

# بررسی اثر چگالی جریان و pH بر رسوب‌دهی الکتریکی آلیاژ Fe-Ni و پارامترهای راندمانی فرایند آن

آمنه وحیدیان<sup>۱\*</sup>، علی سعیدی<sup>۲</sup>، محمد علی گل‌عذار<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۰)

\*avahidian@gmail.com

## چکیده

تولید انواع آلیاژها با ساختار نانو توسط رسوب دهی الکتریکی اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. در این میان آلیاژهای مغناطیسی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این تحقیق آلیاژ مغناطیسی و نانو ساختار Fe-Ni به روش رسوب دهی الکتریکی با جریان مستقیم تولید شد. آلیاژ بدست آمده به کمک آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDS) مشخصه یابی گردید. همچنین اثر عواملی چون pH و چگالی جریان بر ترکیب محصول، روند رسوب غیر عادی، بازده جریان و انرژی مصرفی ویژه فرایند رسوب دهی بررسی شد. با استفاده از نتایج XRD و فرمول شرر برای محاسبه اندازه دانه مشخص شد که آلیاژی با اندازه دانه کمتر از ۳۰ نانومتر حاصل شده است. با افزایش pH، میزان نیکل افزایش و آهن کاهش می یابد و بازده جریان نیز روند افزایشی دارد. همچنین با افزایش چگالی جریان مقدار نیکل کاهش و آهن افزایش و انرژی مصرفی ویژه نیز افزایش می یابد. رسوب‌دهی غیر عادی نیز برای تمامی نمونه‌ها مشاهده شد.

## واژه‌های کلیدی:

رسوب‌دهی الکتریکی، جریان مستقیم، Fe-Ni، بازده جریان.

## ۱- مقدمه

(CTE) کم و خواص نرم مغناطیسی کاربرد زیادی در صنعت دارند. کاربردهایی که بر پایه CTE کم آلیاژهای آهن-نیکل است، شامل ماسک‌های توخالی تیوب اشعه کاتدی و پوسته‌هایی برای تانکرهای حاوی گاز طبیعی مایع می باشد. علاوه بر این کاربردهایی که بر پایه ویژگی‌های مغناطیسی نرم آن هستند نیز شامل سنسورها و محافظ‌های مغناطیسی و هسته‌های

در سال‌های اخیر رسوب دهی الکتریکی آلیاژهای مغناطیسی برای کاربردهای عملی در تکنولوژی صنایع مدرن اهمیت پیدا کرده است. آلیاژهای نیکل-آهن دارای بیشترین قابلیت برای مغناطیسی شدن در میان تمام آلیاژهای مغناطیسی نرم هستند و با دمای کوری بیش از  $400^{\circ}\text{C}$ ، عملیات حرارتی را به خوبی تحمل می‌کنند. به طور کلی آلیاژهای آهن-نیکل به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مثل ضریب انبساط حرارتی<sup>۱</sup>

## ۲- مواد و روش تحقیق

ترکیب الکترولیت تحقیق حاضر مطابق با جدول (۱) می باشد که مواد اولیه مورد استفاده برای ساخت حمام آن عبارتند از پودرهای تتراهیدرات کلرید آهن (144043Merck)، هگزا هیدرات کلرید نیکل (Sigma-Aldrich 31462) و اسید بوریک (100165Merck).

در آزمایش ها از فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به عنوان کاتد استفاده شد. علت استفاده از این کاتد سهولت جدا سازی رسوب از کاتد و عدم حلالیت در الکترولیت است. عملیات سنباده زنی سطح کاتد با استفاده از سنباده SiC تا شماره ۱۲۰۰ انجام شد. قبل از شروع رسوب دهی الکترولیتی، ابتدا زیر لایه با آب مقطر شستشو شد و سپس به منظور فعال سازی، سطح زیر لایه در اسید سولفوریک ۲۰٪ به مدت ۲۰ ثانیه فرو برده شد. پس از آن بلافاصله با آب مقطر شستشو و وارد حمام شد. برای آند نیز از یک ورق نیکل خالص استفاده شد.

به منظور رسوب دهی الکترولیتی از دستگاه کلونمتر مدل BHP2520 ساخت شرکت به پژوه استفاده شد. در این دستگاه، داده های ورودی شامل دو پارامتر شدت جریان اعمالی و زمان بود که بر حسب میلی آمپر و ثانیه به آن وارد شد. برای این منظور قبل از شروع آزمایش، حمام به دما و pH مورد نظر رسانده شد و سپس رسوب دهی آغاز گردید. رسوب دهی در یک بشر ۵۰۰ cc انجام شد و برای تمامی موارد فاصله آند و کاتد ثابت و یکسان تنظیم شد. در طول آزمایش از یک درپوش برای جلوگیری از تبخیر محلول در طول آزمون استفاده شد. همچنین سرعت همزدن در کلیه شرایط ثابت و برابر با ۴۰۰ rpm انتخاب شد. در کلیه حمام ها، جمع مولالیت یون های آهن و نیکل یک انتخاب شد. در طول آزمون نیز به فاصله هر ۱۰ دقیقه، pH محلول بررسی و در صورت لزوم تنظیم شد.

