

# تأثیر فاصله الکترودها و پتانسیل الکتریکی اعمالی بر میزان رسوب نانو آلومینا در سوسپانسیون بر پایه اتانول

مصطفی میلانی<sup>۱</sup>، سید محمد زهرایی<sup>۲\*</sup>، سید محمد میر کاظمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۲- استادیار، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*عهده دار مکاتبات: smzahraee@irost.org

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰)

**چکیده:** سینتیک فرایند رسوب‌نشانی الکتروفوریتیک متأثر از عوامل مختلفی است که هاماکر آنها را در پنج پارامتر غلظت سوسپانسیون، میدان الکتریکی دو سوی سوسپانسیون، مساحت سطح الکترودها، تحرک الکتروفوریتیک ذرات و نهایتاً زمان فرایند خلاصه کرده است. میدان الکتریکی دو سوی سوسپانسیون را می‌توان با استفاده از تغییر پتانسیل الکتریکی اعمالی و تغییر فاصله الکترودها تغییر داد. از آنجایی که سوسپانسیون حاوی ذرات جامد یک مقاومت غیر اهمی است تغییر این دو پارامتر یکسان نخواهد بود. تغییر میدان الکتریکی با استفاده از هر یک از این دو پارامتر سبب می‌شود معادلات سینتیکی حاکم تغییر کند. در فواصل زیاد الکترودها و پتانسیل‌های الکتریکی ضعیف، معادلات سینتیکی مبتنی بر مقاومت الکتریکی دقت بیشتری دارند. در صورتی که در میدان‌های قوی و فواصل کم معادلات مبتنی بر هدایت و جریان الکتریکی عبوری از مدار دقیق‌تر هستند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد در میدان الکتریکی  $70\text{V/cm}$  رابطه فراری و همکاران و در میدان الکتریکی  $25\text{V/cm}$  معادله سارکار و نیکلسون با اختلافی به ترتیب کمتر از  $0/1$  و کمتر از  $0/1$  نتایج آزمایش را بهتر پیش‌بینی کردند.

## واژه‌های کلیدی:

رسوب نشانی الکتروفوریتیک، معادلات سینتیکی، نانو ذرات آلومینا، میدان الکتریکی.

## ۱- مقدمه

روش‌های بر پایه دوغاب‌ها، این فرایند زمانی به یک پوشش یکنواخت و با سطح صاف می‌رسد که دوغاب بسیار همگن باشد. سرعت ذرات در این فرایند به اندازه و شکل ذرات بستگی نداشته و تابعی از بار الکتریکی سطحی ذرات است که میدان الکتریکی اعمالی آن را کنترل می‌کند [۵]. لذا با تغییر شدت میدان الکتریکی در سوسپانسیون سرعت ذرات نیز تغییر می‌کند. کاهش میدان الکتریکی می‌تواند ناشی از کاهش اندازه پتانسیل الکتریکی اعمالی، افزایش فاصله بین الکترودها و افزایش ضخامت رسوب

رسوب الکتروفوریتیک فرایندی است که در آن با استفاده از یک سوسپانسیون حاوی ذرات باردار می‌توان پوشش‌هایی به ضخامت چند ده نانومتر تا چندین میلی‌متر را به سرعت بر روی زیرلایه‌های مختلف ایجاد کرد [۱-۲]. همچنین فرایند به گونه‌ای است که به راحتی می‌توان اشکال پیچیده را به وسیله آن تولید کرد [۳]. در حال حاضر بیشتر فرایندهای الکتروفوریتیک در حلال‌های غیر آبی انجام می‌شود زیرا آب به دلیل هیدرولیز در حضور جریان الکتریکی مشکلاتی را در این زمینه بوجود می‌آورد [۴]. شبیه

سارکار و نیکلسون این رابطه را به صورت  $k = 1/\tau$  بیان کردند و  $\tau$  را زمان ویژه فرایند نامیدند که به صورت زیر بیان می شود [۹].

$$\tau = \frac{V}{f\mu AE} \quad (2)$$

که  $(w_0)$  (g) وزن اولیه ذرات جامد در سوسپانسیون،  $(A)$  (cm<sup>2</sup>) مساحت سطح الکتروود،  $(F/m)$  ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ) گذردهی محیط مایع،  $(\zeta)$  (mV) پتانسیل زتای ذرات در دوغاب،  $(V)$  (E) پتانسیل الکتريکی اعمالی،  $(\Delta E)$  افت پتانسیل الکتريکی در امتداد لایه رسوب کرده،  $(V)$  (m<sup>3</sup>) حجم سوسپانسیون،  $(\eta)$  (mPa.s) ویسکوزیته سوسپانسیون،  $f$  ضریب تاثیر سارکار و نیکلسون و  $(\mu)$  (cm<sup>2</sup>/V.s) تحرک ذرات داخل سوسپانسیون است. آنها همچنین نشان دادند که در شرایط پتانسیل الکتريکی ثابت می توان  $k$  را به صورت  $kI_N$  نرماله کرد که  $I$  جریان الکتريکی عبوری از سل الکتروود فورتیک در هر لحظه است [۹]، در این مقاله از این رابطه با عنوان رابطه اصلاح شده ژانگ و همکاران نام برده خواهد شد. در تلاش های بعدی سارکار و نیکلسون رابطه زیر را بر اساس افت پتانسیل الکتريکی در حین فرایند الکتروود فورتیک بیان کردند [۹].

$$R'w + (R'w_0 + d) \cdot \ln \left( 1 - \frac{w}{w_0} \right) + k'Et = 0 \quad (3)$$

که:

$$R' = \frac{R_d - R_s}{R_s C_d A} = \frac{\Lambda_s - \Lambda_d}{C_d \Lambda_d A} = \frac{R_r - 1}{C_d A}, \quad (4)$$

$$k' = \frac{f\mu A}{V}, R_r = \frac{R_d}{R_s}$$

که  $R$  ( $\Omega$ ) نشان دهنده مقاومت الکتريکی و  $\Lambda$  هدایت الکتريکی است که برای رسوب با  $d$  و برای سوسپانسیون با  $s$  مشخص شده است.  $R_r$  در محاسبات آنها بین ۱ تا ۱۰ فرض شده است.  $C_d$  (g/cm<sup>3</sup>) دانسیته است که برای رسوب با  $d$  نشان داده شده است. بقیه پارامترها مشابه روابط قبلی است.

باشد. فرایند رسوب الکتروود فورتیک یک فرایند با زمان کوتاه است و در همین زمان کوتاه تغییرات الکتريکی مدار معادل بسیار شدید خواهد بود.

شار ذراتی که به سمت یک الکتروود حرکت می کنند را می توان با تغییر میدان الکتريکی، غلظت ذرات، تغییر پتانسیل زتای ذرات و تغییر خواص الکتريکی حامل تغییر داد [۶]. میدان های الکتريکی استفاده شده در این فرایند از چند V/cm تا چند صد V/cm می رسد که عموماً توسط یک منبع تغذیه DC انجام می شود. این تنوع در پارامترهای تاثیرگذار سبب می شود بتوان انواع خواص مورد نظر را از پوشش ایجاد شده بدست آورد.

دو رابطه مهم در توضیح میزان وزن رسوب بوجود آمده در فرایند الکتروود فورتیک مطرح است. اولین رابطه بر اساس اندازه گیری ها و مدل سازی هاماکر<sup>۱</sup> بیان شده است [۷]. دومین مدل را نیز اولین بار اوگوستینگ<sup>۲</sup> بیان کرده است [۸]. هرچند بیان هاماکر در طول سال ها بارها مورد بازبینی قرار گرفته اما اساس همه این بازبینی ها بر این اساس است که وزن رسوب نهایی تابعی از تحرک الکتروود فورتیک، میدان الکتريکی اعمالی، مساحت سطح الکتروود و غلظت سوسپانسیون است. در برخی از برداشتها یک فاکتور  $f$  نیز به رابطه وارد می شود [۹] چراکه همه ذرات رسیده به الکتروود نمی توانند در رسوب شرکت کنند. بیان اوگوستینگ نیز مربوط به الکتروودی استوانه ای به شعاع  $a$  است که توسط الکتروود کانتری با شعاع  $b$  (که  $b > a$ ) در بر گرفته شده است و سوسپانسیون بین این دو استوانه قرار دارد. به دلیل هندسه خاص این مدل، کاربردهای آن بسیار محدود می باشد.

چهار بیان اصلی از رابطه هاماکر وجود دارد. اولین بیان توسط ژانگ و همکارانش ارائه شده است که در آن وزن رسوب نهایی تابعی نمایی از وزن پودر اولیه و میدان الکتريکی اعمالی است [۱۰].

$$w = w_0 (1 - e^{-kt}), \quad (1)$$

$$k = \frac{A \varepsilon \zeta}{V 4\pi\eta} (E - \Delta E)$$

با استفاده از نانو ذرات آلومینا با ساختار کوراندوم و میانگین اندازه ذرات ۸۰ نانومتر ( $d_{50} = 80\text{nm}$ ) و اتانول با خلوص ۹۹/۹٪ سوسپانسیونی با نسبت وزنی ۱۵g/100ml تهیه شد. برای کمک به پراکنده سازی و باردار شدن ذرات از ید، نمک های منیزیم، ایتیریم و لانتانیم (با فرمول کلی  $\text{MCl}_x \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ) استفاده شد که به میزان (به ترتیب) ۴۰۰، ۳۰۰، ۴۵۰ و ۲۰۰ واحد به ازای میلیون واحد آلومینا به صورت هم زمان به سوسپانسیون اضافه شدند. این افزودنی ها سبب می شوند سطح نانو ذرات آلومینا بار منفی پیدا کرده و رسوب بر روی کاتد شکل بگیرد. افزودنی ها ده دقیقه قبل از اضافه کردن پودر آلومینا به اتانول اضافه شدند محلول حاصل به خوبی بر روی استیرر هم زده شد. بعد از اضافه کردن آلومینا سوسپانسیون ۱۲ دقیقه اولتراسونیک شد و سپس ۹۰ دقیقه هم زده شد تا یکنواختی لازم بوجود آید. عملیات اولتراسونیک به صورت سیکل های ۲:۱۰ انجام گرفت که ۲ زمان روشن بودن و ۱۰ زمان خاموش بودن پراب در نظر گرفته شد.

