

تولید میکرو صفحه‌های پلیمری توسط سامانه ریسندگی الکتروسانتریفیوژ

افسانه ولی پوری^۱، سپیده فدایی^۱، راضیه فرهادی^۱، مه‌رمان افراشی^۱، سید عبدالکریم حسینی راوندی

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

ذرات پلیمری در حوزه‌های مختلفی نظیر شیمی، بیولوژی و فیزیک کاربرد دارند و متعاقباً نیاز به پوشش دهی سطوح مختلف توسط این ذرات برای دستیابی به یک فیلم نازک در بسیاری از کاربردها وجود دارد. روش‌های متعددی برای تولید میکروذرات تا کنون ارائه شده است؛ اما اکثراً دارای عیوبی از قبیل بازده محصور سازی پایین یا دشواری در جداسازی ذرات از فاز آبی می‌باشند. در این مطالعه برای اولین بار سعی بر تولید میکروذرات صفحه‌ای و ایجاد یک فیلم نازک توسط روش ریسندگی الکتروسانتریفیوژ، به عنوان روشی مقرون به صرفه با نرخ تولید بالا، گردید. در این مطالعه تاثیر پارامترهایی نظیر غلظت، ولتاژ، نیروی گریز از مرکز بر شکل و ابعاد میکرو صفحات پلی کاپرولاکتون بررسی گردید. در این راستا غلظت‌های ۳ و ۵ درصد وزنی از محلول پلی کاپرولاکتون در حلال دی کلرومتان مورد استفاده قرار گرفت. محلول‌ها با غلظت‌های متفاوت با استفاده از سیستم ریسندگی الکتروسانتریفیوژ تحت فرایند تولید میکرو - صفحات قرار گرفتند. به منظور بررسی اثر ولتاژ و نیروی گریز از مرکز بر قطر ذرات، تولید ذرات پلی کاپرولاکتون تحت ولتاژهای ۱۸، ۱۵ kV و ۲۱ و سرعت‌های دورانی ۱۷۴۰ و ۳۱۹۰ rpm انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت محلول پلیمری، با ثابت بودن ولتاژ و سرعت دورانی، قطر میکرو- صفحات کاهش می‌یابد. همچنین با ثابت نگه داشتن غلظت محلول و نیز سرعت دورانی سیستم ریسندگی، افزایش ولتاژ منجر به کاهش قطر میکرو صفحات شده است. بعلاوه تحت غلظت و ولتاژ ثابت، قطر میکرو-صفحات با افزایش سرعت دورانی و در نتیجه افزایش نیروی گریز از مرکز، افزایش قابل توجهی می‌یابد. همچنین با کاهش غلظت محلول پلیمری، حضور قطرات پیرو افزایش می‌یابد، که این پدیده منجر به افزایش ناپیکنواختی قطر میکرو-صفحات می‌شود.

تاریخ دریافت:

۹۶/۲/۱۰

تاریخ پذیرش:

۹۶/۳/۲۸

میکروذرات صفحه‌ای، فیلم نازک، پوشش دهی، ریسندگی الکتروسانتریفیوژ، پلی کاپرولاکتون.

واژگان کلیدی

۱) مقدمه

داشتند که اعمال نیروی گریز از مرکز به طور قابل توجه موجب افزایش نرخ تولید نانو الیاف می شود [۳۹]، [۴۰]. اعمال نیروی گریز از مرکز موجب انتقال محلول پلیمری به سر نازل می شود. لازم به ذکر است که محلول پلیمری توسط نیروی کشش سطحی حمایت می شود و در واقع در برابر نیروی گریز از مرکز مقابله می کند تا اینکه سرعت چرخشی و نتیجتاً نیروی گریز از مرکز آن قدر افزایش می یابد تا بر نیروی کشش سطحی محلول غلبه یافته و جت سیال از نوک نازل خارج شود. سرعت چرخشی که بر نیروی کشش سطحی غلبه می یابد را سرعت بحرانی می نامند. جت خارج شده از سر نازل نیروهای مختلفی مانند نیروی گریز از مرکز، نیروی کوریولیس، اثرات ویسکوز و کشش (درگ) هوا در کنار نیروهای الکترواستاتیک را تجربه می کند [۴۱]. نیروهای کوریولیس و کشش هوا سبب حرکت منحنی وار مسیر جت و اثر مقاومت هوا موجب خمیده شدن جت مایع به طور فزاینده ای می شود [۴۲]، [۴۳]. چنین به نظر می رسد که روش ریسندگی الکتروسانتریفیوژ توانایی تولید میکروذرات را در حجم بالا داشته باشد. از این رو هدف این مطالعه امکان سنجی تولید ذرات پلیمری و به خصوص ایجاد یک فیلم نازک توسط این ذرات با استفاده از روش الکتروسانتریفیوژ است. همچنین اثر پارامترهای مختلف مانند ولتاژ، غلظت و نیروی گریز از مرکز بر قطر این ذرات بررسی می شود.

۲) تجربیات

۱) سیستم ریسندگی الکتروسانتریفیوژ

شماتیکی از دستگاه الکتروسانتریفیوژ در شکل ۱ نشان داده شده است که قسمت های مختلف به شرح زیر است: محور اصلی (A)، نگهدارنده نازل چرخان (D)، جمع کننده ی استوانه ای فلزی با قطر ۲۶/۶ cm و پهنای ۱۰ cm (E)، و نوک نازل (C). سوزن متصل به سرنگ (B) دارای قطر داخلی $1 \mu\text{m}$ ، ضخامت دیواره ی $70 \mu\text{m}$ و طولی برابر ۱۸ mm می باشد. به منظور ایجاد همزمان نیروهای الکترواستاتیک و گریز از مرکز از یک منبع مستقیم با ولتاژ بالا به طوری که سر منفی آن به جمع کننده و سر مثبت آن به نازل متصل باشد، استفاده می شود. به منظور جلوگیری از خشک شدن محلول در نوک نازل و انسداد جریان محلول که ناشی از احاطه ی هوا در نزدیکی نازل می باشد، تنها ۲ mm از نوک سوزن در معرض هوا قرار دارد [۳۹].