ترانسفورماتور می باشد [۱-۵]. روش رسوب الکتروشیمیایی شامل انتقال کاتیون های فلزی از آند به سوی کاتد است که از جدایش نمک آن ها به هنگام حل شدن در آب حاصل می شوند و این امر در حضور اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد صورت می گیرد. می توان این روش را برای ساخت فیلم فلزی یا آلیاژی با ساختار نانو استفاده کرد. تنها تعدادی از آلیاژها در صنعت با این روش تولید شده اند چون رسوب دهی الکترولیتی آلیاژها فرایندی پیچیده تر از رسوب دهی الکترولیتی فلزات خالص است و اغلب به کنترل و تنظیم پیوسته نیاز دارد. استفاده از روش های الکتروشیمیایی به دلیل مزایایی چون سادگی سیستم و عدم نیاز به تجهیزات گران قیمت، عدم آلودگی محیط زیست و قابلیت کنترل به عنوان روشی اقتصادی و عملی برای تولید پوشش های نانو ساختار شناخته شده است که تعداد مقالات منتشر شده در سال های اخیر، گواهی بر مزیت عمده این روش می باشد [۶-۷].

بسیاری از عوامل الکتروشیمیایی مانند ترکیب الکترولیت، pH و پتانسیل رسوبی بر فرایند رسوب دهی الکترولیتی و کیفیت نهایی پوشش حاصله اثر می گذارند [۸]. با وجود اینکه زمان زیادی از تاریخ آبتکاری و استفاده از آن در صنعت می گذرد، ولی هنوز در رابطه با بهینه سازی بازدهی جریان، راندمان تولید و مصرف انرژی مشکلاتی وجود دارد. اگر چه وقتی از رسوب دهی الکترولیتی به منظور تولید پوششی نازک استفاده می شود، مصرف انرژی نسبت به سایر پارامترها از اهمیت کمتری برخوردار است، لیکن در آلیاژ سازی به روش فوق، در مقیاس بالک، مصرف انرژی یک پارامتر قابل ملاحظه می باشد. به همین جهت بررسی پارامترهای مؤثر بر بازده جریان رسوب دهی الکترولیتی نیز مهم به نظر می رسد. در این تحقیق نمونه رسوب - دهی الکترولیتی شده آلیاژ Fe-Ni تولید شده است و اثر اعمال چگالی جریان و pH بر روند تغییرات ترکیب نمونه ها و بازده جریان و پارامتر انرژی مصرفی ویژه آن ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

جدول (۱): شرایط الکترولیت

Ascorbic acid (g/L)	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (M)	NiCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O (M)	FeCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O (M)	Ni/Fe	دما (°C)
۱/۵	۰/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	۲۰	۴۰

بررسی قرار گرفت. نامگذاری نمونه ها و متغیرهای رسوب دهی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): نامگذاری و متغیرهای رسوب دهی الکتریکی با استفاده از جریان

مستقیم

زمان (s)	pH	چگالی جریان (mA.cm <sup>-2</sup> )	کد نمونه
۱۰۸۰۰	۱/۵	۲۰	DE1
۴۳۲۰	۱/۵	۵۰	DE2
۳۰۸۵	۱/۵	۷۰	DE3
۲۷۰۰	۱/۵	۸۰	DE4
۲۱۶۰	۱/۵	۱۰۰	DE5
۱۰۸۰۰	۲	۲۰	DE6
۴۳۲۰	۲	۵۰	DE7
۳۰۸۵	۲	۷۰	DE8
۲۷۰۰	۲	۸۰	DE9
۲۱۶۰	۲	۱۰۰	DE10
۱۰۸۰۰	۲/۵	۲۰	DE11
۴۳۲۰	۲/۵	۵۰	DE12
۳۰۸۵	۲/۵	۷۰	DE13
۲۷۰۰	۲/۵	۸۰	DE14
۲۱۶۰	۲/۵	۱۰۰	DE15

جهت بررسی فازهای تولید شده در محصول رسوب دهی از دستگاه آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، مدل Philips Xpert استفاده شد. برای محاسبه درصد وزنی عناصر نیز از آنالیزور عنصری EDAX دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید.

اثر شرایط فرایند رسوب دهی بر پارامترهای بازده جریان و انرژی مصرفی ویژه نیز بررسی شد که با توجه به فرمول فارادی در رابطه (۱) [۹]، معادله بازده جریان<sup>۲</sup> در رابطه (۲) [۹] و انرژی مصرفی ویژه [۱۰] در رابطه (۳) به صورت زیر می باشد:

$$m = \frac{QA}{nF} \quad (۱)$$

$$CE = \frac{m'}{m} \quad (۲)$$

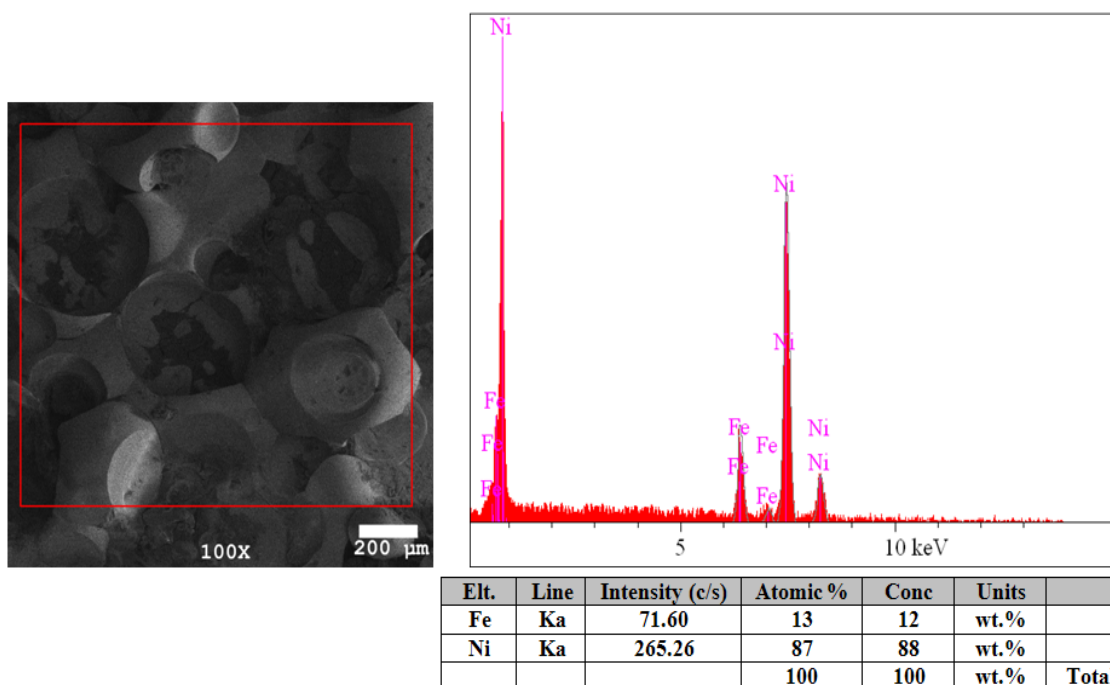
$$SEC = \frac{V \cdot I \cdot t}{m'} \quad (۳)$$