۸۰ میلی لیتر از سوسپانسیون حاصل (معادل ۱۲ گرم آلومینا) در محفظه ای از جنس تفلون قرار داده شد و با استفاده از الکترودهایی از جنس تیتانیوم و فولاد زنگ نزن، پتانسیل الکتریکی به دو سوی آن اعمال گردید. مساحت الکترودهای مورد استفاده ۸۷۵ میلی متر مربع بود و فاصله بین آنها ۱ و ۲ سانتی متر انتخاب شد. پتانسیل الکتریکی اعمالی به وسیله یک منبع تغذیه DC اعمال گردید و جریان الکتریکی عبوری از مدار با فواصل زمانی ۰/۵ ثانیه با استفاده از یک آمپر متر متصل به کامپیوتر ثبت شد. جدول (۱) شرایط آزمون های مختلف را نشان می دهد. الکترودها قبل از هر بار استفاده به ترتیب با استفاده از اسید نیتریک یک مولار، آب یون زدایی شده و استون شسته شدند تا سطحی کاملاً تمیز داشته باشند.

وزن الکترودها نیز با استفاده از یک ترازوی بسیار دقیق ساخت شرکت Sartorius مدل ED224S در هر ۰/۲ ثانیه ثبت گردید. برای این کار الکترودها به کیت دانسیته مدل YDK01LP متصل گردید و در سوسپانسیون معلق شد. هدایت الکتریکی سوسپانسیون با استفاده از هدایت سنج ساخت شرکت Martini ده

در نهایت فراری و همکاران رابطه زیر را بین هدایت الکتریکی اولیه سوسپانسیون ( $\Lambda_{s,0}$ )، هدایت الکتریکی محیط مایع (بدون ذرات جامد) ( $\Lambda_1$ ) و وزن رسوب بیان کرده اند [۱۱].

$$\frac{\Lambda_1}{\Lambda_{s,0}} \left( 1 + \frac{w_0}{w_0 - w} \right) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (5)$$

$$\tau = \frac{V\Lambda_{s,0}}{f\mu I}$$

و  $I$  شدت جریان الکتریکی عبوری از مدار است. باقی متغیرها شبیه روابط قبلی است. این معادله در مورد شرایط جریان ثابت الکتریکی صادق است و با حل عددی آن در این شرایط  $f\mu$  قابل بیان است. با توجه به فرضیات فراری و همکاران این رابطه را می توان به صورت زیر نیز بازنویسی کرد.

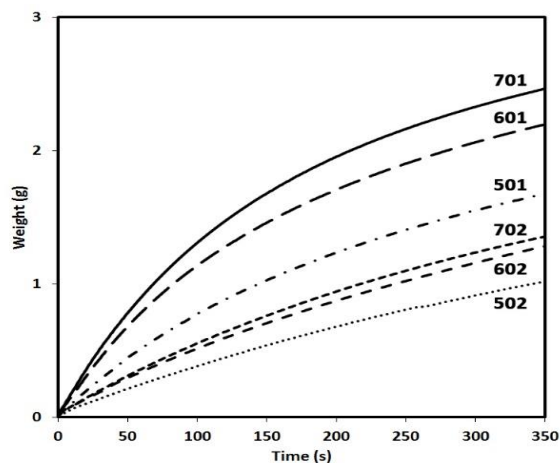
$$\ln\left(1 - \frac{w}{w_0}\right) = -\ln\left(1 + \frac{\Lambda_{s,0}}{\Lambda_1} \left(\exp\left(\frac{-t}{\tau'}\right) - 1\right)\right) \quad (6)$$

که این رابطه با عنوان رابطه اصلاح شده فراری و همکاران در شرایط پتانسیل الکتریکی ثابت شناخته می شود.  $\tau'$  مانند (۵) تعریف می شود به شرطی که جریان از آن حذف شده باشد. از آنجایی که شدت میدان یک پارامتر تاثیر گذار در سرعت و شار ذرات در این فرایند است، این پارامتر در یک سوسپانسیون اتانولی از ذرات آلومینا مورد بررسی قرار گرفته است و تغییر آن از دو مسیر مختلف یعنی تغییر پتانسیل الکتریکی اعمالی و تغییر فاصله بین الکترودها مد نظر قرار گرفته است تا بتوان تغییرات سینتیک این فرایند را در حین این تغییرات بررسی کرد و به بهترین معادله سینتیکی برای توصیف وزن رسوب در حین زمان دست پیدا کرد.

آلومینا به دلیل خواص بسیار خوب در دماهای بالا به عنوان یک اکسید محافظ بر روی فلزات مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

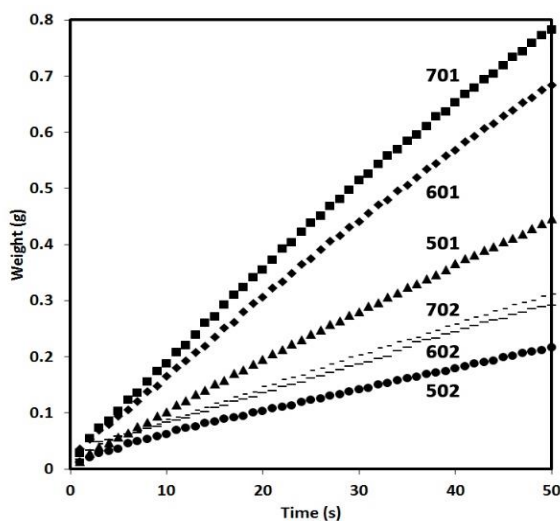
## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

ثانیه انجام نشد زیرا تغییرات وزن الکترودها بعد از این زمان ناچیز بود.



شکل (۱): وزن رسوب در ۳۵۰ ثانیه، در شش آزمایش مختلف

شکل (۲) تغییرات وزن رسوب در ۵۰ ثانیه اول فرایند را نشان می‌دهد. هرچند در نمونه ۵۰۲ انحراف از حالت خطی بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی است اما در رابطه با نمونه ۷۰۱ به طور واضحی رابطه غیر خطی است. پس می‌توان گفت ارتباط بین زمان رسوب و وزن رسوب در رابطه هاماکر متاثر از میدان الکتریکی اعمالی است و در میدان‌های الکتریکی بالا (یا وزن رسوب‌های تشکیل شده بالا) حتی در زمان‌های اولیه فرایند نیز نمی‌توان این رابطه را خطی فرض کرد.



شکل (۲): وزن رسوب در ۵۰ ثانیه اول، در شش آزمایش مختلف

دقیقه قبل از شروع فرایند و بلافاصله بعد از اتمام فرایند اندازه‌گیری شد. برای حل عددی معادلات از نرم‌افزار Microsoft Excel 2013 با افزونه Data Solver و روش حداقل مربعات استفاده شد.

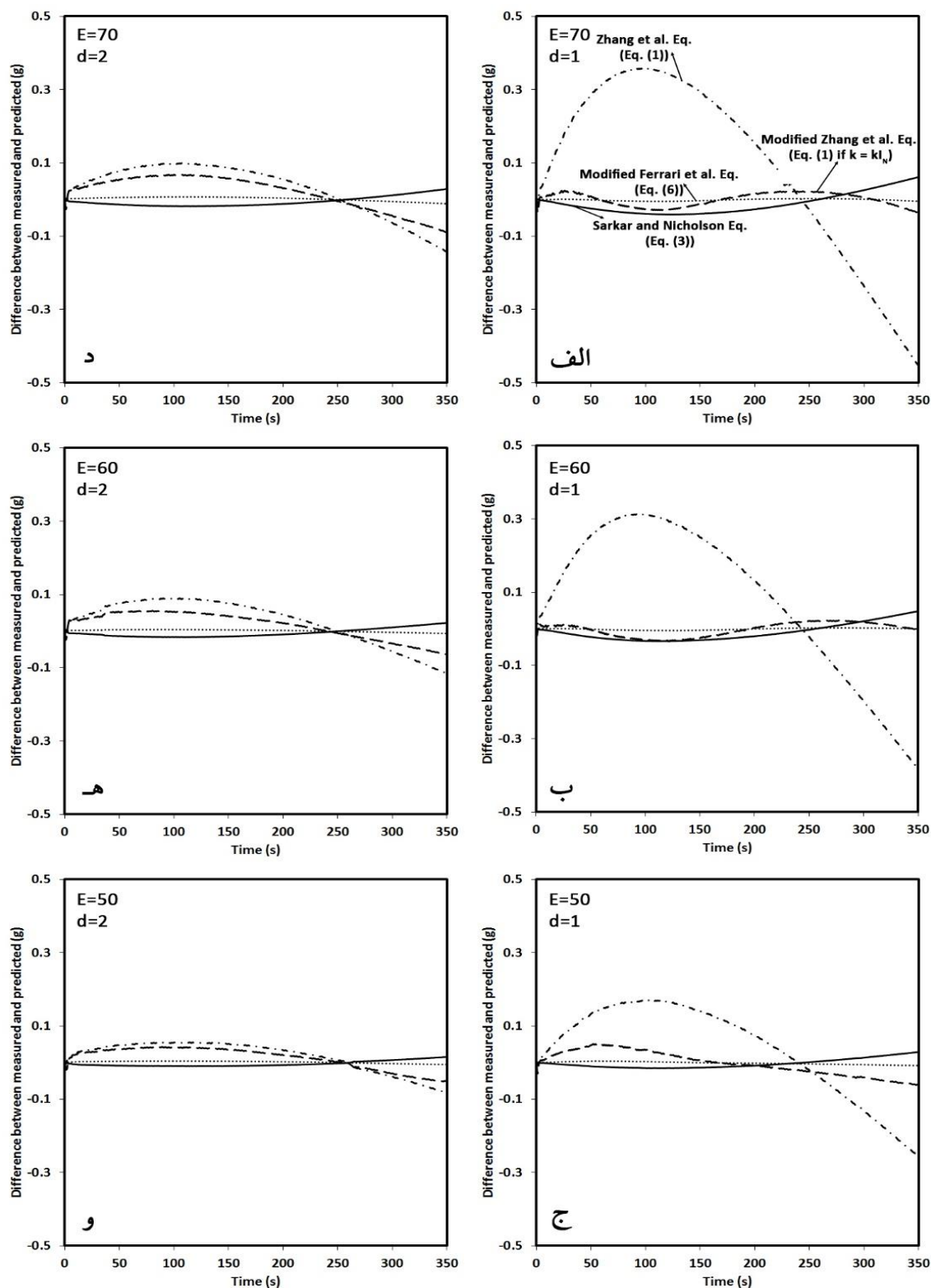
جدول (۱): شماره نمونه به همراه پتانسیل الکتریکی اعمالی و فاصله بین

الکترودها

کد تست	پتانسیل الکتریکی (ولت)	فاصله (سانتی‌متر)
۷۰۲	۷۰	۲
۷۰۱	۷۰	۱
۶۰۲	۶۰	۲
۶۰۱	۶۰	۱
۵۰۲	۵۰	۲
۵۰۱	۵۰	۱

