوتایی<sup>۳</sup> است. در این مکانیزم، بارهای الکتریکی در سطح بین مواد خازنی و الکترولیت، مسئول ذخیره انرژی هستند [۱].

ماده مناسب دیگر برای تهیه الکترود ابرخازن‌ها، اکسید رتنیوم (RuO<sub>2</sub>) است که بر اساس واکنش‌های اکسایش و کاهش<sup>۴</sup> قابلیت ذخیره انرژی را دارد (مکانیزم شبه خازنی<sup>۵</sup>) [۱-۳]. از آنجاییکه ترکیبات رتنیومی، مواد کمیاب و گرانبه‌ای می‌باشند،

<sup>1</sup> Supercapacitor

<sup>2</sup> AC:activated carbon

<sup>3</sup> Electric Double Layer Capacitor(EDLC)

<sup>4</sup> Redox

<sup>5</sup> Psoudocapacity

استفاده از آنها محدود می‌باشد. به همین دلیل تلاش‌های زیادی صورت می‌گیرد تا سایر ترکیبات فلزی و همچنین مواد پلیمری را جایگزین ترکیبات رتنیومی کنند [۲، ۴].

ترکیبات دارای نیکل بویژه اکسید نیکل، از مهمترین ترکیباتی هستند که برای تهیه الکترودهای ابرخازن، استفاده می‌شوند. بیشتر گزارش‌های منتشر شده در زمینه رفتار خازنی این ترکیبات، به روش‌های مختلف سنتز می‌پردازد که هدف از آن، تهیه اکسید نیکل با مورفولوژی‌های مختلف و قابلیت ذخیره انرژی زیاد می‌باشد [۵-۹].

در زمینه تهیه کامپوزیت‌های NiO/AC نیز گزارش‌های زیادی منتشر شده است [۱۰-۱۳]. این مطالعات به منظور استفاده از هر دو مکانیزم ذخیره انرژی یعنی لایه دوتایی الکتریکی و شبه‌خازنی صورت گرفته است. گزارش‌های منتشر شده در این زمینه به بررسی خواص بدست آمده از روش‌های مختلف سنتز و استفاده از انواع کربن‌ها می‌پردازد. اما تاکنون گزارشی در زمینه اثر مقدار کربن اکتیو بر ظرفیت خازنی اکسید نیکل مشاهده نشده است. همچنین در همه تحقیقات منتشر شده در زمینه این کامپوزیت‌ها، که در سیستم سه الکترودی انجام شده است، تنها به بررسی خواص در محدوده پتانسیل مثبت می‌پردازند. در این تحقیق، چهار ترکیب مختلف کامپوزیت NiO/AC (دارای مقادیر مختلف کربن) بررسی و نتایج آن با کربن اکتیو مورد استفاده در تهیه کامپوزیت‌ها مقایسه می‌گردد. این مقایسه، شامل پنجره پتانسیل، شکل منحنی ولتامتری چرخه‌ای، ظرفیت خازنی در پنجره‌های پتانسیل مثبت و برای اولین بار در پنجره پتانسیل منفی و بررسی مکانیزم ذخیره انرژی می‌باشد.

## ۲- آزمایش‌ها

برای سنتز مواد خازنی (کامپوزیت‌های NiO/AC) از کربن اکتیو Norit® SX ULTRA استفاده شد. با استفاده از دستگاه سونیکاتور، مقادیر ۰/۲۵، ۱، ۲ و ۴ گرم کربن اکتیو در ۱۰۰cc آب مقطر پخش شد. سپس ۰/۰۲ مول نیترات نیکل<sup>۱</sup> در سوسپانسیون بدست آمده حل شد (۰/۲M). در مرحله بعد، محلول (۰/۵ NaOH) به صورت قطره‌ای و تحت همزن مغناطیسی، به سوسپانسیون تهیه شده، اضافه شد تا pH سوسپانسیون به عدد ۸ برسد. ذرات رسوب داده شده در سوسپانسیون، با استفاده از سانتریفیوژ جدا و با آب مقطر و الکل شستشو داده شدند. رسوب بدست آمده در دمای ۴۵ °C به مدت یک شب خشک و سپس در دمای ۲۵۰ °C به مدت ۴ ساعت در محیط هوا نگهداری شد. این مواد خازنی با نام Ni1، Ni0.5، Ni0.25 و Ni4 نامگذاری شدند که به ترتیب نشان‌دهنده حضور مقدار ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، و ۴ گرم کربن در ۱۰۰cc محلول اولیه است.