به صورتی که در روابط فوق،  $m$  جرم تئوری رسوب (با استفاده از فرمول فارادی) و  $m'$  جرم بدست آمده از فرایند رسوب الکتریکی بر حسب گرم،  $Q$  مجموع بار گذر کرده از مدار بر حسب کولمب (حاصلضرب جریان عبوری از مدار در زمان فرایند)،  $A$  جرم مولی متوسط ترکیب رسوب دهی شده بر حسب گرم بر مول (با توجه به درصد اتمی عناصر در رسوب که با آنالیز EDS بدست آمد)،  $n$  تعداد الکترون های منتقل شده در حین فرایند رسوب دهی به ازای هر اتم فلز رسوب کرده (در اینجا  $n=۲$ )،  $F$  ثابت فارادی (برابر با  $۹۶۵۰۰\text{C/mol}$ )،  $t$  زمان رسوب دهی،  $V$  ولتاژ مدار و  $I$  جریان اعمالی برای فرایند رسوب دهی الکتریکی می باشد. همچنین منظور از انرژی مصرفی ویژه، میزان انرژی مصرفی به ازای هر گرم ماده است. مشخصه بازده جریان نیز راندمان مصرف جریان را اعلام می کند. اندازه گیری این پارامترها با سه بار تکرار صورت گرفت و میانگین این اندازه گیری ها گزارش شد. بنابراین اثر متغیرهایی چون pH و چگالی جریان بر ترکیب محصول، و پارامترهایی چون بازده جریان و انرژی مصرفی ویژه مورد

## ۳- نتایج و بحث

با توجه به اینکه در تولید آلیاژ بوسیله رسوب دهی الکتروشیمیایی یک فاکتور مهم بدست آوردن آلیاژ با درصد مشخص از عناصر است لذا در این تحقیق نیز ابتدا اثر پارامترهای مختلف بر ترکیب رسوب بررسی شد. بدیهی ترین پارامتر موثر مولالیت ی عناصر در حمام است (ترکیب حمام). مطابق با جدول پتانسیل استاندارد الکترودی، میزان این پتانسیل برای احیای  $Ni^{2+}$  خالص ( $-0.257V$ ) مثبت تر از  $Fe^{2+}$  ( $-0.447V$ ) می باشد، یعنی در حالت عادی نیکل نجیب تر از آهن است و انتظار می رود احیای نیکل آسان تر از آهن باشد، مثلا وقتی مولالیت آهن و نیکل در الکترولیت مساوی هستند، درصد نیکل در رسوب بیشتر از آهن باشد. ولی آزمایش های اولیه

نشان داد در شرایط مولالیت مساوی درصد آهن در رسوب بسیار بیشتر از نیکل می باشد. در این تحقیق از حمامی با نسبت نیکل به آهن برابر با ۲۰ استفاده شد (جدول ۱). نتایج حاصل از آنالیز EDS نمونه ها نیز نشان داد که نسبت Ni/Fe در تمامی محصولات رسوب دهی الکتریکی بسیار کم تر از این مقدار می باشد و عملا بین حدود ۳ تا ۶ تغییر می کند (شکل (۱) تا (۵)). یعنی در این الکترولیت، آهن در برابر نیکل تمایل بسیار بیش تری به رسوب کردن نشان داده است. علت این امر، پدیده رسوب غیرعادی آهن-نیکل می باشد که در تحقیقات پیشین نیز نتایج مشابهی گزارش شده است [۱۱-۱۲].

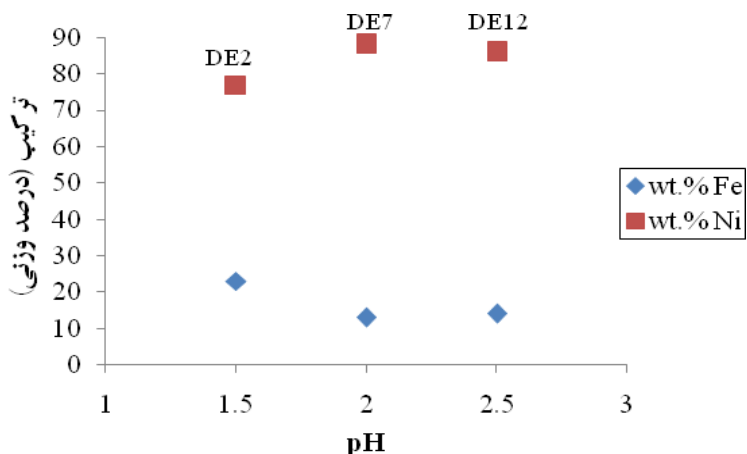


شکل (۱): آنالیز EDS نمونه رسوب دهی الکتریکی شده با جریان مستقیم در چگالی جریان  $50 \text{ mA/cm}^2$  و دمای  $40^\circ \text{C}$  و  $\text{pH}=2$  (DE7)