### ۳- نتایج و بحث

از آنجایی که بررسی سینتیک فرایند الکتروفوریتیک به وزن رسوب تشکیل شده بستگی دارد، نمودار تغییرات وزن رسوب نسبت به زمان فرایند در شکل (۱) نشان داده شده است. در نمونه ۷۰۱ تغییرات وزن نسبت به زمان از همان زمان‌های ابتدایی فرایند از حالت خطی منحرف می‌شود. انحراف از حالت خطی در نمونه‌های مختلف حتی در نمونه ۵۰۲ که کمترین میزان رسوب را دارد نیز دیده شده است. همچنین ترتیب تغییرات وزن نمونه‌های مختلف به طور مستقیم به میدان الکتریکی اعمالی وابسته است و با بزرگ شدن شدت میدان الکتریکی وزن رسوب در همه زمان‌ها بیشتر می‌شود که نشان می‌دهد ارتباط وزن رسوب و میدان الکتریکی اعمالی که در رابطه هاماکر بیان شد [۷] در این آزمایش‌ها نیز تایید می‌شود، اما این رابطه خطی نیست. نویسندگان زیادی رابطه هاماکر را به زمان‌های اولیه فرایند رسوب محدود کرده‌اند [۹، ۱۳-۱۵]. برای بررسی این موضوع تغییرات وزن در ۵۰ ثانیه اول فرایند رسم شد. زمان ۵۰ ثانیه به این دلیل انتخاب شد که بعد از این زمان شدت جریان الکتریکی عبوری از مدار به شدت دچار تغییر می‌شود. همچنین فرایند رسوب بیشتر از ۳۵۰



شکل (۳): نتایج انطباق مقادیر وزن رسوب بدست آمده با نتایج پیش‌بینی‌های انجام شده توسط روابط ژانگ و همکاران، رابطه اصلاح شده ژانگ و همکاران، سارکار و نیکلسون و اصلاح شده فراری و همکاران: (الف): نمونه ۷۰۱، (ب): نمونه ۷۰۲، (ج): نمونه ۶۰۲، (د): نمونه ۶۰۲، (ه): نمونه ۵۰۱ و (و): نمونه ۵۰۲، بر اساس اطلاعات ۳۵۰ ثانیه اول

دارند و در آنها با کاهش شدت میدان الکتریکی در فاصله ۲ سانتی‌متر رابطه ژانگ و همکاران اختلاف کمتری با مقادیر حاصل از آزمایش دارد. در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که رابطه ژانگ و همکاران در شدت میدان‌های الکتریکی کمتر ( $25\text{V/cm}$ ) نسبت به همکاران ( $70\text{V/cm}$ ) عملکرد بهتری دارد. در مقاله ژانگ و همکاران نیز از مقادیر میدان الکتریکی در حدود  $8\text{ V/cm}$  تا  $80\text{ V/cm}$  استفاده شده است که سبب افت پتانسیل الکتریکی در حدود ۸٪ شده است [۱۰]. از آنجایی که نتایج آزمایش ژانگ و همکاران [۱۶] با نتایج حاصل از رابطه‌ای که آنها بیان کرده‌اند مطابقت داشت سارکار و نیکلسون به بررسی دلیل آن پرداختند [۱۷]. در این بررسی مشخص شد که به علت رقیق بودن سوسپانسیون مورد آزمایش قرار گرفته توسط این محققین و همچنین میزان کم رسوب تشکیل شده (۲٪ از مقدار پودر اولیه) تغییرات در شرایط سوسپانسیون و مدار الکتریکی حاصل بسیار جزئی است و لذا این رابطه توانسته است با نتایج حاصل از آزمایش مطابقت داشته باشد. در نتایج آزمایش‌های مقاله حاضر هم با ایجاد یک سوسپانسیون غلیظ و همچنین رسوب دادن نسبت زیادی از پودر اولیه، رابطه ژانگ دچار انحراف از مقادیر تئوری شده است.

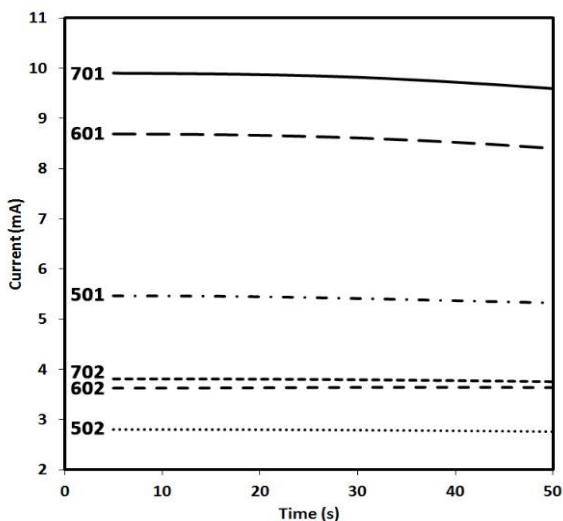
با توجه به این مشاهدات، برای بررسی دقیق‌تر سینتیک فرایند چهار رابطه دیگر از روابط سینتیکی ارائه شده در فرایند الکتروفوریتیک در نظر گرفته شد. بر این اساس، در روابط ژانگ و همکاران و همچنین رابطه بهینه شده آن که توسط سارکار و نیکلسون ارائه شد، مقدار وزن تعیین شده در رابطه با مقدار وزن تعیین شده از فرایند آزمایش مقایسه شد و اختلاف این دو مقدار رسم گردید. اما در دو رابطه فراری و همکاران و رابطه مقاومتی سارکار و نیکلسون که امکان تعیین دقیق وزن از طریق رابطه وجود نداشت به این صورت عمل شد که وزن حاصل از آزمایش در رابطه قرار داده شد و حاصل رابطه (که در حالت تئوری باید صفر باشد) محاسبه گردید. این عدد بر اساس زمان در نمودار رسم شد. شکل (۳) نتایج پیش‌بینی‌های رابطه‌های چهارگانه، در پتانسیل‌های الکتریکی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ ولت و فواصل ۱ و ۲ سانتی‌متر را بر اساس اطلاعات کل فرایند، نشان می‌دهد. در پتانسیل‌های پایین‌تر از این مقدار، رسوب چسبندگی لازم را نداشته و از الکتروود جدا می‌شد. در پتانسیل‌های بالاتر نیز اتانول به شدت تبخیر شده و بر روی سطح رسوب ایجاد حباب می‌کرد. از شکل الف تا ج با کاهش شدت میدان الکتریکی در یک فاصله الکتروود ثابت (۱ سانتی‌متر)، تقریب ژانگ و همکاران به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شده است. همچنین شکل‌های د تا و نیز وضعیت مشابه

جدول (۲): نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در حین آزمایش در ۶ آزمایش مختلف

وزن نهایی رسوب (g)	اسیدیته (O.pH)	جریان الکتریکی (mA)			هدایت الکتریکی سوسپانسیون ( $\mu\text{S/cm}$ )			کد تست
		اختلاف	نهایی	اولیه	اختلاف	نهایی	اولیه	
۱/۳۵	۷/۱۷	۱/۰۶	۳/۲۸	۴/۳۴	۱/۱۶	۱۰/۸۰	۹/۶۴	۷۰۲
۲/۴۶	۷/۲۸	۶/۳۰	۴/۹۹	۱۱/۲۹	۲/۲۵	۱۱/۶۹	۹/۴۴	۷۰۱
۱/۲۸	۷/۳۴	۱/۰۱	۳/۱۳	۴/۱۴	۱/۲۰	۱۰/۵۰	۹/۳۰	۶۰۲
۲/۲۰	۷/۰۶	۵/۶۷	۴/۲۸	۹/۹۵	۱/۹۶	۱۱/۳۹	۹/۴۳	۶۰۱
۱/۰۲	۶/۸۷	۰/۶۹	۲/۵۱	۳/۲۰	۱/۱۵	۱۰/۵۸	۹/۴۳	۵۰۲
۱/۶۹	۷/۰۸	۲/۵۸	۳/۶۶	۶/۲۴	۱/۲۶	۱۰/۷۰	۹/۴۴	۵۰۱

نمونه ۵۰۲ هم این وزن تا ۱/۰۲ گرم بود که به ترتیب ۲۰ و ۸/۵ درصد میزان پودر اولیه است. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش

پودر اولیه در سوسپانسیون ۱۲ گرم بوده که در نمونه ۷۰۱ بعد از ۳۵۰ ثانیه وزن رسوب به ۲/۴۶ گرم رسیده است (جدول (۲)). در

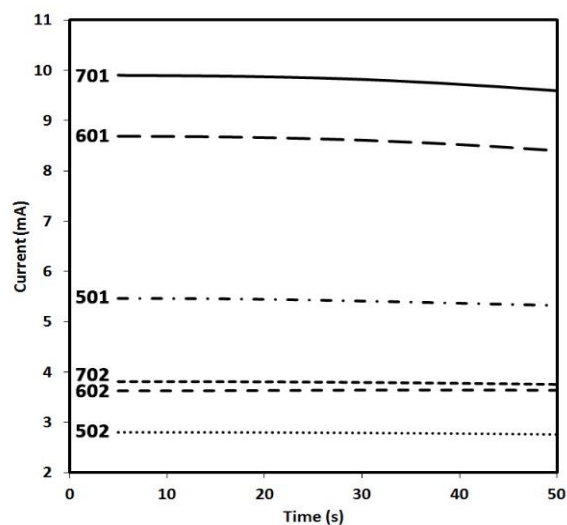


شکل (۴): جریان الکتریکی عبوری از مدار در ۵۰ ثانیه اول در شش آزمایش مختلف

نمونه قابل توجه غیر خطی بودن میزان تغییرات در ۶ نمونه است. در واقع با نصف شدن میدان الکتریکی (به عنوان مثال از  $70 \text{ V/cm}$  به  $35 \text{ V/cm}$ ) جریان الکتریکی اولیه نصف نشده است. همچنین جریان الکتریکی عبوری در نمونه‌های ۶۰ ولت بین دو نمونه ۷۰ و ۵۰ ولت (در هر دو فاصله ۱ و ۲ سانتی‌متر) نیست. در رابطه اصلاحی سارکار و نیکلسون بر روی رابطه ژانگ و همکاران، کاهش غلظت سوسپانسیون که در رابطه ژانگ در نظر گرفته شد و تغییرات مقاومت الکتریکی مدار (که جریان الکتریکی به عنوان نماینده‌ای از آن معرفی شده است و در اصلاح سارکار و نیکلسون در نظر گرفته شده است) در این رابطه مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹]، اما تغییرات هدایت الکتریکی سوسپانسیون در اثر خروج مقداری از پودر، که رابطه‌ای غیر خطی با غلظت دارد (به دلیل غیر اهمی بودن سوسپانسیون‌ها) می‌تواند سبب این انحراف شده باشد [۱۸]. همچنین تفاوت بین جریان الکتریکی در نمونه‌های مختلف نشان دهنده غیر اهمی بودن مقاومت الکتریکی سوسپانسیون است. اگر سوسپانسیون اهمی بود باید بین میدان الکتریکی و جریان الکتریکی رابطه خطی برقرار می‌شد [۱۹]. بنابراین رابطه بین جریان الکتریکی عبوری در دو زمان ۵ و ۳۵۰ ثانیه با میدان الکتریکی اعمالی، در شکل (۵) بررسی گردید.