برای تهیه الکترودها، مواد خازنی سنتز شده، با پلیوینیلیدینفلوراید<sup>۲</sup> و استیلین سیاه<sup>۳</sup> به نسبت وزنی ۷۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ در محلول NMP<sup>۴</sup> به مدت یک شب توسط همزن مغناطیسی مخلوط شد تا جوهر غلیظ و هموزنی بدست آید. با استفاده از یک قلم مو، سوسپانسیون بدست آمده بر روی ورق‌های نیکل به عنوان الکتروده جمع‌کننده<sup>۵</sup> به قطر ۱cm لایه نشانی شده و به مدت یک شب در دمای ۷۰ °C خشک شدند. میانگین وزن لایه نشانی شده بر روی هر الکتروده حدود ۲/۵ mg بود.

<sup>۱</sup> Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O

<sup>۲</sup> PVDF: Polyvinylidene difluoride

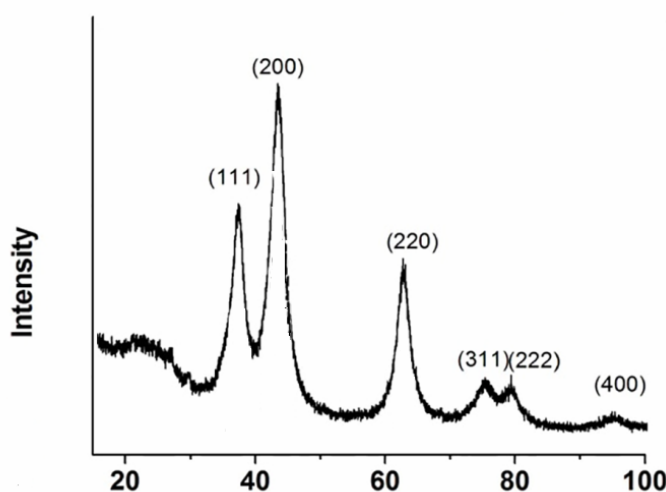
<sup>۳</sup> Acetylene Black

<sup>۴</sup> N-methylpyrrolidione

<sup>۵</sup> Collect Electrode

بررسی فازی نمونه Ni<sub>0.5</sub> با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس (Diffractometer Siemens D5000) صورت گرفت. بررسی میکروساختاری با دستگاه SEM (ZEISS) مجهز به آنالیز عنصری EDAX انجام شد. برای انجام آزمایش‌های الکتروشیمیایی از دستگاه Autolab potentiostat PGSTAT 100 و نرم‌افزار GPES استفاده شد. روش‌های ولتامتری چرخه‌ای و گالوانوستاتیک شارژ-تخلیه برای بررسی رفتار الکتروشیمیایی الکترودهای کاری، استفاده شد. همه آزمایش‌ها با استفاده از سلول Teflon Swagelok® و در سیستم سه الکترودی انجام گرفت. ورقه‌های کربنی با ضخامت ۱۹۰ میکرون (Toray, Electrochem. Inc., USA) به عنوان الکتروده شمارنده<sup>۱</sup> و الکتروده 3M NaCl, Ag/AgCl با علامت اختصاری SSCE، (۰/۲۱) ولت در مقابل الکتروده مرجع هیدروژن) به عنوان الکتروده مرجع انتخاب شد. الکتروده کاری و شمارنده با استفاده از صفحات کاغذی<sup>۲</sup> از هم‌دیگر جدا شدند. در این تحقیق، دانسیته جریان‌های ولتامتری چرخه‌ای و گالوانوستاتیک بر حسب وزن کل الکتروده و پارامترهای الکتروکی بر اساس وزن مواد خازنی (وزن کربن اکتیو و مواد کامپوزیتی به ترتیب در الکترودهای تهیه شده از کربن اکتیو و کامپوزیت‌ها) محاسبه و گزارش می‌شود.