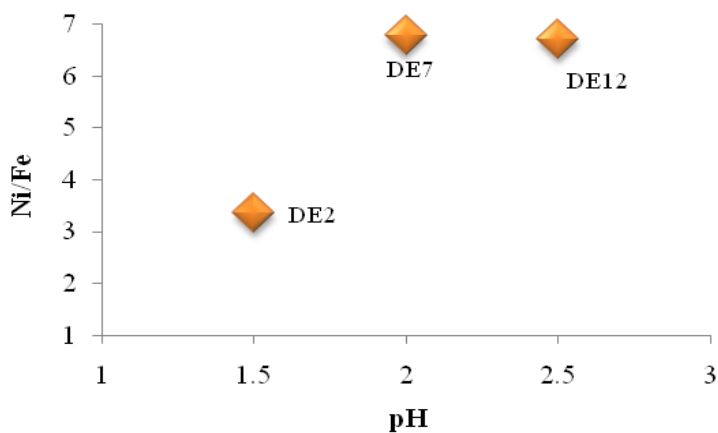
تشکیل و جذب یون های هیدروکسید فلزی روی سطح الکتروود، و رسوب دهی غیر عادی فلزات بر فرایند رسوب دهی اثر گذار می باشد. البته در میان این موارد شرایط اسیدی بسیار موثرتر می باشد، زیرا هنگامی که انحلال آزادانه فلزات رسوبی مطلوب

ملاحظه می شود در شکل (۲) با افزایش pH، از ۱/۵ تا ۲/۵، مقدار نیکل از ۷۷ تا ۸۸ درصد وزنی افزایش و آهن رسوب از ۲۳ تا ۱۲ درصد کاهش می یابد. لازم به ذکر است که سه عامل انحلال لایه سطحی رسوب در الکترولیت به دلیل شرایط اسیدی،

است و تشکیل و جذب هیدروکسیدهای فلزی کاهش می‌یابد، نیکل بیش‌تر به دست می‌آید [۱۳].  
به دلیل مقدار زیاد یون نیکل در الکترولیت، محصولی با مقدار



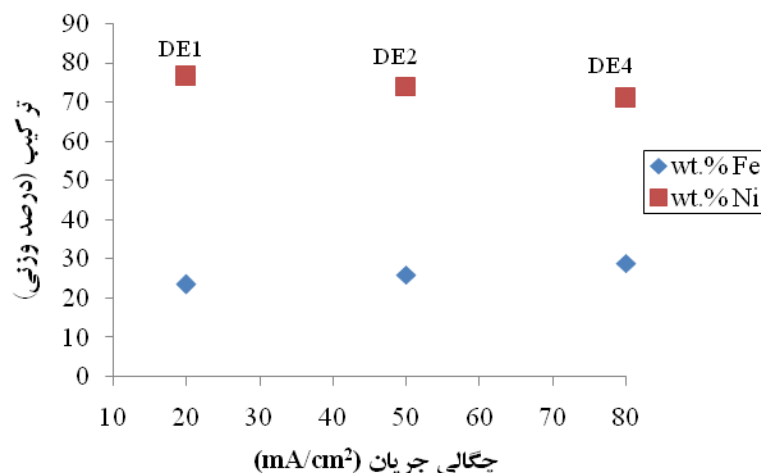
شکل (۲): اثر pH بر میزان نیکل و آهن موجود در محصولات رسوب دهی الکتریکی با جریان مستقیم در چگالی جریان  $50 \text{ mA/cm}^2$



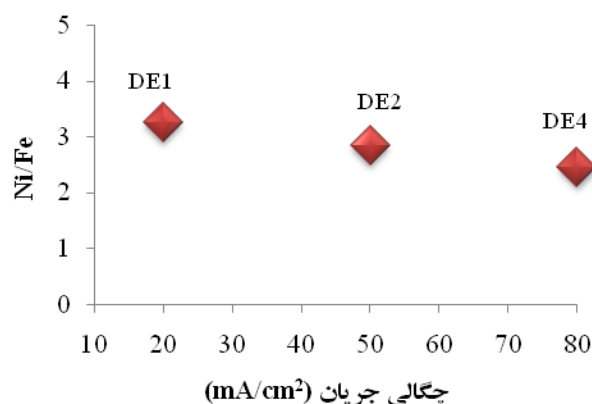
شکل (۳): اثر pH بر نسبت Ni/Fe در نمونه‌های رسوب الکتریکی شده با جریان مستقیم در چگالی جریان  $50 \text{ mA/cm}^2$

جریان و همچنین حضور عامل کمپلکس سازی چون اسید آسکوربیک نسبت داده اند. اسید آسکوربیک ماهیت غیرعادی رسوب دهی را افزایش داده و از اکسیداسیون  $\text{Fe}^{2+}$  به  $\text{Fe}^{3+}$  جلوگیری می‌کند [۱۵] و بنابراین مقدار نیکل را افزایش می‌دهد.