میدان الکتریکی به دلیل افزایش میزان رسوب نمی‌توان از رابطه ژانگ انتظار پیش بینی دقیق نتایج را داشت. با اصلاحاتی که سارکار و نیکلسون بر روی رابطه ژانگ انجام دادند جریان الکتریکی عبوری از مدار را نیز مورد توجه قرار دادند [۹]. با در نظر گرفتن این اصلاحات نتایج حاصل رسم گردید. همانطور که در شکل (۳) مشخص است میزان اختلاف‌ها بسیار کاهش یافته است اما این کاهش نسبی بین دو رابطه در شدت‌های کمتر میدان‌های الکتریکی، کمتر است. پس رابطه اصلاح شده ژانگ و همکاران در میدان‌های الکتریکی ضعیف شرایطی مشابه با رابطه ژانگ دارد.

دلیل این موضوع را می‌توان به جریان الکتریکی کم عبوری از مدار در میدان‌های الکتریکی ضعیف نسبت داد.

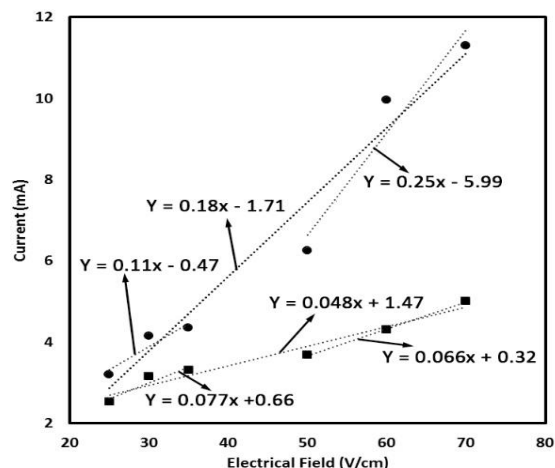


شکل (۴) جریان الکتریکی عبوری از مدار را در ۵۰ ثانیه اول فرایند رسوب نشان می‌دهد. جریان الکتریکی عبوری در نمونه ۷۰۱ در ابتدای فرایند ۱۱/۲۹ میلی‌آمپر است اما این جریان الکتریکی در نمونه ۵۰۲ به ۳/۲۰ میلی‌آمپر کاهش یافته است. لذا ضریب تأثیر جریان الکتریکی که رابطه‌ای نمایی با وزن رسوب دارد در این دو حالت، به عنوان بیشینه و کمینه جریان‌های عبوری، به شدت متفاوت است. سایر نمونه‌ها نیز شرایطی بین این دو نمونه دارند.

باشد. در این حالت  $Sf\mu/V$  محاسبه شده کوچکتر از مقدار واقعی است. با توجه به ثابت بودن دو مقدار مساحت سطح الکتروود و حجم سوسپانسیون می توان به این نتیجه رسید که  $f\mu$  محاسبه شده کوچکتر از مقدار واقعی است. در این حالت یا تحرک الکتروفوریتیک در آن زمان بیشتر از متوسط کل فرایند است یا  $f$ . در مورد حالت معکوس هم می توان به نتیجه ای مشابه رسید یعنی وقتی وزن واقعی کمتر از وزن تئوری است تحرک الکتروفوریتیک یا  $f$  در آن زمان کمتر از متوسط کل فرایند است. اگر موضوع مربوط به تحرک الکتروفوریتیک باشد، با این توضیحات، در ثانیه های اول در دو نمونه ۷۰۱ و ۶۰۱ تحرک الکتروفوریتیک بالاتر از مقدار متوسط است، سپس این مقدار کم شده و مجدداً زیاد می شود در نهایت نیز این مقدار کمتر از متوسط کل خواهد بود. در این دو نمونه میدان الکتریکی به شدت زیاد و فاصله بین الکتروودها نیز کم است. این حالت سبب اغتشاش زیاد در سوسپانسیون شده و همین موضوع سبب می شود تحرک الکتروفوریتیک به دلیل ایجاد نیروهای کشش شدید در سوسپانسیون از حالت تئوری فاصله بگیرد [۲۰]. نیروهای کشش نیروهایی هستند که اجازه حرکت تعادلی ذرات در سوسپانسیون را نداده و در اثر ویسکوزیته سوسپانسیون ها تغییر می کنند.

اگر موضوع مربوط به پارامتر  $f$  باشد، یعنی در ثانیه های اول «نسبتی از ذرات که به الکتروود می رسند و رسوب می کنند» (بنا بر توضیح سارکار و نیکلسون همه ذرات رسیده به الکتروود نمی توانند در تشکیل رسوب شرکت کنند) [۹] از متوسط کل فرایند بیشتر است. یعنی در ثانیه های اول رسوب بهتر تشکیل می شود که این موضوع هم می تواند به نیروی زیاد ایجاد شده در اثر تحرک الکتروفوریتیک بالا و میدان الکتریکی بالا در این زمان نسبت داده شود.

تقریباً دو نمودار در زمان هایی در حدود ۱۲۰ ثانیه تغییر می کند. در شکل (۶) نمودار جریان الکتریکی رسم شده است.



شکل (۵): رابطه بین جریان الکتریکی مدار و میدان الکتریکی در مدار الکتروفوریتیک در سوسپانسیون های مختلف، دایره مربوط به شرایط ابتدای فرایند (ثانیه ۵) و مربع مربوط به انتهای فرایند (۳۵۰ ثانیه). شیب و عرض از مبدأ خطوط برون یابی شده نشان داده شده است

در یک مقاومت الکتریکی اهمی شیب خط نشان دهنده مقاومت الکتریکی بوده و عرض از مبدأ خط باید صفر باشد. در این شکل مشخص است که اولاً همواره یک عرض از مبدأ وجود دارد که نشان می دهد سوسپانسیون نمی تواند یک مقاومت الکتریکی اهمی باشد و ثانیاً شیب خط دارای دو ویژگی اساسی است. اول اینکه در ابتدا و انتهای فرایند این شیب در تمام حالت ها تغییر کرده و دوم اینکه با تغییر فاصله الکتروود شیب خط از روند قبلی پیروی نمی کند یعنی نه تنها شدت میدان الکتریکی بلکه طول مقاومت الکتریکی هم در اندازه آن (اندازه مقاومت الکتریکی) تاثیرگذار است. همه این ویژگی ها نشان از غیر اهمی بودن مقاومت الکتریکی سوسپانسیون در این شرایط دارد [۱۸].

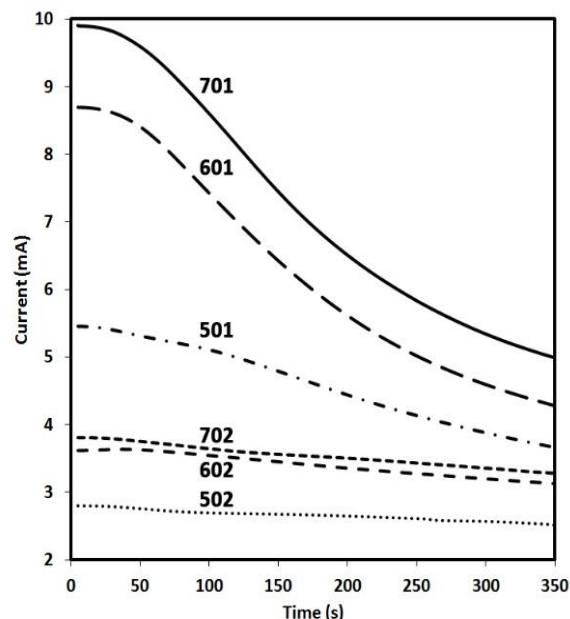
در شکل (۳) موضوع دیگری قابل توجه است. در رابطه اصلاح شده ژانگ و همکاران در شکل الف و ب دو مقدار بیشینه دیده می شود (نمودار خط چین). با کمتر شدن شدت میدان الکتریکی (شکل ج و به همین ترتیب تا و) این دو بیشینه از بین رفته است. از نظر تئوری این رفتار بیانگر این است که پیش بینی ها در این رابطه در دو فاصله زمانی بیشتر و در دو فاصله زمانی کمتر از مقادیر واقعی است. زمانی وزن واقعی بیشتر از وزن تئوری است که  $k$  در رابطه ژانگ و همکاران یا  $kI_N$  در رابطه اصلاح شده آن توسط سارکار و نیکلسون در حالت محاسبه شده کمتر از حالت واقعی



تئوری کمک کرده است. لذا مدل‌هایی که بر اساس تأثیر میدان الکتریکی و جریان الکتریکی (یا مقاومت و هدایت الکتریکی) بیان می‌شوند می‌توانند بهتر از مدل‌های دیگر نتایج را پیش‌بینی کنند.

برای بررسی بیشتر بین شش نمونه دو نمونه ۷۰۱ و ۵۰۲ انتخاب شد و پیش‌بینی‌ها بر اساس زمان ۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ ثانیه با مقادیر واقعی مقایسه شد. شکل (۸) رابطه ژانگ و همکاران را در این رابطه نشان می‌دهد. در نمونه ۵۰۲ (شکل ۸ ب) در ۵۰ ثانیه اول انطباق بین نتایج عملی و تئوری خوب است اما در نمونه ۷۰۱ از همان ابتدا اختلاف‌ها شدید است (بجز پیش‌بینی‌ای که بر اساس اطلاعات پنجاه ثانیه اول رسم شده است). در این شکل، ۱- نتایج پیش‌بینی وزن نهایی همیشه بیشتر از واقعیت است. ۲- وقتی شدت میدان الکتریکی بیشتر می‌شود اختلاف نیز بیشتر می‌شود. ۳- پیش‌بینی‌ها و واقعیت‌ها بر هم منطبق نیستند.