۲) تولید ذرات پلیمری پلی کاپرولاکتون

برای تولید ذرات پلیمری، ابتدا محلول های پلیمری را در غلظت های

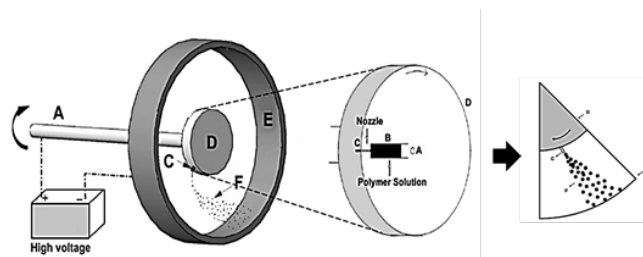
ذراتی در محدوده ابعاد ۰/۱ تا ۱۰۰ میکرومتر در دسته ی میکروذرات دسته بندی می شود. انواع میکرو ذرات تجاری شامل ذرات سرامیکی، شیشه ای، پلیمری و فلزی در دسترس هستند [۱]. در این بین ذرات پلیمری با خواص نوری، مغناطیسی و مکانیکی خاص در حوزه های شیمی، بیولوژی و فیزیک کاربرد دارند [۲]- [۴]. کاربرد میکروذرات و همین طور نانوذرات پلیمری در حوزه ی پزشکی بسیار وسیع است به صورتی که آنها به طور گسترده بعنوان حامل های رهایش دارو به منظور کنترل و طولانی کردن رهایش عامل درمانی به کار می روند. کنترل رهایش به وسیله ی ساختار، اندازه و ماتریس پلیمری ذرات حاصل می شود به طوری که این ذرات بسته به کاربردشان می توانند صلب، متخلخل و میان تهی باشند [۵]، [۶].

انواع روش های تولید میکروذرات عبارتند از تیخیر حلال [۷]، خشک کردن اسپری [۸]، اسپری کردن یک محلول پلیمری از طریق یک نازل بسیار کوچک مانند روش الکترواسپری [۹]، [۱۰] و امولسیون کردن غشای شیشه ای متخلخل Shirasu [۱۱] و غیره. بیشتر این روش ها دارای عیوبی هستند از جمله بازده محصور سازی پایین یا دشواری در جداسازی ذرات از فاز آبی؛ اما در این بین روش الکترواسپری به طور گسترده در ساخت میکرو و نانوذرات، فیلم های نازک، الیاف، الیاف توخالی، رسوب دهی خوشه های نانو ذره ای، میکرو و نانوکپسول ها و تولید ذرات دارویی استفاده می شود [۱۲]- [۱۸].

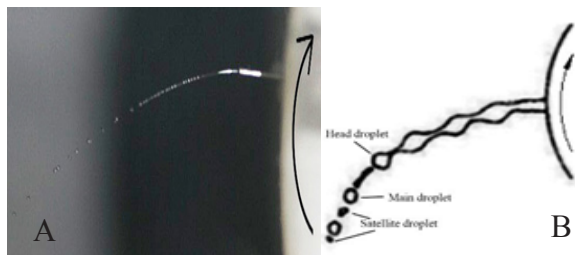
اصول روش الکترواسپری به این صورت است که محلول پلیمری با اعمال ولتاژ الکتریکی باردار شده و تحت نیروهای کلمبی قرار می گیرد و در نتیجه ناپایدار می شود. نهایتاً زمانی که نیروهای الکترواستاتیک به نیروی کشش سطحی محلول پلیمری غلبه یابد، جت سیال به قطرات کوچکی می شکند و در ادامه با تیخیر حلال به ذرات کوچکتری تبدیل می شود [۱۹].

یکی از چالش های روش الکترواسپری که مشابه روش الکتروریسی برای تولید الیاف است، نرخ تولید پایین می باشد. بنابراین محققان چندین روش برای افزایش نرخ تولید نانو الیاف مانند، اصلاح روش تک نازله [۲۱]، [۲۲]، چند نازله کردن [۲۲]- [۳۰]، سیستم های فاقد نازل [۳۱]- [۳۷]، روش فیلترهای پلاستیکی [۳۸] و الکترو سانتریفیوژ [۳۹]، [۴۰] ارائه داده اند.

در روش الکتروسانتریفیوژ، توأمان از نیروهای گریز از مرکز و نیروهای الکترواستاتیک استفاده می شود [۳۹]. محققان بیان



شکل (۱) تصویر شماتیکی از دستگاه الکتروسانتریفیوژ [۳۹]



شکل (۲) تصویر واقعی (A) و شماتیک (B) از شکست جت و ایجاد قطره در سیستم الکتروسانتریفیوژ

۳ و ۵ درصد وزنی از پلی کاپرولاکتون ($Mw: 80000$) تهیه شد؛ به این ترتیب که مقدار مشخص از گرانول پلی کاپرولاکتون را در حلال دی کلرومتان حل کرده و سپس به آرامی برای چند ساعت به منظور رسیدن به محلولی همگن و قابل رسیدن توسط همزن مغناطیسی همزده می شود.

به منظور بررسی اثر ولتاژ و نیروی گریز از مرکز بر قطر ذرات، تولید ذرات پلی کاپرولاکتون تحت ولتاژهای ۱۵، ۱۸، ۲۱ و سرعت های چرخشی ۱۷۴۰ rpm و ۳۱۹۰ انجام گرفت.