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

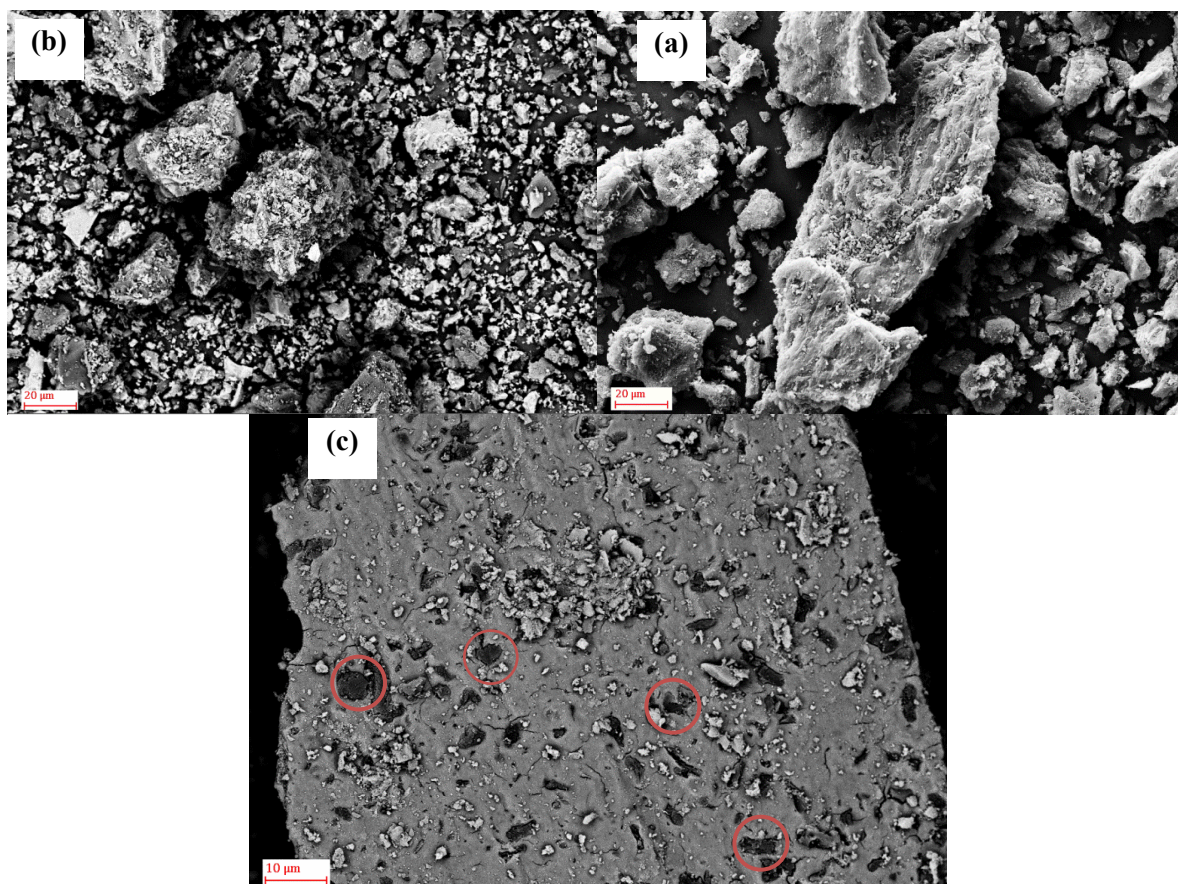


شکل ۱- آنالیز پراش اشعه ایکس از نمونه Ni<sub>0.5</sub>

پراش اشعه ایکس نمونه Ni<sub>0.5</sub> در شکل ۱ مشاهده می‌شود. موقعیت پیک‌ها در شکل ۱ نشان‌دهنده صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲) و (۴۰۰) فاز NiO با شماره کارت (JCPDS card 00-047-1049) می‌باشد. همچنین پیک پهن در حدود ۲۰ درجه مربوط به حضور کربن اکتیو در نمونه است [۱۳]. مطابق با این شکل هیچ پیک اضافی که نشان‌دهنده حضور ناخالصی‌هایی از جمله هیدروکسید نیکل در نمونه باشد، مشاهده نمی‌شود.

<sup>1</sup> Counter Electrode

<sup>2</sup> Glassy fibrous paper sheet Whatman, GF/A



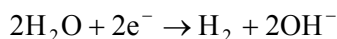
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه (a) کربن اکتیو، (b) کامپوزیت Ni<sub>0.5</sub> و (c) تصویر الکترون‌های برگشتی از نمونه Ni<sub>0.5</sub> (آنالیز عنصری از سطوح مشخص شده با دایره‌های قرمز رنگ نشان می‌دهد این سطوح نسبت به سایر مناطق مقدار کربن بیشتری دارند).

شکل (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های کربن اکتیو را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود ذرات کربنی دارای محدوده وسیعی از اندازه‌ها هستند. تصویر میکروسکوپ الکترونی (b) از نمونه کامپوزیتی Ni<sub>0.5</sub> نیز نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات مشابه با نمونه کربن اکتیو می‌باشد. شکل (c) تصویر بدست آمده از الکترون‌های برگشتی را در نمونه Ni<sub>0.5</sub> نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده با استفاده از آنالیز edax در قسمت‌های مختلف نمونه نشان می‌دهد اگرچه در همه سطح نمونه، حضور کربن و نیکل قابل شناسایی است، اما در قسمت‌هایی از نمونه که در تصویر (c) به رنگ تیره‌تر مشاهده می‌شود (به عنوان مثال محصور در دایره‌های قرمز رنگ)، مقادیر کربن بیشتر از سایر مناطق است. این نتیجه، نشان می‌دهد اکسید نیکل روی سطوح کربن و به صورت نایکنواخت تشکیل می‌شود.