در شکل (۴) و (۵) ترکیب محصول به عنوان تابعی از چگالی جریان نمایش داده شده است به طوری که با افزایش چگالی جریان میزان نیکل کاهش و آهن افزایش می‌یابد. منیرالزمان و همکارانش [۱۴] نیز نتایج مشابهی گزارش کردند که وقوع این روند را به افزایش جذب یون هیدروژن در اثر افزایش چگالی



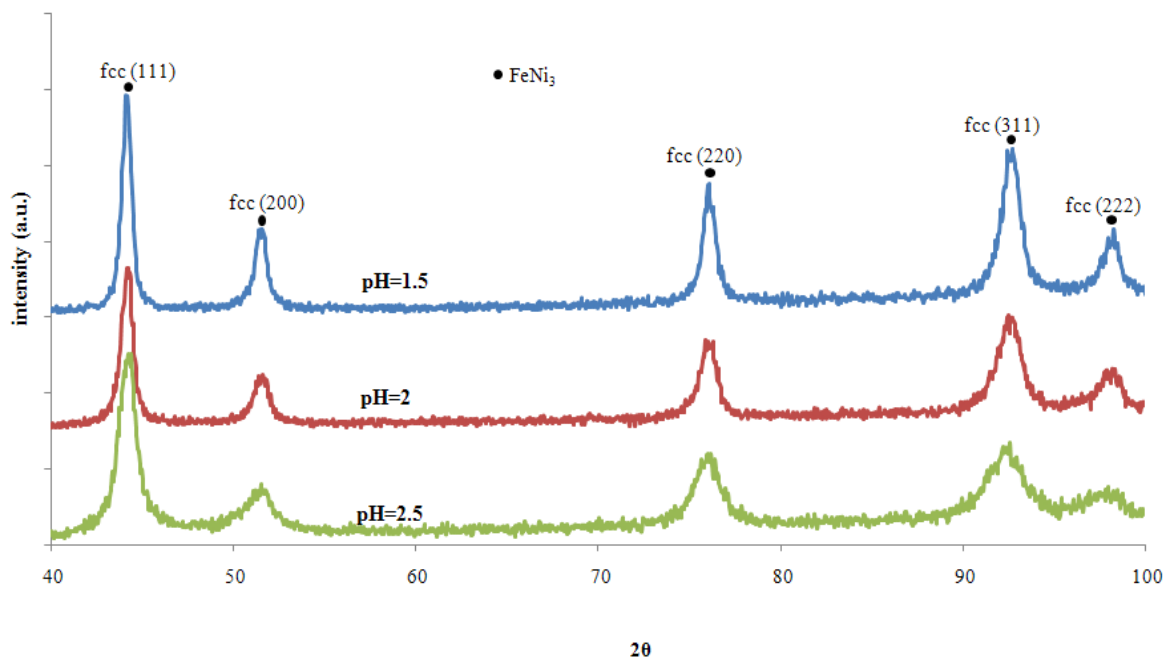
شکل (۴): اثر چگالی جریان بر ترکیب محصولات رسوب الکتریکی با جریان مستقیم و  $\text{pH}=1/5$



شکل (۵): اثر چگالی جریان بر نسبت Ni/Fe محصولات رسوب الکتریکی با جریان مستقیم و  $\text{pH}=1/5$

پیک‌های بلندتر در الگوی پراش نمونه حاصل در  $\text{pH}=1/5$  نشانگر این مطلب است که میزان کریستالی شدن در این نمونه بیش‌ترین است. الگوی XRD نمونه‌های حاصل در  $\text{pH}$  های ۲ و  $2/5$  پیک‌های پهن‌تر و کوتاه‌تر و نمونه حاصل در  $\text{pH}=1/5$  دارای پیک‌های بلندتر و باریک‌تری نسبت به بقیه است. این مطلب نشان‌دهنده کوچک‌تر بودن اندازه دانه نمونه‌های حاصل از  $\text{pH}$  های ۲ و  $2/5$  است. در اثبات این نکته بر اساس فرمول شرر [۱۷] اندازه دانه این نمونه‌ها محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۳) ارائه گردیده است.

با توجه به این که در دمای اتاق آهن دارای ساختار bcc و نیکل fcc می‌باشد، و الگوی XRD نمونه‌های رسوب الکتریکی شده مطابق شکل (۶) ساختار fcc دارد، می‌توان دریافت آهن درون شبکه نیکل حل شده و آلیاژ آهن-نیکل حاصل شده است. نتایج آنالیز EDS (شکل (۱)) نشان می‌دهد که این نمونه‌ها دارای بیش از ۷۵ درصد نیکل می‌باشند. بعلاوه طبق شکل (۶) و بنابر گزارش صنعتی زاده و همکارانش [۱۶]، الگوی پراش این نمونه‌ها منطبق بر پیک‌های مربوط به ساختار fcc و نشانگر فاز منظم  $\text{FeNi}_3$  هستند.



شکل (۶): اثر pH بر الگوی XRD نمونه‌های رسوب الکتریکی شده به روش مستقیم در چگالی جریان ثابت  $50 \text{ mA/cm}^2$