وقتی جریان الکتریکی وارد رابطه می‌شود (شکل ۹) تغییرات معکوس می‌شود یعنی در نمونه ۷۰۱ اختلاف‌ها کاهش می‌یابد و در نمونه ۵۰۲ اختلاف‌ها افزایش نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در نمونه ۷۰۱، ۱- همه پیش‌بینی‌ها بر هم منطبق هستند، ۲- اختلاف نهایی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی خیلی کم است، ۳- در ۱۰۰ ثانیه اول تقریباً می‌توان گفت نتایج بر هم منطبق هستند. اما در نمونه ۵۰۲، ۱- فواصل بین نمودارها خیلی بیشتر شده، ۲- انطباق بین پیش‌بینی‌های مختلف کمتر شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تنها موضوع مهم جریان الکتریکی نیست و شدت میدان الکتریکی هم یک پارامتر است که تغییرات خطی در روابط ایجاد نمی‌کند. پس تغییراتی مانند غلظت، هدایت الکتریکی و مقاومت الکتریکی پارامترهای تأثیر گذار دیگر هستند.



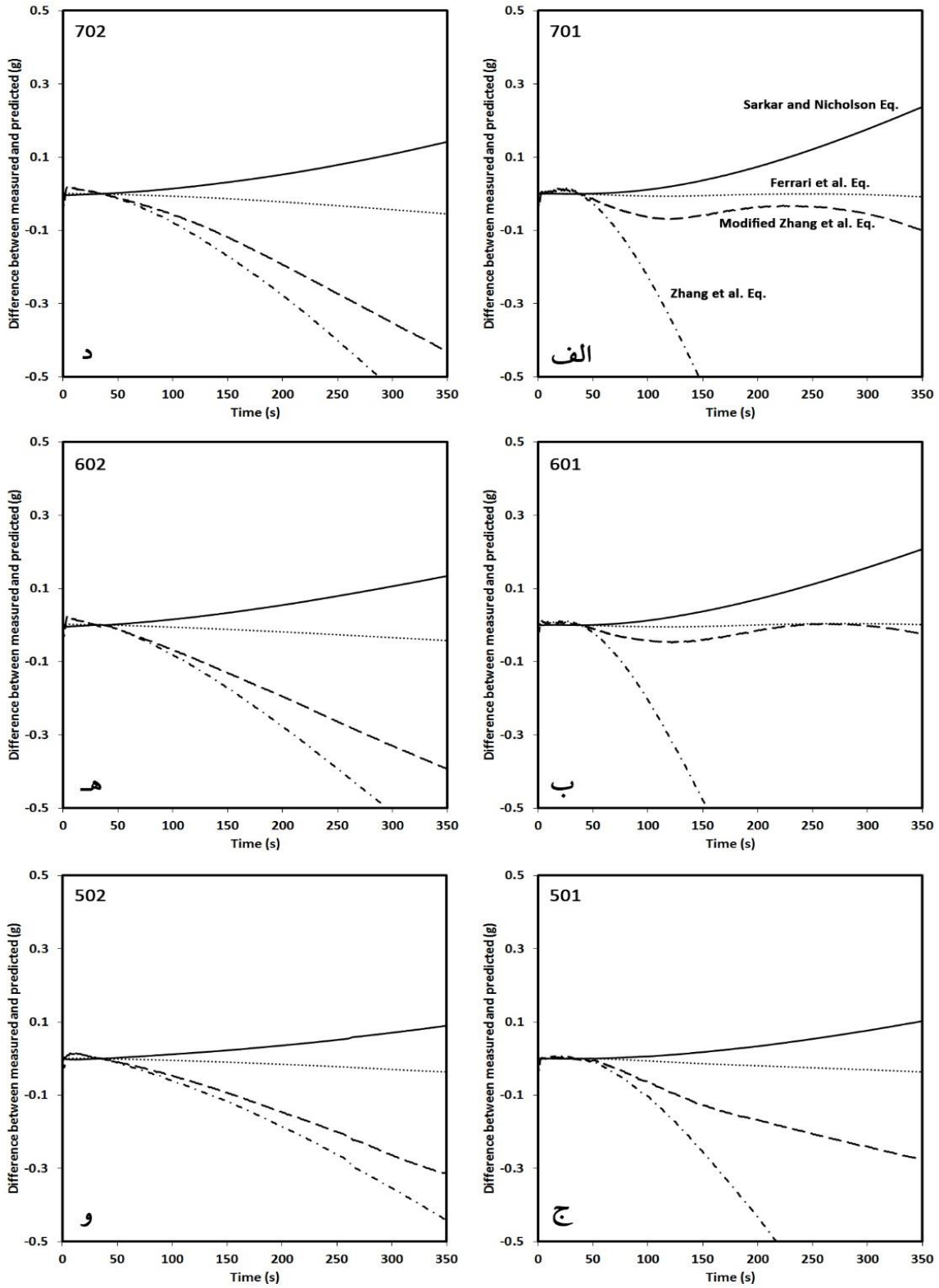
شکل (۶): جریان الکتریکی عبوری از مدار در ۳۵۰ ثانیه، در شش آزمایش مختلف

در دو نمونه ۷۰۱ و ۶۰۱ در زمانی حدود ۱۲۰ ثانیه تقعر نمودار جریان الکتریکی - زمان نیز تغییر کرده است. در حالی که در نمونه‌های ۵۰۱ تا ۵۰۲ این تغییر تقعر دیده نمی‌شود. لذا تغییر تقعر نمودار پیش‌بینی، به علت تغییر در تقعر جریان الکتریکی است. در نهایت می‌توان تأکید کرد که نمودار وزن رسوب بر اساس زمان رسوب حالت نمایی کامل ندارد و در قسمت‌هایی از این روند خارج می‌شود.

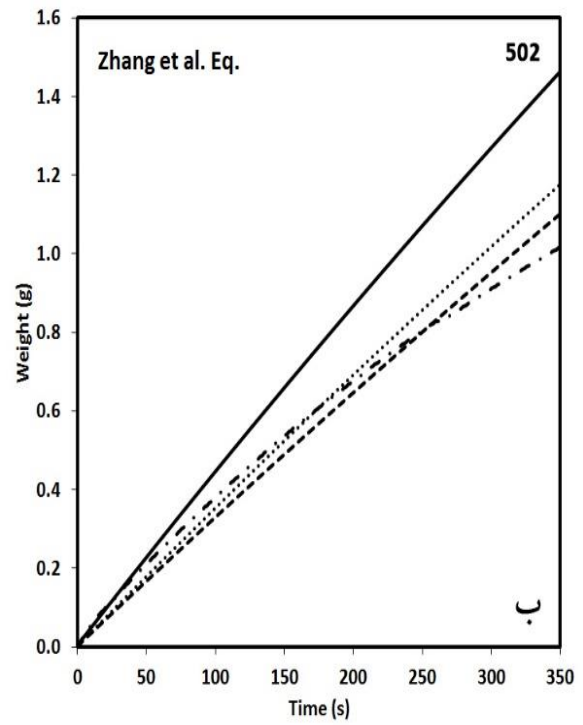
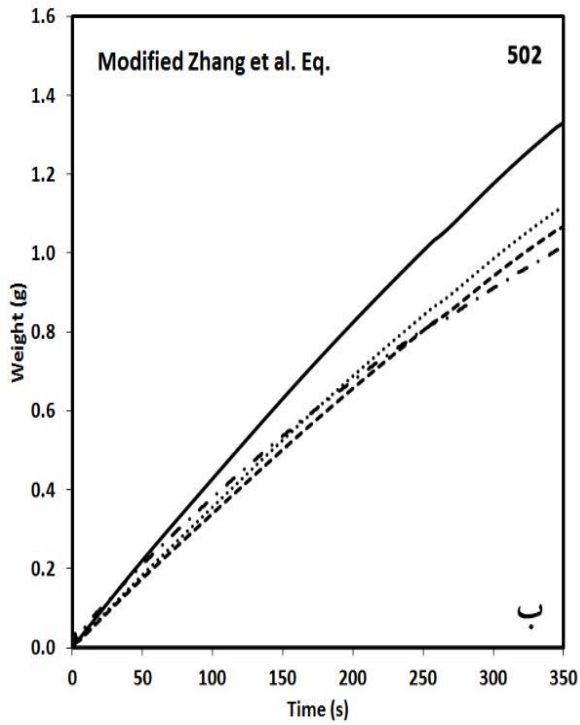
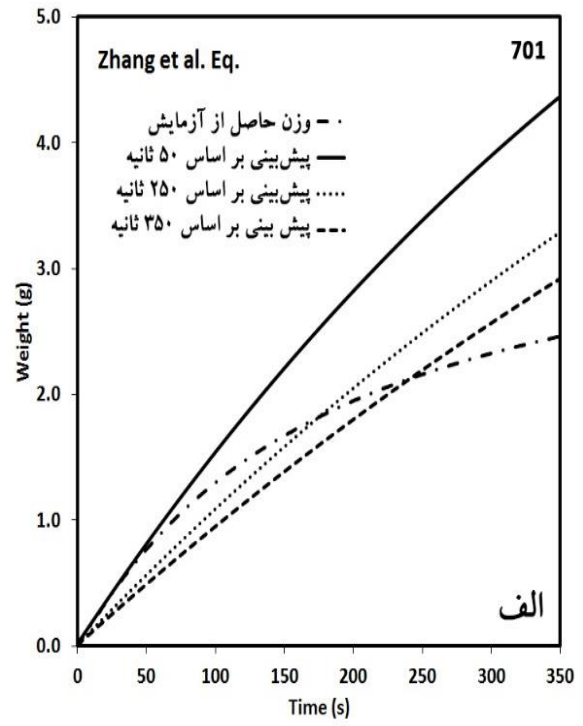
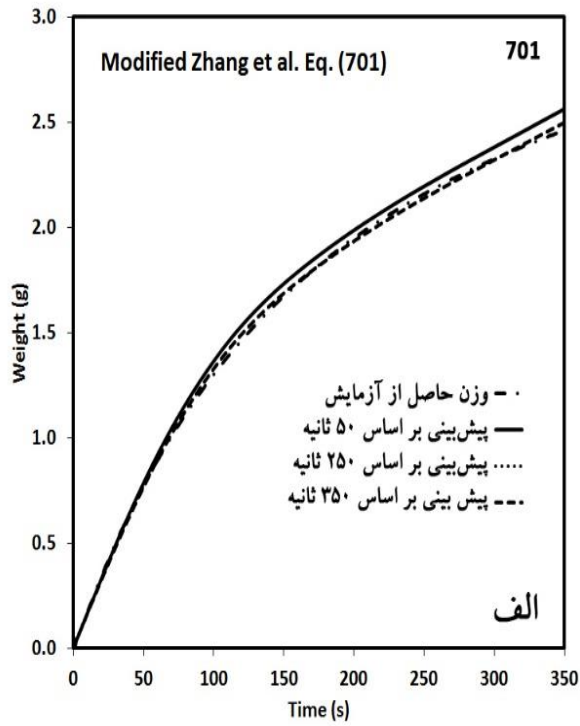
در شکل (۷) مشابه با شکل (۳)، پیش‌بینی‌ها بر اساس زمان ۵۰ ثانیه اول رسم گردید. در این نمودارها نیز تغییر تقعر دیده می‌شود اما مقادیر محاسبه شده تنها در ابتدای نمودار بیشتر از مقدار واقعی است و در نقاط بعدی هرچند به مقدار واقعی نزدیک می‌شود اما همواره از آن کمتر است. لذا مقادیر تحرک الکتروفوریتیک یا ضریب ذرات رسوب کرده به ذرات رسیده به الکتروود در زمان‌های بعد از ۵۰ ثانیه در حالت واقعی کمتر از متوسط ۵۰ ثانیه اول است. پس  $f_{\text{eff}}$  متأثر از زمان فرایند است که خود می‌تواند متأثر از غلظت، مقاومت الکتریکی و موارد دیگر باشد.