روش ولتامتری چرخه‌ای<sup>۱</sup> روشی متداول برای بررسی خواص الکتروشیمیایی و تعیین پنجره پتانسیل مواد در کاربردهای ابرخازنی می‌باشد. به منظور بررسی خواص الکتروشیمیایی مواد، رفتار ولتامتری چرخه‌ای الکترودهای تهیه شده از کربن اکتیو، در پنجره

<sup>1</sup> Cyclic Voltammetry

پتانسیل  $[-1V_{/SSCE}, 0/25V_{/SSCE}]$  در محیط قلیایی (KOH 1M) بررسی شد (شکل ۳(a)). مطابق با این شکل، پیکی که نشان دهنده حضور واکنش‌های اکسایش-کاهش در این پنجره پتانسیل باشد، مشاهده نمی‌شود. این شکل ولتامتری که مشخصه مواد کربنی است، ناشی از مکانیزم لایه دوتایی است. در پتانسیل  $-1V_{/SSCE}$ ، شروع افزایش ناگهانی جریان مشاهده می‌شود که مربوط به تجزیه آب و آزاد شدن گاز هیدروژن مطابق با واکنش زیر است [۱۴].

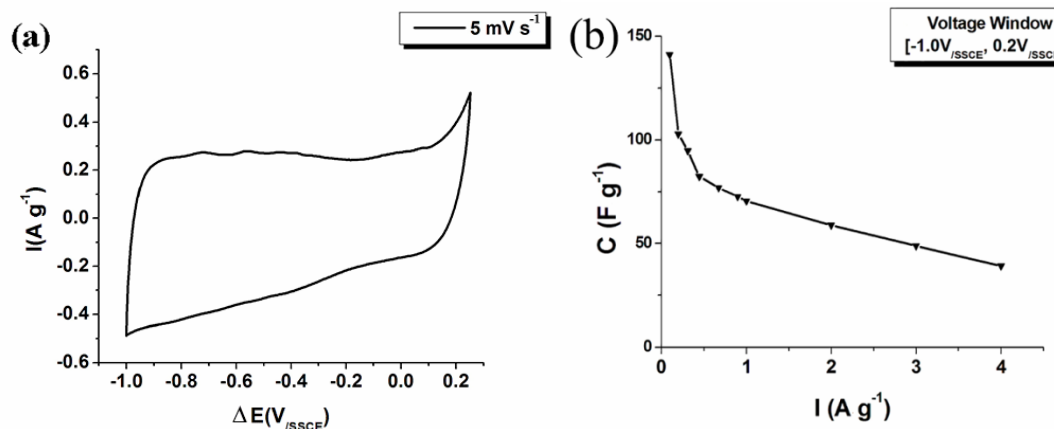


در ناحیه پتانسیل‌های مثبت نیز، افزایش جریان در پتانسیل بیشتر از  $0/2V_{/SSCE}$ ، مربوط به تجزیه آب و آزاد شدن گاز اکسیژن و یا اکسید شدن کربن اکتیو و تشکیل گاز دی اکسید کربن می‌باشد [۱۴]. با توجه به افزایش شدید جریان در انتهای ناحیه پتانسیل مثبت، به نظر می‌رسد پنجره پتانسیل  $[-1 V_{/SSCE}, 0/2V_{/SSCE}]$  مناسب‌ترین دامنه پتانسیل برای کربن اکتیو مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد.

بهترین روش برای اندازه‌گیری ظرفیت ویژه مواد خازنی، روش گالوانوستاتیک شارژ-تخلیه می‌باشد. معادله زیر برای محاسبه ظرفیت ویژه با استفاده از این روش استفاده می‌شود.

$$C_s = \frac{I \Delta t}{m \Delta E} \quad (1)$$

در این رابطه،  $C_s (F g^{-1})$  ظرفیت ویژه،  $I (A)$ ،  $\Delta t (s)$ ،  $\Delta E (V)$  و  $m (g)$  به ترتیب جریان، زمان تخلیه، پنجره پتانسیل مورد استفاده و جرم مواد خازنی (جرم کربن اکتیو یا کامپوزیت‌ها) روی الکتروود کاری می‌باشد.