(۳/۲) تعیین خواص

مورفولوژی ذرات توسط میکروسکوپ نوری Digital upright microscope (DMWB1- 223ASC) ساخت کشور چین) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (Hitachi S-4160) تحت بررسی قرار گرفت. قطر ذرات از تصاویر گرفته شده و با استفاده از نرم افزار Moti images 2000 اندازه گرفته شد و نتایج از طریق نرم افزار Excel و Spss مورد تحلیل آماری واقع شد.

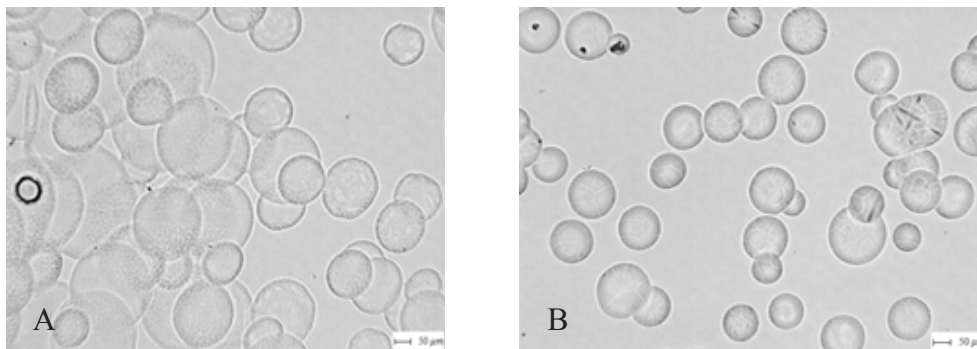
(۳) بحث و نتیجه گیری

(۱/۳) مکانیزم ایجاد قطرات و میکروصفحات

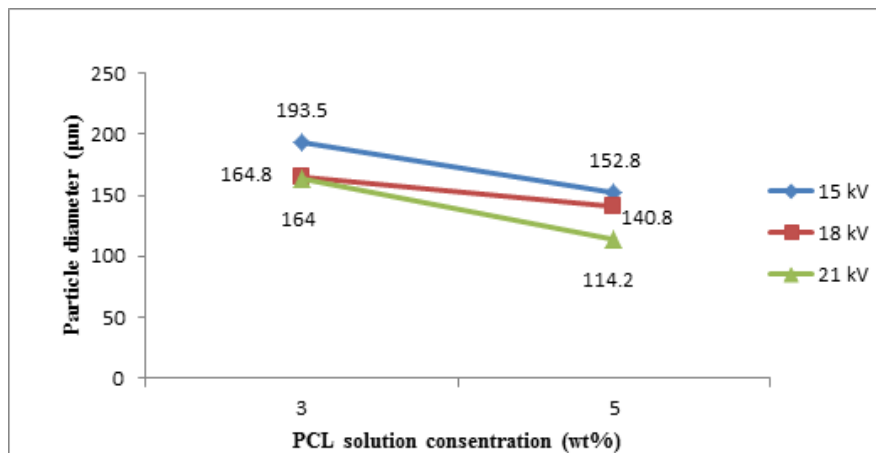
تصویر واقعی و شماتیک ایجاد قطره در سیستم الکتروسانتریفیوژ به ترتیب در شکل ۲- (A) و ۲- (B) نشان داده شده است. مسیر جت پلیمری شامل سه بخش می باشد: ابتدا محلول پلیمری در اثر نیروی گریز از مرکز و نیروهای الکتریکی یک مسیر پیوسته و انحنادار را طی می نماید. سپس دچار ناپایداری های ریلی شده و حالت زنجیره ای ایجاد می شود. با رشد ناپایداری ها، قطرات به صورت مجزای از یکدیگر در ادامه جریان تشکیل می شوند. این شکست جریان منجر به ایجاد قطرات اصلی (main droplet)، قطرات پیرو (satellite droplet) و قطره ی رأس (head droplet) می شود. اولین قطره ای که از این مسیر انحنادار جدا می شود یعنی قطره ی رأس، بزرگترین قطره می باشد و در ادامه مسیر قطرات اصلی و نیز کوچکترین قطرات که قطرات پیرو هستند، شکل می گیرند.

(۲/۳) تاثیر غلظت محلول پلیمری پلی کاپرولاکتون

به منظور اثر غلظت پلی کاپرولاکتون بر قطر ذرات تولید شده، ذرات پلی کاپرولاکتون تحت ولتاژ و نیروی گریز از مرکز ثابت در غلظت های ۳ و ۵ درصد وزنی تولید گردید. تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از این نمونه ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. میانگین و ضریب تغییرات قطر قطرات در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق شکل ۴، متوسط قطر ذرات با افزایش غلظت کاهش می یابد که دلیل این پدیده ناشی از این است که از طرفی با افزایش غلظت افزایش میزان بار حمل شده توسط محلول و در نتیجه افزایش نیروهای کلمبی را دارد و از طرف دیگر به دلیل اینکه شکل ذرات صفحه ای است، افزایش غلظت، کاهش پخش شدن ذرات را به همراه دارد. در واقع وقتی غلظت محلول پلیمری کم باشد، درگیری و اصطکاک بین زنجیره های پلیمری کاهش می یابد و در نتیجه ویسکوزیته کاهش می یابد. اگر نسبت پلیمر در محلول پلیمری خیلی کم باشد ذره ی کره ای شکلی که از جت جدا می شود نمی تواند شکل خودش را حفظ کند و به یک میکرو صفحه تبدیل می شود [۴۴]. همچنین باتوجه به جدول ۱، ضریب تغییرات (%CV) قطر میکروصفحات در غلظت ۳ درصدوزنی بیشتر از غلظت ۵ درصد وزنی است. دلیل این امر ایجاد قطرات پیرو (Satellite droplets) در حین فرایند تولید است که بطور قابل توجهی در این غلظت ظهور می یابند و دارای قطر کوچکتری نسبت به قطرات اصلی هستند. در شکل ۲ قطرات اصلی و قطرات پیرو در حین فرایند الکتروسانتریفیوژ مشخص شده است. بنابراین انتظار می رود با وجود قطرات پیشرو یا اصلی و نیز قطرات پیرو،



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری ذرات پلی کاپرولاکتون تولید شده تحت ولتاژ ۲۱ kV، سرعت چرخشی ۳۱۹۰ rpm و غلظت (A) برابر ۳ درصد وزنی و (B) ۵ درصد وزنی.