با مقایسه این دو نمودار می‌توان نتیجه گرفت که ورود پارامتر جریان الکتریکی به روابط، به انطباق بیشتر بین نتایج عملی و





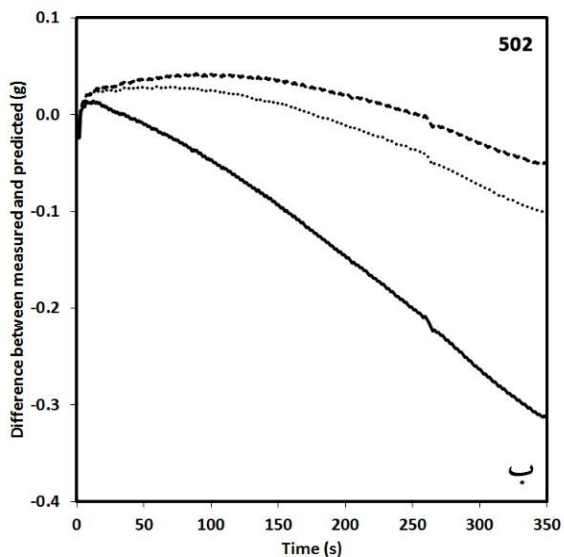
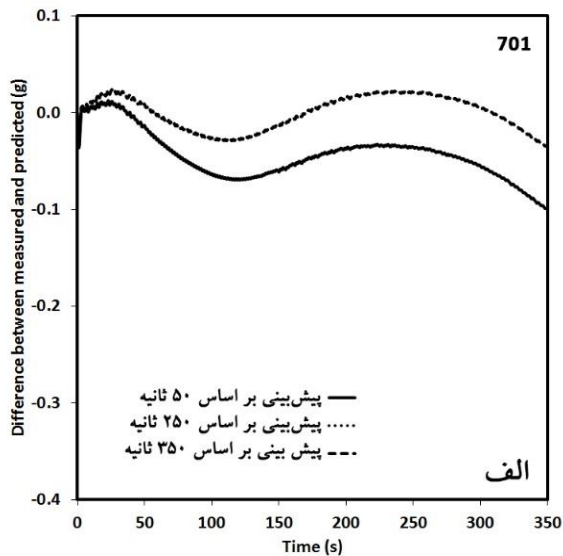
شکل (۷): نتایج انطباق مقادیر وزن رسوب بدست آمده با نتایج پیش‌بینی‌های انجام شده توسط روابط ژانگ و همکاران، رابطه اصلاح شده ژانگ و همکاران، سارکار و نیکلسون و اصلاح شده فراری و همکاران: (الف): نمونه ۷۰۱، (ب): نمونه ۷۰۲، (ج): نمونه ۶۰۱، (د): نمونه ۶۰۲، (ه): نمونه ۵۰۱ و (و): نمونه ۵۰۲، بر اساس اطلاعات ۵۰ ثانیه اول



شکل (۹): وزن رسوب (خط نقطه) در مقایسه با وزن پیش‌بینی شده در رابطه اصلاح شده ژانگ و همکاران، بر اساس اطلاعات ۵۰ (خط پر)، ۲۵۰ (نقطه چین) و ۳۵۰ (خط چین) ثانیه اول فرایند: (الف): در پتانسیل الکتریکی ۷۰ ولت و فاصله الکترود ۱ سانتی متر و (ب): در پتانسیل الکتریکی ۵۰ ولت و فاصله الکترود ۲ سانتی متر

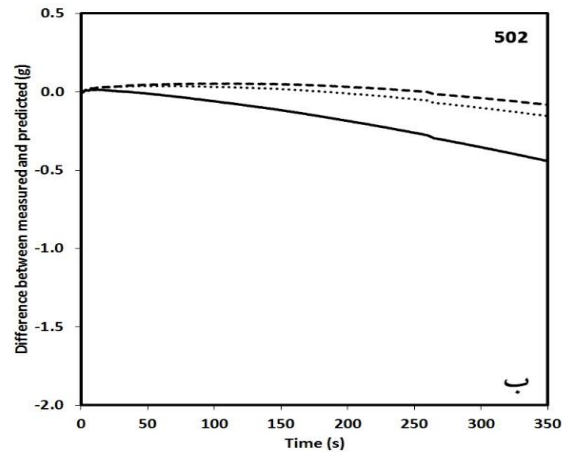
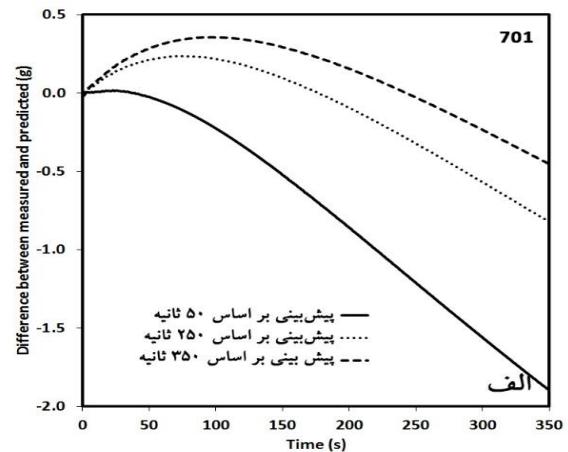
شکل (۸): وزن رسوب (خط نقطه) در مقایسه با وزن پیش‌بینی شده در رابطه ژانگ و همکارانش بر اساس اطلاعات ۵۰ (خط پر)، ۲۵۰ (نقطه چین) و ۳۵۰ (خط چین) ثانیه اول فرایند: (الف): در پتانسیل الکتریکی ۷۰ ولت و فاصله الکترود ۱ سانتی متر و (ب): در پتانسیل الکتریکی ۵۰ ولت و فاصله الکترود ۲ سانتی متر

در شکل (۳) دو نمودار دیگر هم دیده می‌شود. این دو نمودار عبارتند از نتایج حاصل از محاسبه رابطه سارکار و نیکلسون و فراری و همکاران، با قرار دادن مقادیر وزن بدست آمده در آزمایش‌ها در این روابط. در اینجا نیز اختلاف‌های بوجود آمده بسیار کمتر از دو رابطه اول است که البته این حالت در میدان‌های الکتریکی ضعیف‌تر بیشتر دیده می‌شود.



شکل (۱۱): اختلاف بین وزن رسوب و وزن پیش‌بینی شده در رابطه اصلاح شده ژانگ و همکاران، بر اساس اطلاعات ۵۰ (خط پر)، ۲۵۰ (نقطه چین) و ۳۵۰ (خط چین) ثانیه اول فرایند: (الف): در پتانسیل الکتریکی ۷۰ ولت و فاصله الکترودها ۱ سانتی‌متر و (ب): در پتانسیل الکتریکی ۵۰ ولت و فاصله الکترودها ۲ سانتی‌متر

شکل (۱۰) و شکل (۱۱) برای مشخص شدن بهتر اختلاف‌ها رسم شده است. بر اساس شکل (۱۰) الف اختلاف در پیش‌بینی بر اساس ۵۰ ثانیه اول تا میزان ۲ گرم رسیده است. در صورتی که در شکل ب این مقدار کمتر از ۰/۵ گرم است. در شکل (۱۱) این حالت متفاوت شده است اختلاف در قسمت الف بین ۰/۱ تا ۰/۱- است اما در قسمت ب این اختلاف تا ۰/۳- هم رسیده است. بر این اساس در همه پیش‌بینی‌ها (بر اساس زمان‌های ۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ ثانیه) رابطه ژانگ و همکاران در میدان‌های الکتریکی با شدت پایین عملکرد بهتری از اصلاح شده این رابطه دارد و رابطه اصلاح شده در میدان‌های الکتریکی با شدت کم با مشکلاتی روبرو است.



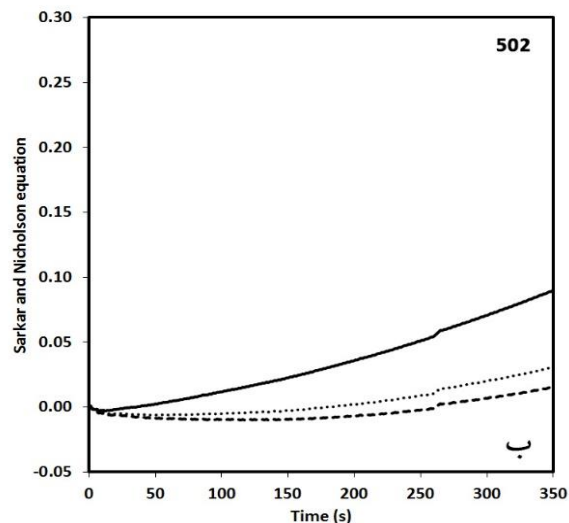
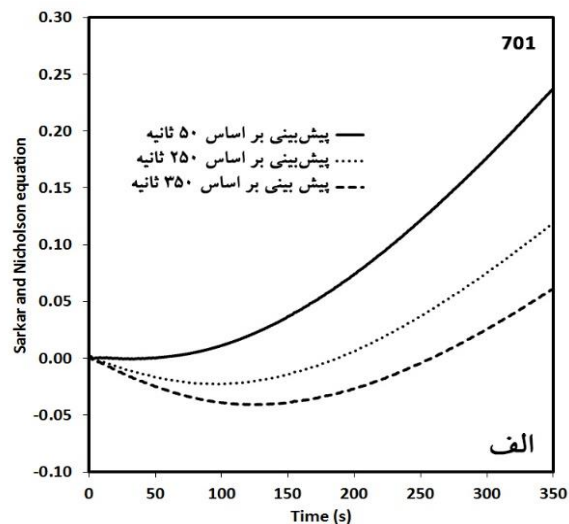
شکل (۱۰): اختلاف بین وزن رسوب و وزن پیش‌بینی شده در رابطه ژانگ و همکاران بر اساس اطلاعات ۵۰ (خط پر)، ۲۵۰ (نقطه چین) و ۳۵۰ (خط چین) ثانیه اول فرایند: (الف): در پتانسیل الکتریکی ۷۰ ولت و فاصله الکترودها ۱ سانتی‌متر و (ب): در پتانسیل الکتریکی ۵۰ ولت و فاصله الکترودها ۲ سانتی‌متر