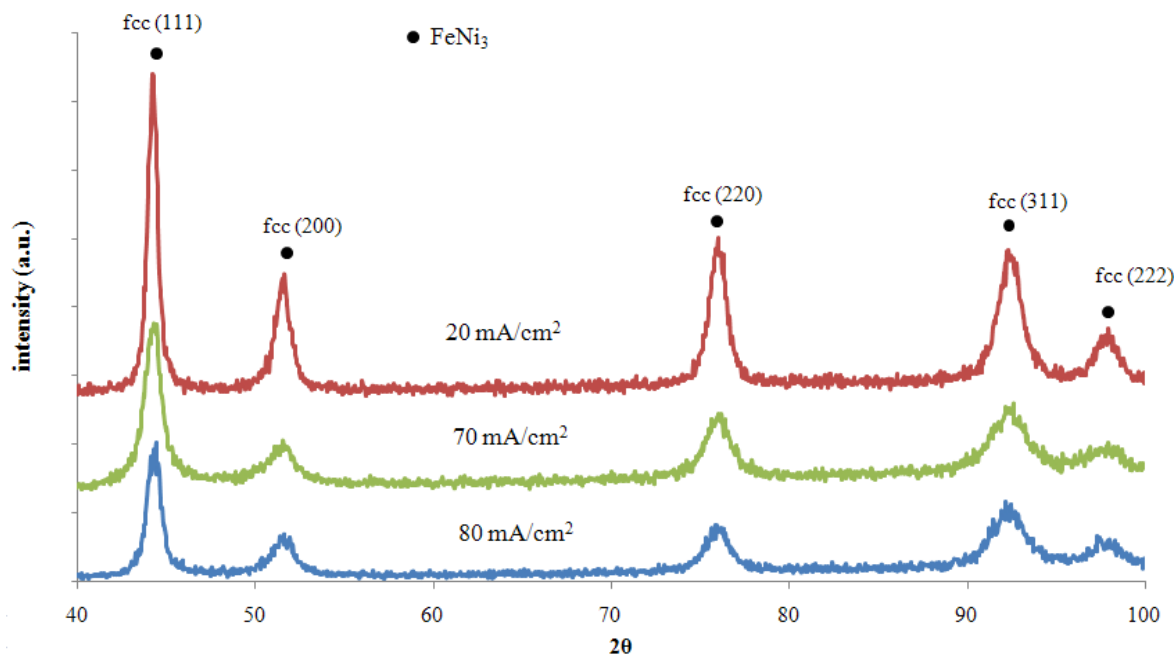
جدول (۳): اثر pH بر اندازه دانه نمونه‌های رسوب الکتریکی شده به روش مستقیم (محاسبه شده با فرمول شرر) در چگالی جریان ثابت  $50 \text{ mA/cm}^2$

pH		
۲/۵	۲	۱/۵
۱۲	۱۹	۲۵
اندازه دانه (nm)		

فرمول شرر اثبات شد که در چگالی جریان  $70 \text{ mA/cm}^2$  محصولی با اندازه دانه کوچک‌تر حاصل شده است. اندازه دانه این رسوبات با استفاده از فرمول شرر در محدوده ۱۲ تا ۲۶ نانومتر بدست آمد. در بیان علت روند تغییر اندازه دانه می‌توان بیان کرد که در چگالی جریان‌های ۲۰ تا  $70 \text{ mA/cm}^2$ ، غلظت زیاد یون‌ها در سطح کاتد باعث افزایش جوانه‌زنی می‌شود و ساختار را ریزدانه‌تر می‌کند که مطابق با گزارش زمانزاده و همکارانش [۱۹] می‌باشد. اما افزایش چگالی جریان بیش از این مقدار، نفوذ سطحی یون‌های جذب شده را افزایش می‌دهد و سیلان آن‌ها به سمت مکان‌های فعال رشد را تسهیل می‌کند. بنابراین رشد دانه تشدید می‌گردد که این روند در گزارش حسنی و همکارانش [۲۰] نیز ارائه شده است.

در توجیه این روند می‌توان گفت با افزایش pH، فرایند احیای هیدروژن تضعیف شده و اندازه دانه کاهش می‌یابد. زیرا تحول هیدروژن در سطح کاتد منجر به تغییر فصل مشترک رشد شده و این تغییر فرایند رشد و انرژی سطحی اندازه دانه را افزایش می‌دهد [۱۸].

همانطور که در پراش پرتو ایکس نمونه‌های رسوب الکتریکی شده (شکل (۷)) دیده می‌شود با تغییر چگالی جریان در pH ثابت ۱/۵، تغییری در ترکیب فازی محصول اتفاق نمی‌افتد ولی پهن شدگی و میزان صاف و باریک بودن پیک‌ها تغییر می‌کند. به طوری که در چگالی جریان‌های ۲۰ و  $80 \text{ mA/cm}^2$  پیک‌ها بلندتر و باریک‌تر و در چگالی جریان  $70 \text{ mA/cm}^2$  پیک‌ها کوتاه‌تر و پهن‌تر هستند. این مطلب در جدول (۴) و با استفاده از



شکل (۷): اثر چگالی جریان بر الگوی XRD نمونه‌های رسوب الکتریکی شده به روش مستقیم در pH ثابت ۱/۵

جدول (۴): اثر چگالی جریان بر اندازه دانه (محاسبه شده با فرمول شرر) برای نمونه‌های حاصل در pH ثابت ۱/۵ در رسوب‌دهی الکتریکی به روش مستقیم

چگالی جریان ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )		
۸۰	۷۰	۲۰
اندازه دانه (nm)		
۲۰	۱۲	۲۶