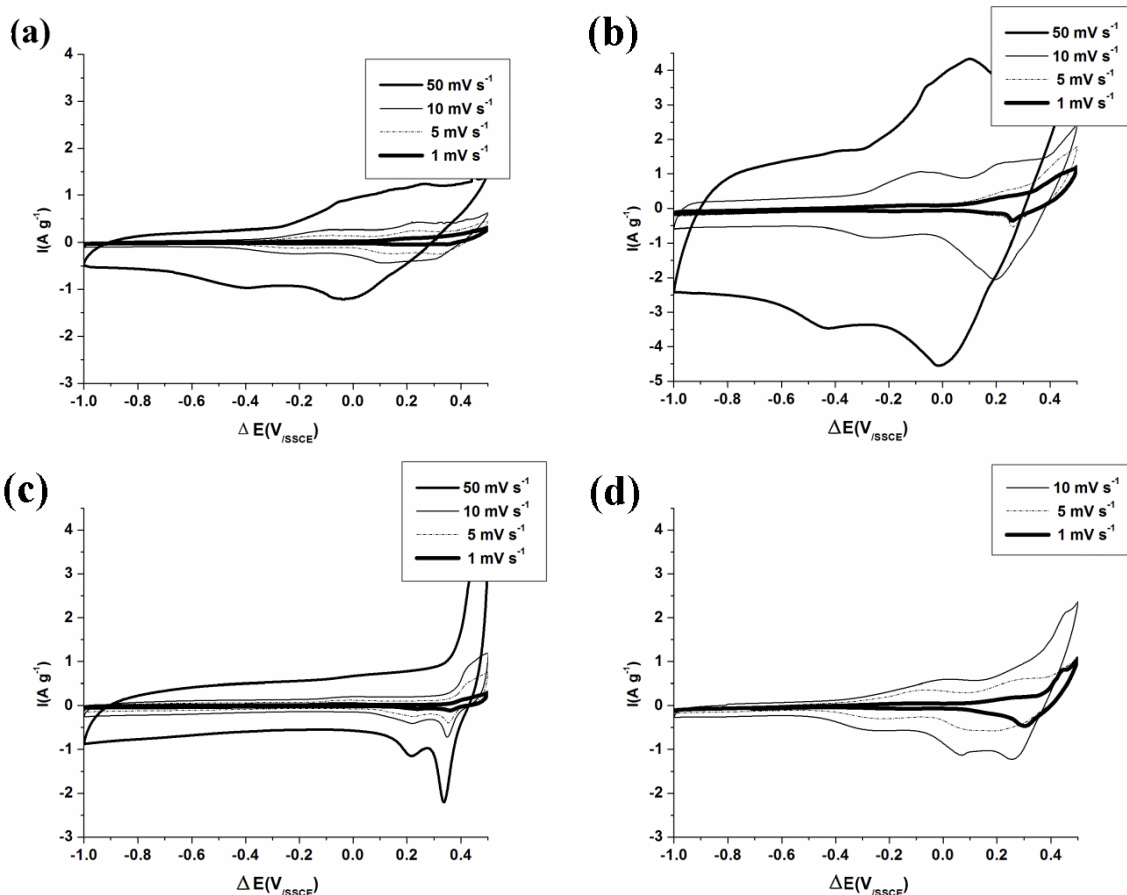
شکل ۳- (a) منحنی ولتامتر چرخه‌ای الکتروود کربن اکتیو در سیستم سه الکتروودی در پنجره پتانسیل

$[-1/0 V_{/SSCE}, 0/25V_{/SSCE}]$ ; (b): تغییرات ظرفیت ویژه با دانسیته جریان در شرایط جریان ثابت در پنجره پتانسیل

الکتروولیت:  $[-1/0 V_{/SSCE}, 0/2V_{/SSCE}]$  1 M. KOH

شکل ۳(b) نتایج حاصل از ظرفیت کربن اکتیو را در جریان‌های مختلف از  $0/1 A g^{-1}$  تا  $4 A g^{-1}$  در پنجره پتانسیل  $[-1 V_{/SSCE}, 0/2V_{/SSCE}]$  نشان می‌دهد. چنانچه انتظار می‌رود با افزایش دانسیته جریان، ظرفیت ویژه کاهش می‌یابد. ماکزیمم ظرفیت ویژه این ماده  $140 F g^{-1}$  در جریان  $0/1 A g^{-1}$  است.

نتایج ولتامتری چرخه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی NiO/AC با درصدهای مختلف کربن در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- منحنی ولتامتری چرخه‌ای الکتروکود (a): Ni0.25، (b): Ni0.5، (c): Ni1 و (d): Ni4 (الکترولیت: 1 M. KOH)

چنانچه مشاهده می‌شود، در نمونه‌های کامپوزیتی، امکان افزایش پتانسیل تا حدود  $0.5V/SSCE$  وجود دارد. مقایسه منحنی‌های بدست آمده از الکترودهای کامپوزیتی (شکل ۴) با منحنی بدست آمده از الکتروکود کربن اکتیو (شکل ۳(a)) نشان می‌دهد با حضور اکسید نیکل در الکترودهای کامپوزیتی، واکنش‌های ناخواسته تجزیه آب و اکسید شدن کربن، از  $0.25V/SSCE$  در الکتروکود کربن اکتیو به حدود  $0.5V/SSCE$  در الکترودهای کامپوزیتی افزایش می‌یابد. از آنجا که میزان ذخیره انرژی، در خازن‌ها علاوه بر اینکه وابسته به ظرفیت خازنی است، همچنین وابسته به توان دو پنجره پتانسیل است، بنابراین افزایش پنجره پتانسیل موجب افزایش ذخیره انرژی در خازن‌ها می‌شود. همچنین جفت پیک‌های مشاهده شده در ولتامتری چرخه‌ای در همه نمونه‌های کامپوزیتی، ناشی از واکنش‌های اکسایش-کاهش اکسید نیکل در کامپوزیت‌ها است. محققان، واکنش‌های اکسایش و کاهش در اکسید نیکل را ناشی از تبدیل  $Ni^{2+}$  به  $Ni^{3+}$  در مرحله شارژ و واکنش معکوس در مرحله تخلیه مطابق با واکنش زیر گزارش کرده‌اند [۵، ۶].