ضعیف تر (شکل ب) این اختلاف کمتر شده و بیشترین اختلاف حدود ۰/۱ است. در میدان الکتریکی ایجاد شده در نمونه ۷۰۱ مقاومت الکتریکی سوسپانسیون و رسوب و غلظت به شدت تغییر می کند. با توجه به آنچه اشاره شد به دلیل اینکه در فرضیات سارکار و نیکلسون مقاومت های الکتریکی اهمی در نظر گرفته شده است [۹] و تغییرات مقاومت الکتریکی مدار به تغییر مقاومت الکتریکی رسوب نسبت داده شده است (که البته مقاومت الکتریکی آن نیز اهمی نیست) ایجاد این تغییرات شدید باعث شده رفتار رسوب در زمان های ابتدایی و انتهایی فرایند متفاوت باشد. لازم به ذکر است که در تحقیقات سارکار و نیکلسون زمان های زیر ۵۰۰ ثانیه به عنوان زمان های کوتاه شناخته شده و زمان های طولانی در حدود ۵۰۰۰ ثانیه است [۱۷]. اما کاملاً مشخص است که حتی در زمان ۳۵۰ ثانیه نیز شرایط رسوب و مقاومت مدار معادل الکتریکی متفاوت از زمان های اولیه است.

در شکل (۱۳) در میدان های الکتریکی قوی تر (شکل الف) انطباق برخلاف رابطه سارکار و نیکلسون بهتر از میدان های الکتریکی ضعیف تر (شکل ب) است. می توان گفت رابطه فراری و همکاران عملکرد بهتری در میدان های الکتریکی قوی تر دارد. چراکه هدایت الکتریکی سوسپانسیون که به عنوان مبنای در این رابطه استفاده شده است تغییرات شدیدی در طول فرایند ندارد (جدول (۲)) و مقادیر آن نیز به خوبی قابل اندازه گیری است و می تواند در رابطه وارد شود.

نکته دوم در این شکل ها انطباق خوب بین پیش بینی ها بر اساس زمان های مختلف است. به خصوص در شکل (۱۳) الف که دو حالت ۲۵۰ ثانیه و ۳۵۰ ثانیه بر هم منطبق شده اند. با مقایسه این شکل با شکل (۱۱) الف می توان به این نتیجه رسید که جریان الکتریکی نقش اساسی در انطباق نتایج روابط بر نتایج آزمایش دارد و نباید (مانند آنچه که فراری و همکاران انجام داده اند [۱۱]) و در اینجا اصلاح شده است) از معادلات حذف شود و یا معادل سازی گردد. در واقع میدان الکتریکی در رابطه هاماکر (E) بهتر است همواره به صورت  $I/\Lambda$  نوشته شود که I جریان الکتریکی عبوری از مدار و  $\Lambda$  هدایت الکتریکی مدار است.

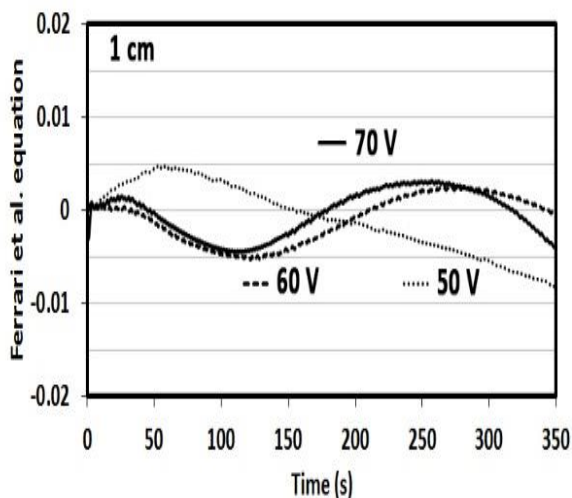
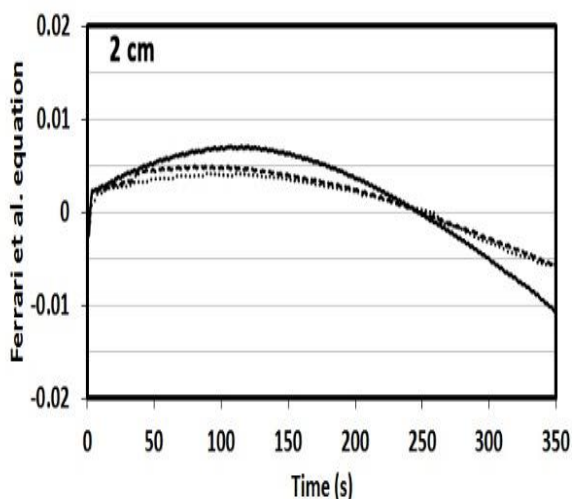
برای مشخص شدن رفتار در این دو حالت شکل (۱۲) نتایج محاسبات بر اساس رابطه سارکار و نیکلسون و شکل (۱۳) بر اساس رابطه فراری و همکاران را نشان می دهد.



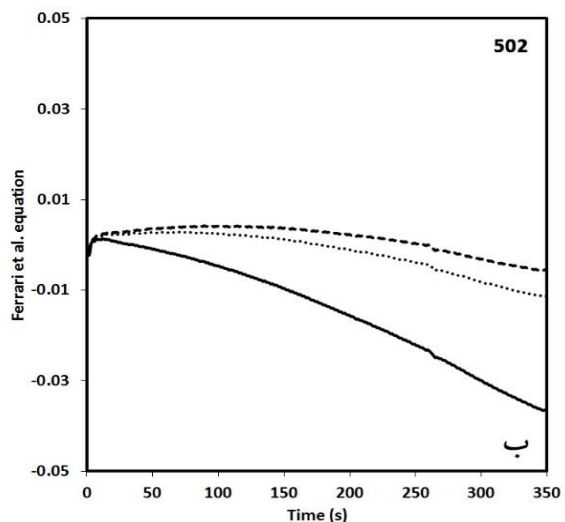
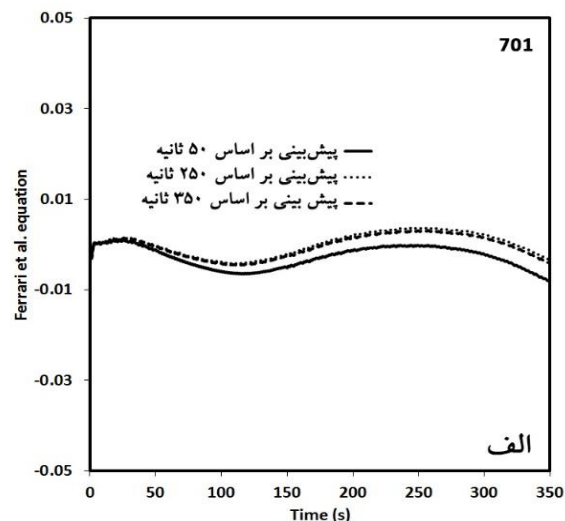
شکل (۱۲): نتایج محاسبه رابطه سارکار و نیکلسون با استفاده از ثوابت بدست آمده از اطلاعات ۵۰ (خط پر)، ۲۵۰ (نقطه چین) و ۳۵۰ (خط چین) ثانیه اول فرایند و قرار دادن وزن رسوب بدست آمده در آزمایش، در رابطه: (الف): در پتانسیل الکتریکی ۷۰ ولت و فاصله الکترود ۱ سانتی متر و (ب): در پتانسیل الکتریکی ۵۰ ولت و فاصله الکترود ۲ سانتی متر. در حالت تئوری مقادیر در تمام زمان ها باید صفر باشد

در رابطه سارکار و نیکلسون در میدان الکتریکی قوی تر (شکل الف) اختلاف ها تا ۰/۳ رسیده است اما در میدان های الکتریکی

همکاران در میدان‌های الکتریکی ضعیف‌تر عملکرد ضعیفی دارند و بنابراین در این دو رابطه شدت میدان الکتریکی نیز پارامتر مهمی است که باید در نظر گرفته شود. شدت میدان الکتریکی را می‌توان به دو روش تغییر داد. تغییر فاصله بین الکترودها و تغییر پتانسیل الکتریکی اعمالی. به منظور مقایسه این دو حالت شکل (۱۴) رسم گردید که در آن رابطه فراری در فواصل الکترودها ۱ و ۲ سانتی‌متر بین میدان‌های الکتریکی مختلف مقایسه شد.



شکل (۱۴): نتایج محاسبه رابطه اصلاح شده فراری و همکاران با استفاده از ثوابت بدست آمده از اطلاعات ۳۵۰ ثانیه اول فرایند و قرار دادن وزن رسوب بدست آمده در آزمایش، در رابطه، در فواصل ۱ و ۲ سانتی‌متر. الف، در پتانسیل الکتریکی ۷۰ (خط پر)، ۶۰ (خط چین) و ۵۰ (نقطه چین) ولت. در حالت تئوری مقادیر در تمام زمان‌ها باید صفر باشد



شکل (۱۳): نتایج محاسبه رابطه اصلاح شده فراری و همکاران، با استفاده از ثوابت بدست آمده از اطلاعات ۵۰ (خط پر)، ۲۵۰ (نقطه چین) و ۳۵۰ (خط چین) ثانیه اول فرایند و قرار دادن وزن رسوب بدست آمده در آزمایش، در رابطه: (الف): در پتانسیل الکتریکی ۷۰ ولت و فاصله الکترودها ۱ سانتی‌متر و (ب): در پتانسیل الکتریکی ۵۰ ولت و فاصله الکترودها ۲ سانتی‌متر، در حالت تئوری مقادیر در تمام زمان‌ها باید صفر باشد

در شکل (۱۳) (ب) اختلاف‌ها بیشتر از شکل (۱۳) (الف) است اما همچنان مقادیر کمتر از شکل (۱۲) (ب) است و رابطه اصلاح شده فراری و همکاران عملکرد بهتری از رابطه سارکار و نیکلسون داشته است.