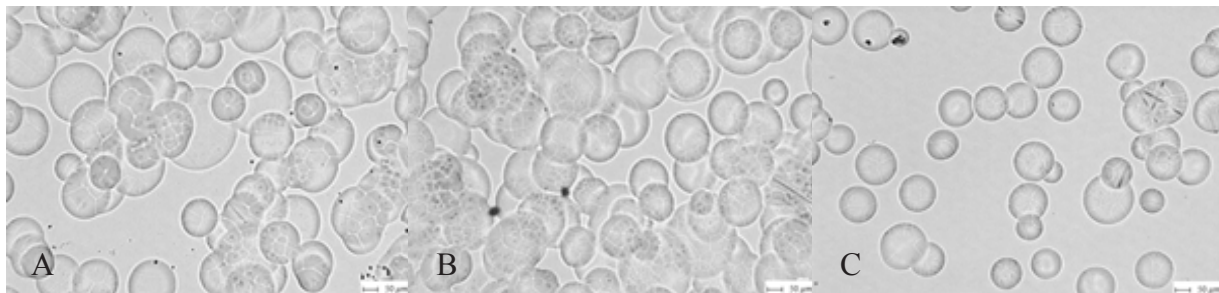
شکل ۴ نمودار قطر ذرات بر حسب غلظت محلول پلیمری در سرعت چرخشی ۳۱۹۰ rpm.

غلبه می یابد. با افزایش ولتاژ و ثابت نگه داشتن غلظت و نیروی گریز از مرکز، متوسط قطر ذرات کاهش می یابد. دلیل این امر، افزایش میزان بار الکتریکی حمل شده توسط جت و در نتیجه افزایش نیروهای دافعه ی کلمب در اثر افزایش ولتاژ می باشد؛ که به موجب آن کوچک شدن مخروط تیلور، افزایش ناپایداری و در نتیجه کشیده شدن جت سیال را به دنبال دارد و این باعث کاهش قطر ذرات می شود. شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری ذرات پلی کاپرولاکتون تولید شده را تحت غلظت ۵ درصد وزنی و سرعت چرخشی ۳۱۹۰ دور بر دقیقه در ولتاژهای ۲۱ kV و ۱۸ kV، ۱۵ نشان می دهد. شکل ۶ تغییر قطر ذرات را نسبت به افزایش

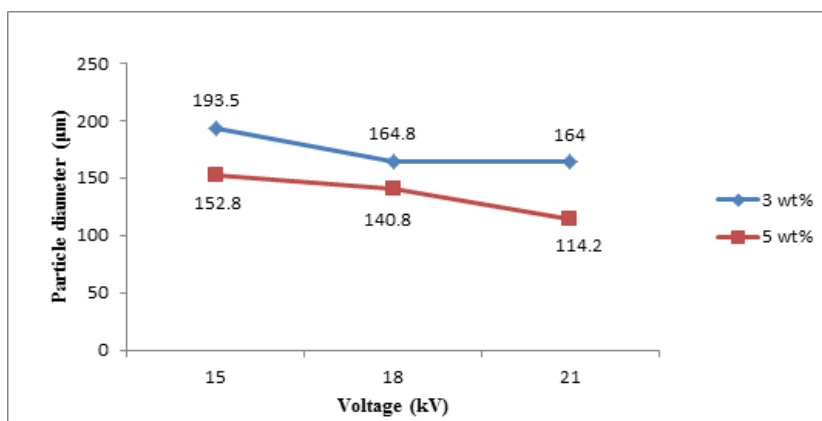
توزیع قطری پهن تری برای میکروصفحات حاصل شود.

۳(۳) تاثیر ولتاژ

یکی از مهم ترین عوامل اثرگذار بر اندازه ی ذرات مونودیسپرس در الکتروسپری ولتاژ است. انتظار می رود در فرایند الکتروسانتریفیوژ نیز ولتاژ از اهمیت بالایی برخوردار باشد. مشخصا پتانسیل الکتریکی کافی برای شکل گیری ذرات و شتاب گرفتن محلول پلیمری به سمت جمع کننده نیاز است [۴۵]. حد آستانه ولتاژ برای شکل گیری ذرات و اسپری شدن در سیستم الکتروسانتریفیوژ برابر ۱۵ kV است. در این ولتاژ نیروی دافعه ی کلمبی که توسط میدان الکتریکی ایجاد می شود به حدی است که بر کشش سطحی



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری ذرات پلی کاپرولاکتون تولید شده تحت غلظت ۵ درصد وزنی، سرعت چرخشی ۳۱۹۰ rpm و ولتاژهای (A) ۱۵ kV، (B) ۱۸ kV و (C) ۲۱ kV.



شکل ۶) نمودار قطر ذرات بر حسب ولتاژ اعمال شده در سرعت چرخشی ۳۱۹۰ rpm.