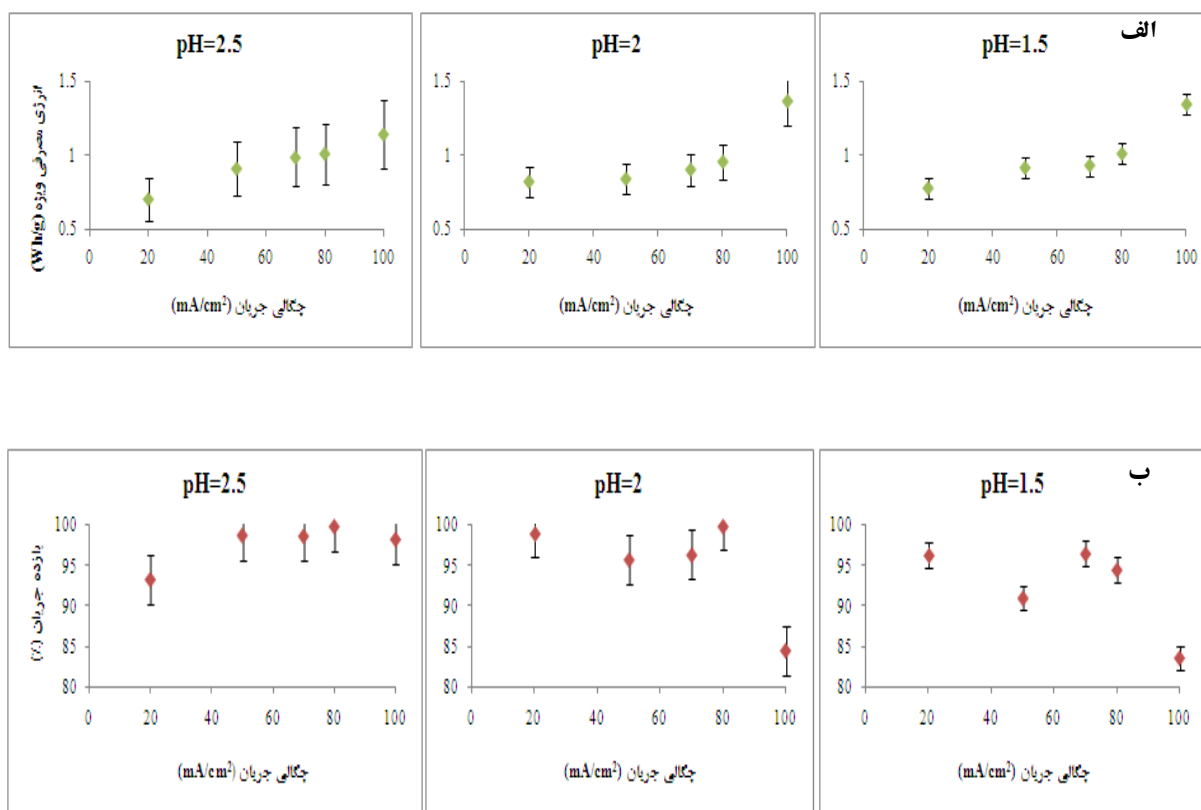
افزایش چگالی جریان نفوذ یون‌ها از بالک نیز افزایش خواهد داشت و به مرحله‌ای خواهد رسید که نرخ نفوذ زیاد می‌گردد. تحت این شرایط بازده زیاد است. اما هنگامی که چگالی جریان بیش‌تر افزایش یابد، یون‌های دیگری مثل  $\text{H}^+$  نیز همراه با یون‌های فلزی احیا و هیدروژن تشکیل می‌شود. این فرایند با صرف کسری از جریان بازده را کاهش خواهد داد. بعلاوه تولید هیدروژن از جذب ذرات به سطح فلز جلوگیری خواهد کرد که خود موجب کاهش بازده رسوب‌دهی فلز می‌شود [۲۲]. همانطور که در شکل (۸-الف) مشاهده می‌گردد در نقطه ماکزیم نمودار، تولید هیدروژن به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد و بعد از آن بازده کاهش می‌یابد. بعلاوه در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش pH، مقدار چگالی جریان برای ماکزیم بازده جریان نیز افزایش می‌یابد. شاید علت آن است

در شکل (۸-الف) ملاحظه می‌شود به طور کلی با افزایش pH، بازده جریان به مقدار کمی افزایش می‌یابد ولی بر انرژی مصرفی ویژه اثر چندانی ندارد. قابل ذکر است که در  $\text{pH}=2/5$ ، با افزایش چگالی جریان (۲۰ تا  $100 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ) بازده افزایش می‌یابد. صنعتی زاده و همکارانش [۱۱] به این نکته دست یافتند که با شروع فرایند رسوب‌دهی، احیای هیدروژن نیز رخ داده و pH حمام به طور موضعی افزایش می‌یابد. در این شرایط یون‌های فلزی با هیدروکسید واکنش داده و گونه‌های هیدروکسید فلزی ایجاد می‌شوند. این گونه‌های هیدروکسیدی که هیدروکسید آهن می‌باشند بر روی سطح جذب شده و به عنوان بازدارنده احیای هیدروژن عمل می‌کنند. در ادامه فرایند احیای هیدروژن به تعویق می‌افتد و در نتیجه احیای یون‌های فلزی آغاز می‌گردد. علاوه بر این در توجیه این مطلب ایده‌های چاندنر و همکارانش [۲۱] نیز در تحقیقات خود بیان کردند که با



الکترولیت فعال شده و در واکنش شرکت می کنند. بعلاوه افزایش احیای هیدروژن نیز موجب افزایش انرژی مصرفی ویژه می شود. در چگالی جریان  $100 \text{ mA/cm}^2$  به دلیل افزایش تولید هیدروژن، انرژی مصرفی ویژه ماکزیمم است. البته در pH های کم ( $\text{H}^+$  بیش تر)، میزان احیای هیدروژن بیش تر می باشد.

که با افزایش pH، میزان  $\text{H}^+$  و آزادسازی هیدروژن کاهش و بازده افزایش می یابد. افزایش چگالی جریان افزایش انرژی مصرفی ویژه را در پی دارد که در شکل (۸-ب) ارائه شده است. به این صورت که با افزایش چگالی جریان، مقدار بیش تری از یون های موجود در



شکل (۸): اثر چگالی جریان در pH های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ در رسوب دهی الکتریکی مستقیم بز: (الف): بازده جریان و (ب): انرژی مصرفی ویژه

۴- با افزایش pH در الکترولیت، نسبت نیکل به آهن افزایش و بازده جریان نیز افزایش یافت ولی تغییر آن بر انرژی مصرفی ویژه اثر چندانی نداشت.

۵- به طور کلی در فرایند رسوب الکتریکی آلیاژ Fe-Ni، در pH و چگالی جریان های کم و یا در pH و چگالی جریان های زیاد، بیشترین بازده جریان و کمترین انرژی مصرفی حاصل شد.