همچنین گزارش‌هایی نیز مربوط به واکنش اکسایش  $Ni^{2+}$  به  $Ni^{3+}$  و سپس  $Ni^{4+}$  منتشر شده است [۱۵].

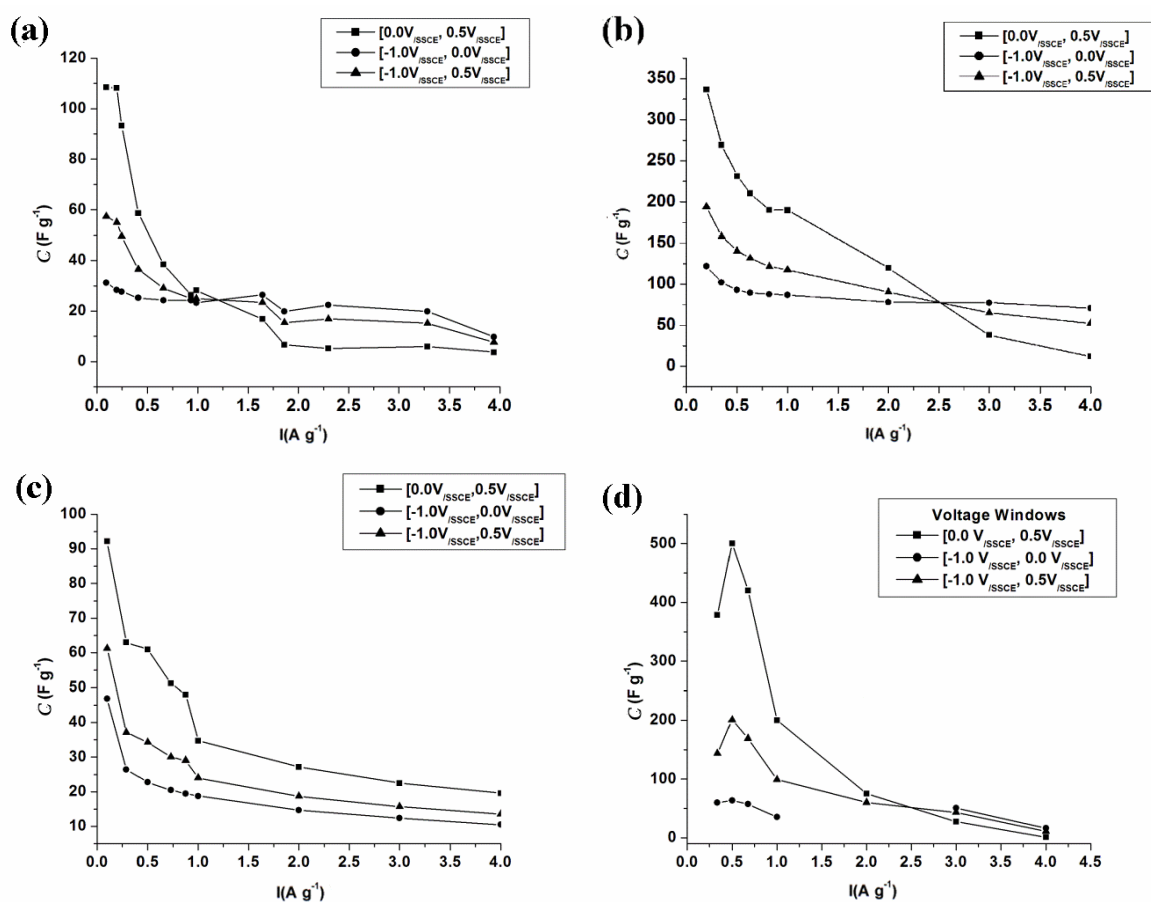
مکانیزم لایه دوتایی که عامل ذخیره انرژی در کربن اکتیو در پتانسیل‌های پایین می‌باشد (شکل ۲)، در نمونه‌های کامپوزیتی نیز نقش مهمی در ذخیره انرژی در پتانسیل‌های پایین دارد.