جدول ۱) مشخصات میکرو صفحات در شرایط مختلف تولید

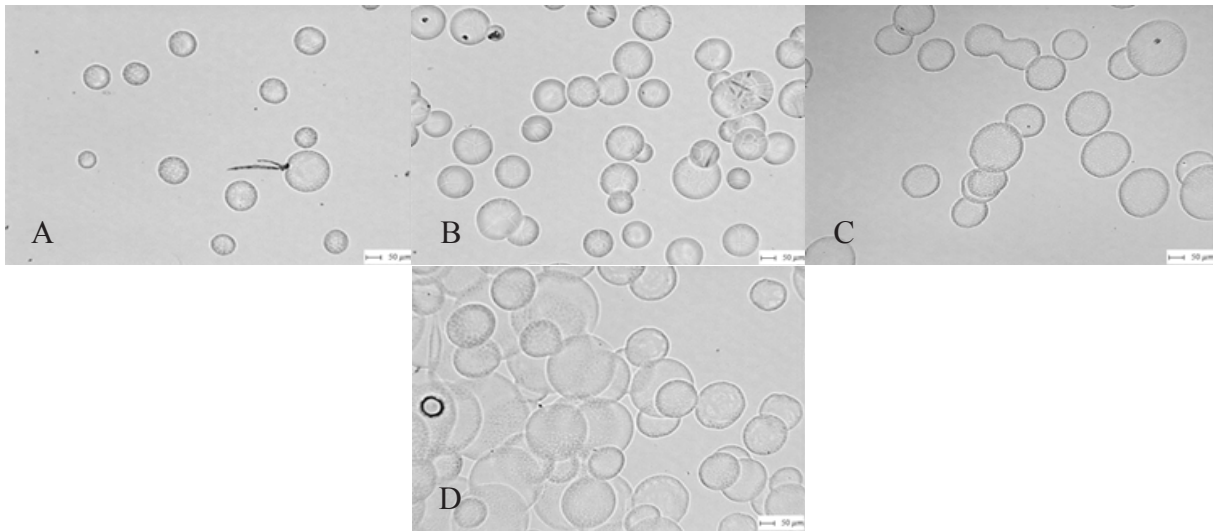
سرعت چرخشی (rpm)	غلظت محلول پلیمری (wt%)	ولتاژ (kV)	میانگین قطر میکرو صفحات (µm)	ضریب تنیفات (%)
۳۱۹۰	۳	۲۱	۱۳۴/۱	۲۲/۸
		۱۵	۱۹۳/۵	۲۷/۹
		۱۸	۱۶۴/۸	۲۶/۷
		۲۱	۱۶۴	۳۲/۱
۱۷۴۰	۵	۲۱	۹۸	۲۳/۵
		۱۵	۱۵۲/۸	۳۰/۸
		۱۸	۱۴۰/۸	۱۶/۸
		۲۱	۱۱۴/۲	۱۵/۹

چرخشی که افزایش نیروی گریز از مرکز را به همراه دارد، میانگین قطر ذرات به صورت معناداری افزایش می یابد. از آن جا که در سیستم الکتروسانتریفیوژ، نرخ جریان خروجی محلول پلیمری تابعی از نیروی گریز از مرکز است، با افزایش سرعت چرخشی، در صورت ثابت بودن سایر پارامترها، نرخ بالاتر جریان را موجب می شود و مشاهده می شود که با افزایش سرعت چرخشی از ۱۷۴۰ به ۳۱۹۰ دور بر دقیقه متوسط قطر ذرات در غلظت ۳ درصد وزنی از ۱۳۴/۱ به ۱۶۴/۰ میکرومتر و در غلظت ۵ درصد وزنی از ۹۸/۰ به ۱۱۴/۲ میکرومتر افزایش می یابد (شکل ۸). همچنین با توجه به اینکه با افزایش سرعت چرخشی مسیر جت دارای انحنای بیشتر و طول شکست جت در فاصله ی دورتری از نازل اتفاق می افتد در نتیجه در سرعت چرخشی بیشتر قطر میکروصفحات افزایش می یابد [۴۷].

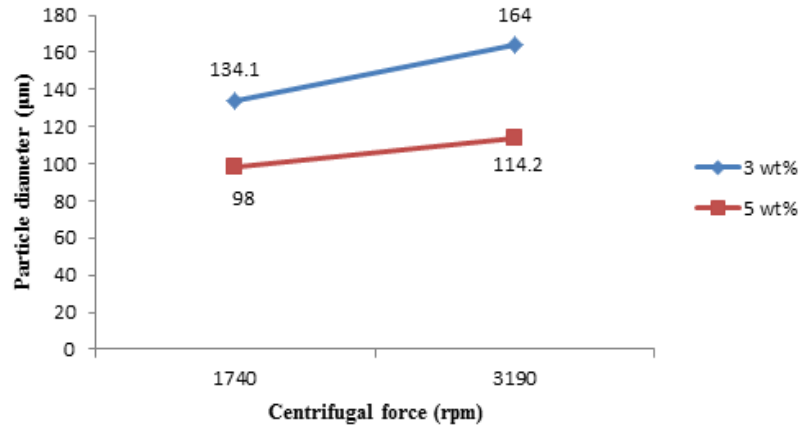
ولتاژ برای هر دو غلظت ۳ و ۵ درصد وزنی در نیروی گریز از مرکز ثابت، به خوبی نشان می دهد. مطالعات نشان داده است که قطرات پیرو در ولتاژهای خاصی ایجاد می شوند و مونودیسپرسیته ی و یکنواختی قطر میکروصفحات را کاهش می دهند [۴۶]. با توجه به ضریب تغییرات ابعاد میکروصفحات (جدول ۱)، با افزایش ولتاژ تشکیل قطرات پیرو کاهش یافته است، به طوری که در ولتاژ kV ۲۱ بیشترین یکنواختی قطری حاصل شده است.