### ۵- نتیجه گیری

- ۱- در این تحقیق آلیاژ Fe-Ni با اندازه دانه نانو و دارای ساختار FCC تولید شد.
- ۲- مطابق با تحقیقات قبلی در تمامی این نمونه ها رسوب دهی غیرعادی مشاهده گردید.
- ۳- کمترین اندازه دانه در چگالی جریان  $50 \text{ mA/cm}^2$  و  $\text{pH}=1/5$  بدست آمد.

Practice of Metal Electrodeposition", spring, 2011.

- [10] L. A. M. Ruotolo & J. C. Gubulin, "Electrodeposition of Copper Ions on Fixed Bed Electrodes: Kinetic and Hydrodynamic Study", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 19, No. 1, 2002.

[۱۱] ا. صنعتی زاده، "تولید و مشخصه‌یابی آلیاژهای نانوکریستالی آهن-نیکل به روش رسوب دهی الکتریکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد-گرایش استخراج فلزات، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۷.

- [12] H. Dahms & I. M. Croll, "The Anomalous Codeposition of Iron-Nickel Alloys", Journal of the Electrochemical Society, Vol. 112, pp. 771-775, 1965.

- [13] X. Su & C. Qiang, "Influence of pH and Bath Composition on Properties of Ni-Fe Alloy Films Synthesized by Electrodeposition", Bull. Material Science, Vol. 35, pp. 183-189, April 2012.

- [14] M. Moniruzzaman & M. A. Islam, "Effects of Bath Composition and Current Density on the Electrodeposition of Fe-Ni Alloy on Copper Substrate and the Property of Deposited Alloy", Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research, Vol. 47, pp. 379-386, 2012.

- [15] J. Matulis & R. Slizys, "on Some Characteristics of Cathodic Processes in Nickel Electrodeposition", Electrochimica Acta, Vol. 9, pp. 1177-1188, 1964.

- [16] Sanaty-Zadeh, K. Raeissi & A. Saidi, "Magnetic Properties of Nanocrystalline Fe-Ni Alloys Synthesized by Direct and Pulse Electrodeposition", International Journal of Modern Physics B, Vol. 25, pp. 2031-2038, 2011.

- [17] B. D. Cullity, "Elements of X-Ray Diffraction", 2nd ed, Addison-Wesley Publishing Company, , pp. 284, 1978.

- [18] W. Lu, C. Ou, P. Huang, P. Yan & B. Yan, "Effect of pH on the Structural Properties of Electrodeposited Nanocrystalline FeCo Films", International Journal Electrochemical Science, Vol. 8, pp. 8218-8226, 2013.

۶- افزایش چگالی جریان افزایش انرژی مصرفی ویژه را در پی دارد. علت آن می‌تواند افزایش فعالیت یون‌های موجود در الکترولیت و افزایش احیای هیدروژن باشد.

## ۵- مراجع

- [1] H. Shokrollahi & K. Janghorban, "Soft Magnetic Composite Materials (SMCs)", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 189, pp. 1-12, 2007.

[۲] ک. سعیدی، "تولید و مشخصه‌یابی آلیاژ نانوساختار FeCo آلیایش یافته با نیویوم و کامپوزیت آن با ذرات WC به روش آلیاژسازی مکانیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.

- [3] M. F. Casula & A. Corrias, "Characterization of FeCoSiO Nano-Composite Films Prepared by Solgel Dip Coating", Chemistry of Materials, Vol. 15, No. 11, pp. 2201-07, 2003.

- [4] S. N. Srimathi, S. M. Mayanna & B. S. Sheshadri, "Electrodeposition of Binary Magnetic Alloys", Journal of Surface Technology, Vol. 16, pp. 277-322, 1982.

- [5] R. Abdel-Karim, Y. Reda, M. Muhammed, S. El-Raghy, M. Shoeib & H. Ahmed, "Electrodeposition and Characterization of Nanocrystalline Ni-Fe Alloys", Journal of Nanomaterials, Article ID 519274, 8 pages, 2011.

[۶] غ. حیدری، "خواص سایش و خوردگی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل-نانو کاربید کلسیم"، دهمین سمینار ملی مهندسی سطح، اصفهان، ۲۹ و ۳۰ اردیبهشت ماه ۱۳۸۸.

- [7] M. Schlesinger & M. Paunovic, "Modern electroplating", The Electrochemical Society Inc. pennington, NewJersy, 2001.

- [8] W. Lu, P. Huang, C. He & B. Yan, "Compositional and Structural Analysis of FeCo Films Electrodeposited at Different Temperatures", International Journal of Electrochemical Science, Vol. 7, pp. 12262-12269, 2012.

- [9] Y. D. Gamburg & G. Zangari, "Theory and

- 1412-1420, 2010.
- [22] V. C. Kieling, "Parameters Influencing the Electrodeposition of Ni-Fe Alloys", Surface and Coatings Technology, Vol. 96, pp. 135-139, 1997.
- ۶- پی نوشت**
- 
- [1] Coefficient of Thermal Expansion  
[2] Current Efficiency  
[3] Specific Energy Consumption
- [19] M. R. Zamanzade-Ghavidel, K. Raeissi & A. Saatchi, "Effect of Substrate Texture and Deposition Current Density on Properties of Ni Nanocrystalline Electrodeposits", Iranian Journal of Materials Science & Engineering, Vol. 9, 2012.
- [20] Sh. Hassani, K. Raeissi & M. A. Golzar, "Effects of Saccharin on the Electrodeposition of Ni-Co Nanocrystalline Coatings", Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 38, pp. 689- 694, 2008.
- [21] R. Idhayachander & K. Palanivelu, "Electrolytic Recovery of Nickel from Spent Electroless Nickel Bath Solution", E-Journal of Chemistry, Vol. 7, pp.