با مقایسه شکل (۱۱) و شکل (۱۳) مشخص می‌شود که رابطه اصلاح شده ژانگ و همکاران و رابطه اصلاح شده فراری و



#### ۴- نتیجه گیری

شدت میدان الکتریکی و فاصله بین الکترودها در انطباق روابط سینتیکی بر نتایج آزمایش موثر هستند و نمی توان روابط سینتیکی را در تمام شرایط صادق دانست. در میدان های الکتریکی ضعیف روابطی که بر مبنای میزان انتقال جریان الکتریکی از مدار پایه گذاری شده اند می توانند نتایج را به خوبی پیش بینی کنند اما در میدان های الکتریکی قوی تر این روابط صحت خود را از دست می دهند.

در تمام میدان ها الکتریکی و فواصل الکترودها رابطه اصلاح شده فراری و همکاران می تواند نتایج حاصل از آزمایش ها را به خوبی پیش بینی نماید. لذا به نظر می رسد نوشتن رابطه هاماکر به صورت زیر صحیح تر می باشد.

$$w = \frac{C\mu AI}{\Lambda} t \quad (۸)$$

که C غلظت لحظه ای سوسپانسیون،  $\mu$  تحرک الکتروفورتیک، A مساحت سطح الکتروود، I جریان الکتریکی عبوری از مدار و  $\Lambda$  هدایت الکتریکی مدار است. بر این اساس رابطه فراری و همکاران ((۵)) با ایجاد اصلاحاتی می تواند برای شرایط پتانسیل الکتریکی ثابت نیز مورد استفاده قرار گیرد ((۷)).

#### ۵- مراجع

[1] P. Amrollahi, J. S. Krasinski, R. Vaidyanathan, L. Tayebi & D. Vashaee, "Electrophoretic Deposition (EPD): Fundamentals and Applications from Nano to Micro-Scale Structures", Springer International Publishing, pp. 1-27, 2015.

[۲] م.ج. هادیان، ع. عراقی، ط. طلائی و م. ثانی، "بررسی خواص پوشش با ساختار تغییرات تدریجی اکسید تیتانیوم/هیدروکسی اپتایت، اعمال شده به روش الکتروفورتیک بر روی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V"، فصلنامه فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۰ شماره ۲، صفحه ۱۵۳-۱۶۵، ۱۳۹۴.

[3] R. Clasen, "Preparation of High-Purity Glasses and Advanced Ceramics via EPD of Nanopowders",

در فاصله ۱ سانتی متر با کاهش شدت میدان الکتریکی عملکرد کمی تغییر کرده و اختلاف ها بیشتر شده است اما در فاصله ۲ سانتی متر با کاهش شدت میدان الکتریکی رابطه عملکرد بهتری دارد. همچنین عملکرد رابطه در فواصل کوتاه تر بهتر از فواصل بیشتر بین الکترودها است و اختلاف ها کمتر است. اگر میدان الکتریکی را به ترتیب ۷۰، ۶۰، ۵۰، ۳۵، ۳۰ و ۲۵V/cm در نظر گرفته شود بین دو مقدار ۶۰ و ۵۰ ولت بر سانتی متر شدت میدانی وجود دارد که در آن منحنی جریان الکتریکی (شکل (۶)) تغییر تقعر نداده و در نتیجه رابطه اصلاح شده فراری و همکاران نیز از حالت دو بیشینه ای به حالت یک بیشینه ای تغییر می کند. اگر میدان الکتریکی دو سوی سوسپانسیون در نظر گرفته شود، زمانی که مقاومت الکتریکی رسوب در حدی افزایش می یابد که می تواند شدت میدان الکتریکی دو سوی سوسپانسیون را به مقداری در این بازه کاهش دهد رفتار الکتریکی در دو نمونه ۷۰۱ و ۶۰۱ هم مشابه با نمونه های دیگر می شود.

اثر تغییر فاصله الکترودها را در شکل (۳) نیز می توان بررسی کرد. در این شکل نمودارهای مربوط به فاصله ۲ سانتی متر (د تا ه) دارای این ویژگی می باشند که محل تقاطع هر چهار رابطه در زمان حدود ۲۵۰ ثانیه است. یعنی این روابط در این زمان به یک مقدار پیش بینی می رسند. در حالی که در فاصله ۱ سانتی متر محل تقاطع محل ثابتی نیست و روابط سینتیکی مختلف در هیچ نقطه ای به طور هم زمان نتایج یکسانی در مورد میزان وزن رسوب بدست آمده ندارند. پس فاصله بین الکترودها یک پارامتر مهم در انطباق موثر روابط است و فقط تغییر شدت میدان الکتریکی (از طریق تغییر در پتانسیل الکتریکی) نمی تواند مد نظر قرار بگیرد.

در نهایت می توان به این نتیجه رسید که رابطه اصلاح شده فراری و همکاران ((۵)) با اضافه کردن پارامتر جریان الکتریکی نتایج حاصل از آزمایش را بهتر از روابط دیگر پیش بینی می کند. در این حالت معادله به صورت زیر بازنویسی خواهد شد.

$$\ln\left(1 - \frac{w}{w_0}\right) = -\ln\left(1 + \frac{\Lambda_{s,0}}{\Lambda_1} \left(\exp\left(\frac{-ti}{\tau'_{\infty}}\right) - 1\right)\right) \quad (۷)$$



- [13] Y. Hirata, A. Nishimoto & Y. Ishihara, "Forming of Alumina Powder by Electrophoretic Deposition", *Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi*, Vol. 99, pp. 108–113, 1991.
- [14] J. Ma & W. Cheng, "Electrophoretic Deposition of Lead Zirconate Titanate Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 85, pp. 1735–1737, 2004.
- [15] C. Baldisserrri, D. Gardini & C. Galassi, "An analysis of current transients during electrophoretic deposition (EPD) from colloidal TiO<sub>2</sub> suspensions", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 347, pp. 102–111, 2010.
- [16] Z. Zhang, Y. Huang & Z. Jiang, "Electrophoretic Deposition Forming of SiC-TZP Composites in a Nonaqueous Sol Media", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 77, pp. 1946–1949, 1994.
- [17] P. Sarkar & P. S. Nicholson, "Comments on "Electrophoretic Deposition Forming of SiC-TZP Composites in a Nonaqueous Sol Media", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 78, pp. 3165–3166, 1995.
- [18] H. Ohshima, "Electrical Conductivity of a Concentrated Suspension of Spherical Colloidal Particles", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 212, pp. 443–448, 1999.
- [19] Ohshima, "Electrical Conductivity of a Concentrated Suspension of Soft Particles", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 229, pp. 307–309, 2000.
- [20] Y. Liang, N. Hilal, P. Langston, V. Starov, "Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment", *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol. 134–135, pp. 151–166, 2007.
- [1] Hamaker
- [2] Avagustinik
- [4] Y. Sun, "Electrophoretic Deposition of Organic-Inorganic Nanocomposites", A Thesis for the Degree Master of Science, McMaster University, 2012.
- [5] M. J. Shane, J. B. Talbot, R. D. Schreiber, C. L. Ross, E. Sluzky & K. R. Hesse, "Electrophoretic Deposition of Phosphors: I. Conductivity and Zeta Potential Measurements", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 165, pp. 325–333, 1994.
- [6] P. M. Biesheuvel & H. Verweij, "Theory of Cast Formation in Electrophoretic Deposition", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, pp. 1451–1455, 1999.
- [7] H. C. Hamaker, "Formation of a deposit by electrophoresis", *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 35, pp. 279–287, 1940.
- [8] A. I. Avgustinik, V. S. Vigdergauz & G. I. Zhuravlev, "Electrophoretic deposition of ceramic masses from suspensions and calculation of deposit yields", *J Appl Chem USSR Engl Transl.*, Vol. 35, pp. 2090–2093, 1962.
- [9] P. Sarkar & P. S. Nicholson, "Electrophoretic Deposition (EPD): Mechanisms, Kinetics, and Application to Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 79, pp. 1987–2002, 1996.
- [10] Z. Zhang, Y. Huang & Z. Jiang, "Comment on 'Electrophoretic Deposition Forming of SiC-TZP Composites in a Nonaqueous Sol Media", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 78, pp. 3167–3168, 1995.
- [11] B. Ferrari, R. Moreno & J. A. Cuesta, "A Resistivity Model for Electrophoretic Deposition", *Key Eng. Mater.*, *Trans Tech Publ*, Vol. 314, pp. 175–180, 2006.

### ۶- پی نوشت

- [1] Hamaker
- [2] Avagustinik

[۱۲] س.ع. خسروی فرد، ا.ح. یقطین، ا. خبازی زاده و ع. عراقی، "بررسی خواص خوردگی سایشی و خوردگی داغ پوشش آلومینا اعمال شده بر روی پایه فولادی به روش پاشش حرارتی حاصل از سوخت اکسیژن‌دار"، فصلنامه فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۰ شماره ۱، صفحه ۵۹–۶۹، ۱۳۹۳.

## Influence of the electrode distance and applied electrical potential on deposition of Nano alumina in ethanol suspension

Mostafa Milani<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Zahraee<sup>2\*</sup>, Seyed Mohammad Mirkazemi<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Advanced Materials & Renewable Energies, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Advanced Materials & Renewable Energies, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\*Corresponding author: smzahraee@irost.org

---

### Abstract

The kinetics of electrophoretic deposition is influenced by various factors. Hamaker summarized them on five parameters such as suspension concentration, electric field on the suspension, the surface area of the electrodes, electrophoretic mobility, and the process time. The electric field in the suspension can be changed using the electric potential applied between the electrodes and electrode distance change. Since the suspensions is a non-ohmic resistance, these two parameters will not be the same. The change of electric field using each of these two parameters causes kinetic equations change. In long distances electrodes and poor electrical potential, kinetic equations are based on electrical resistance more accurately. In the strong fields and low electrode distance kinetic equations based on equivalent conductivity are more accurate. The results of this study showed that, in the electric field 70V/cm Ferrari et al. equation and in the electric field 25V/cm Sarkar and Nicholson equation have accuracy of less than 0.01 and less than 0.1, respectively.

### Keywords:

Electrophoretic deposition, Kinetic equations, Nano alumina, Electrical field.

---

Journal homepage: [ma.iaumajlesi.ac.ir](http://ma.iaumajlesi.ac.ir)

### Please cite this article using:

Mostafa Milani, Seyed Mohammad Zahraee, Seyed Mohammad Mirkazemi, Influence of the electrode distance and applied electrical potential on deposition of Nano alumina in ethanol suspension, in Persian, New Process in Material Engineering, 2018, 12(1), 121-137.