۴(۳) تاثیر نیروی گریز از مرکز

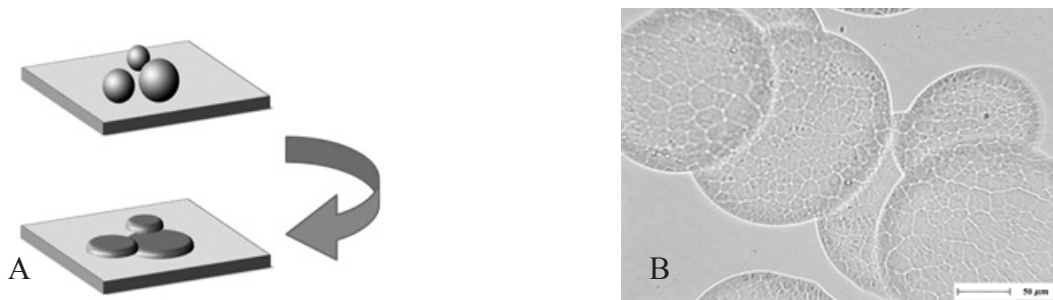
به منظور بررسی اثر نیروی گریز از مرکز بر قطر ذرات تولید شده، ذرات پلی کاپرولاکتون تحت ولتاژ و غلظت ثابت در سرعت های زاویه ای ۱۷۴۰ و ۳۱۹۰ دور بر دقیقه تولید شد. همان گونه که در شکل ۷ مشخص است با افزایش سرعت



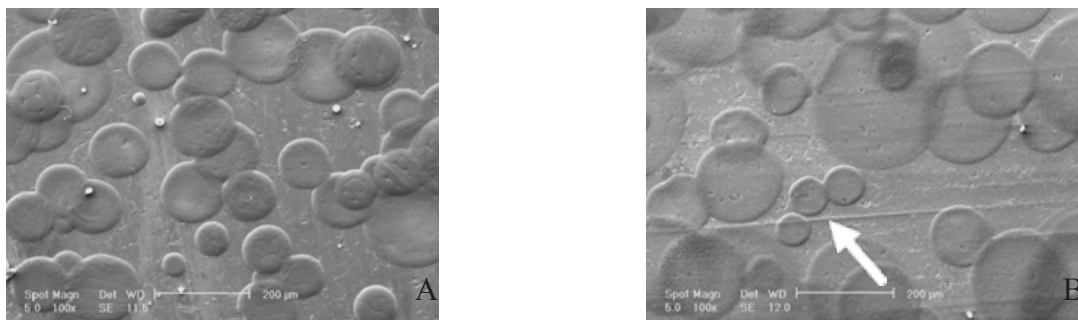
شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ نوری ذرات پلی کاپرولاکتون تولید شده تحت ولتاژ ۲۱ kV و به ترتیب غلظت ها و سرعت چرخشی (A) ۵ درصد وزنی، ۱۷۴۰ rpm، (B) ۵ درصد وزنی، ۳۱۹۰ rpm، (C) ۳ درصد وزنی، ۱۷۴۰ rpm و (D) ۳ درصد وزنی، ۳۱۹۰ rpm



شکل ۸ نمودار قطر ذرات بر حسب نیروی گریز از مرکز در ولتاژ اعمال شده ی ۲۱ kV.



شکل ۹ (A) شکل گیری فیلم نازک، (B) تصویر میکروسکوپ نوری، غلظت ۳ درصد وزنی، ولتاژ ۲۱ kV و سرعت چرخشی ۳۱۹۰ rpm تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی



شکل ۱۰ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پلی کاپرولاکتون تولید شده تحت ولتاژ ۲۱ kV، سرعت چرخشی ۳۱۹۰ rpm و غلظت های (A) ۵ درصد وزنی و (B) ۳ درصد وزنی

بررسی ضریب تغییرات قطر میکروصفحات می توان دریافت که میزان غلظت محلول پلیمری، بیشترین اثرگذاری در تشکیل قطرات پیرو را دارد و عامل ناپیکنواختی در قطر میکروصفحات می باشد، به طوری که با کاهش غلظت، ضریب تغییرات قطر میکروصفحات افزایش می یابد.

۵(۳) بررسی مورفولوژی

همان طور که در تمامی تصاویر میکروسکوپی قابل مشاهده است، شکل ذرات در غلظت های ۳ و ۵ درصد وزنی و در کلیه ی شرایط با ولتاژها و سرعت چرخشی مختلف، به صورت پرک و دواپر مسطحی می باشد. این مورفولوژی ناشی از ویسکوزیته ی پایین محلول پلیمری است. به دلیل اینکه سهم حلال در محلول پلیمری بیشتر است، حلال بطور کامل فرصت تبخیر را نمی یابد و ذرات مطابق شکل ۹-(A) در برخورد با جمع کننده ی استوانه ای به صورت پخش شده قرار می گیرند و در ادامه با تبخیر حلال ترک هایی بر سطح ذرات شکل می گیرد که در تصاویر SEM با بزرگنمایی های بالاتر قابل مشاهده است (شکل ۹-(B)).

با توجه به شکل گیری ذرات به صورت مذکور و همپوشانی آنها با یکدیگر، از این روش می توان در پوشش دهی سطوح و ایجاد یک فیلم بسیار نازک استفاده کرد؛ به طوری که این امر در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به خوبی قابل درک و مشهود است. همچنین به صورت بصری قابل مشاهده است که با کاهش غلظت از ۵ درصد وزنی به ۳ درصد وزنی علاوه بر این که قطر ذرات افزایش یافته، ضخامت ذرات و در نتیجه ضخامت فیلم حاصل از آن کاهش می یابد (شکل ۱۰). ضریب تغییرات در غلظت ۳ درصد وزنی بیشتر از ۵ درصد وزنی است که دلالت بر افزایش شکل گیری قطرات پیرو دارد. بنابراین فیلم نهایی دارای یکنواختی کمتری خواهد بود. میکروصفحات مشخص شده با فلش در شکل ۱۰-B، مبین این رخداد می باشد.