روش گالوانواستاتیک شارژ-تخلیه در پنجره پتانسیل  $[-1/0 V_{SSCE}, 0/5 V_{SSCE}]$  برای الکترودهای کامپوزیتی انجام شد و با استفاده از معادله ۱ در پنجره‌های پتانسیل  $[-1/0 V_{SSCE}, 0/0 V_{SSCE}]$ ،  $[0/0 V_{SSCE}, 0/5 V_{SSCE}]$  و  $[-1/0 V_{SSCE}, 0/5 V_{SSCE}]$  محاسبه شد. نتایج حاصل از این آنالیز در منحنی‌های شکل ۵ ارائه شده است.

در نمونه‌های Ni0.5 و Ni1 امکان اندازه‌گیری ظرفیت خازنی در جریان  $0/1 A g^{-1}$  با استفاده از روش گالوانواستاتیک شارژ-تخلیه وجود ندارد (بدلیل عدم امکان افزایش ولتاژ تا  $0/5 V_{SSCE}$  در جریان  $0/1 A g^{-1}$ ). در نمونه Ni4 نیز، بررسی ظرفیت خازنی در جریان‌های  $0/3 A g^{-1}$  و کمتر وجود ندارد. احتمالاً رفتار این نمونه‌ها، بدلیل انجام واکنش‌های ناخواسته در سیستم مربوط به حضور کربن اکتیو به مقدار قابل توجه می‌باشد. (آزاد شدن اکسیژن و دی اکسید کربن در پتانسیل‌های نسبتاً پایین در محیط‌های قلیایی) [۱۴].

در نمونه Ni0.25 (شکل ۵(a))، که کمترین مقدار کربن را در بین نمونه‌ها دارد، در جریان‌های از  $4 A g^{-1}$  تا حدود  $1/5 A g^{-1}$  ظرفیت در محدوده پتانسیل‌های مثبت ( $[0/0 V_{SSCE}, 0/5 V_{SSCE}]$ ) که بیشتر ناشی از واکنش‌های اکسایش-کاهش و مکانیزم شبه‌خازنی است، از محدوده پتانسیل‌های منفی  $[-1/0 V_{SSCE}, 0/0 V_{SSCE}]$ ، کمتر است. با کاهش دانسیته جریان، این روند معکوس می‌شود و در حالیکه ظرفیت در محدوده پتانسیل‌های منفی افزایش قابل توجهی ندارد (مشخصه مکانیزم لایه دوتایی)، در ناحیه پتانسیل‌های مثبت، ظرفیت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (مشخصه مکانیزم شبه‌خازنی). در نمونه Ni0.5، روند تغییر سیر افزایش ظرفیت با کاهش دانسیته جریان در جریان‌های حدود  $2/5 A g^{-1}$  اتفاق می‌افتد و در نمونه Ni1 در همه دانسیته‌های جریان، ظرفیت در محدوده پتانسیل منفی کمتر از محدوده پتانسیل مثبت است. با افزایش کربن به مقدار  $4 g^{-1}$  (نمونه Ni4) در دانسیته‌های جریان زیاد، تفاوت چندانی بین ظرفیت ویژه در محدوده پتانسیل‌های مثبت و منفی وجود ندارد، اما در دانسیته‌های جریان پایین، ظرفیت در پتانسیل‌های مثبت بسیار بیشتر از محدوده منفی است که نشان دهنده غالب بودن مکانیزم شبه‌خازنی در دانسیته‌های جریان پایین (ناشی از حضور اکسید نیکل) است.

با مقایسه نتایج بدست آمده در شکل ۵، مشاهده می‌شود ظرفیت ویژه نمونه Ni0.5، در کل پنجره پتانسیل  $[0/5 V_{SSCE}, -1/0 V_{SSCE}]$ ، از همه نمونه‌های کامپوزیتی (به استثنا نمونه Ni4 در دانسیته جریان  $0/5 A g^{-1}$ ) و همچنین کربن اکتیو بیشتر است و تقریباً امکان استفاده از آن در دانسیته‌های جریان پایین نیز می‌باشد. در حالیکه در نمونه Ni4، در دانسیته جریان  $0/5 A g^{-1}$ ، مقدار ظرفیت ویژه  $200 F g^{-1}$  است که بیشتر از مقدار  $141 F g^{-1}$  در دانسیته جریان  $0/1 A g^{-1}$  در نمونه کربنیو  $194 F g^{-1}$  در دانسیته جریان  $0/2 A g^{-1}$  در نمونه Ni0.5 است. بنابراین به نظر می‌رسد این نمونه بهترین ترکیب را فقط در دانسیته جریان  $0/5 A g^{-1}$  در کل رنج پتانسیل دارد. البته با مقایسه نتایج شکل ۵ مشاهده می‌شود این ترکیب بیشترین ظرفیت را در رنج پتانسیل مثبت ( $[0/0 V_{SSCE}, 0/5 V_{SSCE}]$ )، و در جریان‌های  $1 A g^{-1}$  و  $0/5 A g^{-1}$  دارد.