۴) نتیجه گیری

روش الکتروساتریفیوژ، روشی مقرون به صرفه در وقت و هزینه است، چرا که نرخ تولید بالایی نسبت به سایر روش ها دارد. با توجه به امکان تولید ذراتی مسطح، این روش می تواند روش مناسبی برای پوشش دهی سطوح و منسوجات در ضخامت کم باشد. در این روش پتانسیل تولید ذرات پلیمری به صورت کروی نیز وجود دارد از اینرو انتظار می رود با افزایش غلظت محلول پلیمری و دستیابی به یک غلظت بهینه بتوان نانو ذرات کروی پلیمری تهیه نمود که این امر برای تحقیقات آتی در دست اجرا می باشد. همچنین در بررسی عوامل موثر بر ابعاد ذرات، مشاهده شد که با کاهش نیروی گریز از مرکز، افزایش غلظت و افزایش ولتاژ، قطر ذرات کاهش می یابد، به طوری که کمترین ابعاد ذرات با میانگین قطری ۹۸ میکرومتر در غلظت ۵ درصد وزنی، ولتاژ ۲۱ kV و سرعت زاویه ای ۱۷۴۰ rpm حاصل شد. همچنین با

- [10] C. Berkland, M. King, A. Cox, K. K. Kim, and D. W. Pack, "Precise control of PLG microsphere size provides enhanced control of drug release rate," *J. Control. release*, vol. 82, no. 1, pp. 137–147, 2002.
- [11] G. Ma, M. Nagai, and S. Omi, "Preparation of uniform poly (lactide) microspheres by employing the Shirasu Porous Glass (SPG) emulsification technique," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 153, no. 1, pp. 383–394, 1999.
- [12] K. Okuyama and I. W. Lenggoro, "Preparation of nanoparticles via spray route," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 58, no. 3, pp. 537–547, 2003.
- [13] C. J. Buchko, L. C. Chen, Y. Shen, and D. C. Martin, "Processing and microstructural characterization of porous biocompatible protein polymer thin films," *Polymer (Guildf.)*, vol. 40, no. 26, pp. 7397–7407, 1999.
- [14] C. Berkland, D. W. Pack, and K. K. Kim, "Controlling surface nano-structure using flow-limited field-injection electrostatic spraying (FFESS) of poly (D, L-lactide-co-glycolide)," *Biomaterials*, vol. 25, no. 25, pp. 5649–5658, 2004.
- [15] I. G. Loscertales, A. Barrero, M. Márquez, R. Spretz, R. Velarde-Ortiz, and G. Larsen, "Electrically forced coaxial nanojets for one-step hollow nanofiber design," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 126, no. 17, pp. 5376–5377, 2004.
- [16] S. N. Jayasinghe, M. J. Edirisinghe, and D. Z. Wang, "Controlled deposition of nanoparticle clusters by electrohydrodynamic atomization," *Nanotechnology*, vol. 15, no. 11, p. 1519, 2004.
- [17] I. G. Loscertales, A. Barrero, I. Guerrero, R. Cortijo, M. Marquez, and A. M. Ganan-Calvo, "Micro/nano encapsulation via electrified coaxial liquid jets," *Science (80-.)*, vol. 295, no. 5560, pp. 1695–1698, 2002.
- [18] J. C. Ijsebaert, K. B. Geerse, J. C. M. Marinissen, J.-W. J. Lammers, and P. Zanen, "Electro-hydrodynamic atomization of drug solutions for inhalation purposes," *J. Appl. Physiol.*, vol. 91, no. 6, pp. 2735–2741, 2001.
- [1] M. Sarret, C. Müller, and A. Amell, "Electroless NiP micro- and nano-composite coatings," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, no. 1–2, pp. 389–395, 2006.
- [2] A. E. Deng, Y. L. Wang, W. Yang, S. Fu, "Preparation of magnetic polymeric particles via inverse microemulsion polymerization process," *J. Magn. Magn. Mater.*, pp. 69–78, 2003.
- [3] C. L. Stayton, Patrick S. Allan S. Hoffman, Mohamed El-Sayed, Samarth Kulkarni, Tsuyoshi Shimoboji, Niren Murthy, Volga Bulmus, "Intelligent biohybrid materials for therapeutic and imaging agent delivery.," *Proc. IEEE*, pp. 726–736, 2005.
- [4] H.-J. A. Pich, Andrij, Jessica Hain, Yuri Prots, "Composite polymeric particles with ZnS shells," *Polymer (Guildf.)*, pp. 7931–7944, 2005.
- [5] B. Kuriokase, S. Padma, and S. P. Priya, "A Review on Microcapsules," vol. 9, no. 1, pp. 28–39, 2015.
- [6] Y. Wu, S. J. Kennedy, and R. L. Clark, "Polymeric Particle Formation Through Electrospraying at Low Atmospheric Pressure," pp. 381–387, 2008.
- [7] I. D. Rosca, F. Watari, and M. Uo, "Microparticle formation and its mechanism in single and double emulsion solvent evaporation," *J. Control. Release*, vol. 99, no. 2, pp. 271–280, 2004.
- [8] L. Mu and S. S. Feng, "Fabrication, characterization and in vitro release of paclitaxel (Taxol®) loaded poly (lactic-co-glycolic acid) microspheres prepared by spray drying technique with lipid/cholesterol emulsifiers," *J. Control. Release*, vol. 76, no. 3, pp. 239–254, 2001.
- [9] C. Berkland, K. K. Kim, and D. W. Pack, "Fabrication of PLG microspheres with precisely controlled and monodisperse size distributions," *J. Control. Release*, vol. 73, no. 1, pp. 59–74, 2001.