شکل ۵- ظرفیت ویژه بر حسب دانسیته جریان در نمونه‌های (a): Ni0.25; (b): Ni0.5; (c): Ni1 و (d): Ni4 در سیستم سه الکترودی در سه پنجره پتانسیل ( $[0.5V_{SSCE}/0V_{SSCE}]$ ،  $[0V_{SSCE}/-1.0V_{SSCE}]$  و  $[0.5V_{SSCE}/-1.0V_{SSCE}]$ ) (الکتrolیت: 1 M. KOH)

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار الکتروشیمیایی کربن اکتیو، و چهار ترکیب مختلف کامپوزیتی آن با اکسید نیکل با روش‌های ولتامتری چرخه‌ای و گالوانواستاتیک شارژ-تخلیه بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد با افزودن اکسید نیکل به کربن در طی فرآیند سنتز، پنجره پتانسیل کامپوزیت‌ها در الکتrolیت KOH (1M) از  $0.2V_{SSCE}$  به حدود  $0.5V_{SSCE}$  افزایش می‌یابد. نمونه Ni0.5 تقریباً بیشترین ظرفیت ویژه را در بین نمونه‌ها و در همه دانسیته‌های جریان دارد، علاوه بر اینکه قابل استفاده در دانسیته‌های جریان پایین نیز است. نمونه Ni4 مناسب‌ترین ترکیب برای استفاده در رنج پتانسیل‌های مثبت و جریان‌های  $1 A g^{-1}$  و  $0.5 A g^{-1}$  است.



- [1] Conway, B. E., *Electrochemical Supercapacitors, Scientific Fundamentals and Technological Application*. 1999.
- [2] Adekunle, A., et al., Supercapacitive Properties of Symmetry and the Asymmetry Two Electrode Coin Type Supercapacitor Cells Made from MWCNTS/Nickel Oxide Nanocomposite. *Int. J. Electrochem. Sci*, 2011. 6: p. 4760- 4774.
- [3] Patake, V. D. and C. D. Lokhande, Chemical synthesis of nano-porous ruthenium oxide (RuO<sub>2</sub>) thin films for supercapacitor application. *Applied Surface Science*, 2008. 254(9): p. 2820-2824.
- [4] Ghenaatian, H. R., M. F. Mousavi, and M. S. Rahmanifar, High performance hybrid supercapacitor based on two nanostructured conducting polymers: Self-doped polyaniline and polypyrrole nanofibers. *Electrochimica Acta*, 2012. 78(0): p. 212-222.
- [5] Cheng, J., G.-P. Cao, and Y.-S. Yang, Characterization of sol-gel-derived NiOx xerogels as supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 2006. 159(1): p. 734-741.
- [6] Khairy, M. and S. A. El-Safty, Mesoporous NiO nanoarchitectures for electrochemical energy storage: influence of size, porosity, and morphology. *RSC Advances*, 2013. 3(45): p. 23801-23809.
- [7] Kim, S.-I., et al., Facile Route to an Efficient NiO Supercapacitor with a Three-Dimensional Nanonetwork Morphology. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011. 3(5): p. 1596-1603.
- [8] Lee, J. W., et al., Nanosheets based mesoporous NiO microspherical structures via facile and template-free method for high performance supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 2011. 56(13): p. 4849-4857.
- [9] Liu, M., et al., Synthesis of porous NiO using NaBH<sub>4</sub> dissolved in ethylene glycol as precipitant for high-performance supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 2013. 107(0): p. 9-15.
- [10] Lota, K., A. Sierczynska, and G. Lota, Supercapacitors Based on Nickel Oxide/Carbon Materials Composites. *International Journal of Electrochemistry*, 2011. 2011.
- [11] Lu, W., et al., Nanocomposite Electrodes for High-Performance Supercapacitors. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2011. 2(6): p. 655-660.
- [12] Marcinauskas, L., Ž. Kavaliauskas, and V. Valinčius, Carbon and Nickel Oxide/Carbon Composites as Electrodes for Supercapacitors. *Journal of Materials Science & Technology*,

2012. 28(10): p. 931-936.
- [13] Wang, Y., et al., One-pot synthesis of nickel oxide-carbon composite microspheres on nickelfoam for supercapacitors. *Journal of Materials Science*, 2012. 47(5): p. 2182-2187.
- [14] Sun, X., et al., A comparative study of activated carbon-based symmetric supercapacitors in Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and KOH aqueous electrolytes. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2012. 16(8): p. 2597-2603.
- [15] Boschloo, G. and A. Hagfeldt, Spectroelectrochemistry of Nanostructured NiO. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2001. 105(15): p. 3039-3044.