- 2010.
- [29] S. Xie and Y. Zeng, "Effects of electric field on multineedle electrospinning: experiment and simulation study," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 51, no. 14, pp. 5336–5345, 2012.
- [30] Y. Yamashita, F. Ko, H. Miyake, and A. Higashiyama, "Establishment of nanofiber preparation technique by electrospinning," vol. 64, no. 1, pp. 24–28, 2008.
- [31] A. L. Yarin and E. Zussman, "Upward needleless electrospinning of multiple nanofibers," *Polymer (Guildf.)*, vol. 45, no. 9, pp. 2977–2980, 2004.
- [32] X. Gan, Y. Wu, L. Liu, B. Shen, and W. Hu, "Electroless plating of Cu-Ni-P alloy on PET fabrics and effect of plating parameters on the properties of conductive fabrics," *J. Alloys Compd.*, vol. 455, no. 1–2, pp. 308–313, 2008.
- [33] O. O. Dosunmu, G. G. Chase, W. Kataphinan, and D. H. Reneker, "Electrospinning of polymer nanofibres from multiple jets on a porous tubular surface," *Nanotechnology*, vol. 17, no. 4, p. 1123, 2006.
- [34] O. Jirsak, P. Sysel, F. Sanetnik, J. Hruza, and J. Chaloupek, "Polyamic acid nanofibers produced by needleless electrospinning," *J. Nanomater.*, vol. 2010, p. 49, 2010.
- [35] X. Wang, H. Niu, X. Wang, and T. Lin, "Needleless electrospinning of uniform nanofibers using spiral coil spinnerets," *J. Nanomater.*, vol. 2012, p. 3, 2012.
- [36] F. Zhou, R. Gong, and I. Porat, "Polymeric nanofibers via flat spinneret electrospinning," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 12, pp. 2475–2481, 2009.
- [37] J. S. Varabhas, G. G. Chase, and D. H. Reneker, "Electrospun nanofibers from a porous hollow tube," *Polymer (Guildf.)*, vol. 49, no. 19, pp. 4226–4229, 2008.
- [38] A. Kumar, M. Wei, C. Barry, J. Chen, and J. Mead, "Controlling fiber repulsion in multijet electrospinning for higher throughput," *Macro*
- [19] R. P. A. Hartman, D. J. Brunner, D. M. A. Camelot, J. C. M. Marijnissen, and B. Scarlett, "Jet break-up in electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode," *J. Aerosol Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 65–95, 2000.
- [20] Y. Yamashita, F. Ko, A. TANAKA, and H. MIYAKE, "Characteristics of elastomeric nanofiber membranes produced by electrospinning," *J. Text. Eng.*, vol. 53, no. 4, pp. 137–142, 2007.
- [21] S. Paruchuri and M. P. Brenner, "Splitting of a liquid jet," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, no. 13, p. 134502, 2007.
- [22] G. Kim, Y.-S. Cho, and W. D. Kim, "Stability analysis for multi-jets electrospinning process modified with a cylindrical electrode," *Eur. Polym. J.*, vol. 42, no. 9, pp. 2031–2038, 2006.
- [23] Y. Srivastava, M. Marquez, and T. Thorsen, "Multijet electrospinning of conducting nanofibers from microfluidic manifolds," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 106, no. 5, pp. 3171–3178, 2007.
- [24] S. A. Theron, A. L. Yarin, E. Zussman, and E. Kroll, "Multiple jets in electrospinning: experiment and modeling," *Polymer (Guildf.)*, vol. 46, no. 9, pp. 2889–2899, 2005.
- [25] W. Tomaszewski and M. Szadkowski, "Investigation of electrospinning with the use of a multi-jet electrospinning head," *Fibres Text. East. Eur.*, vol. 13, no. 4, p. 22, 2005.
- [26] A. Vaseashta, "Controlled formation of multiple Taylor cones in electrospinning process," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 9, p. 93115, 2007.
- [27] A. Varesano, R. A. Carletto, and G. Mazzuchetti, "Experimental investigations on the multi-jet electrospinning process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 11, pp. 5178–5185, 2009.
- [28] A. Varesano, F. Rombaldoni, G. Mazzuchetti, C. Tonin, and R. Comotto, "Multijet nozzle electrospinning on textile substrates: observations on process and nanofibre mat deposition," *Polym. Int.*, vol. 59, no. 12, pp. 1606–1615,

crohydrogels,” *Journal of microencapsulation*, vol. 33, no. 7, pp. 605-612, 2016.

[47] L. Partridge, D. C. Y. Wong, M. J. H. Simmons, E. I. Părău, and S. P. Decent, “Experimental and theoretical description of the break-up of curved liquid jets in the prilling process,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 83, no. 11, pp. 1267-1275, 2005.

mol. Mater. Eng., vol. 295, no. 8, pp. 701–708, 2010.

[39] F. Dabirian, S. A. Hosseini Ravandi, and A. R. Pishavar, “Investigation of Parameters Affecting PAN Nanofiber Production Using Electrical and Centrifugal Forces as a Novel Method,” *Curr. Nanosci.*, vol. 6, pp. 545-552, 2010.

[40] A. Valipouri, S. A. H. Ravandi, and A. Pishavar, “A novel method for manufacturing nanofibers,” *Fiber Polym.*, vol. 14, pp. 941-949, 2013.

[41] S. Padron, A. Fuentes, D. Caruntu, and K. Lozano, “Experimental study of nanofiber production through forcespinning,” *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 2, p. 24318, 2013.

[42] A. Bellofiore, “Experimental and numerical study of liquid jets injected in high-density air crossflow,” *Università degli Studi di Napoli Federico II*, 2007.

[43] A. Valipouri, S. Abdolkarim, H. Ravandi, A. Pishavar, and E. I. Pa, “Experimental and numerical study on isolated and non-isolated jet behavior through centrifuge spinning system,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 69, pp. 93–101, 2015.

[44] X. Hao, L. Xiaofeng, L. Zhenyu, Z. Yiyang, S. Tiecun, Y. Qingbiao, Ce Wang, and L. Lijuan, “Effects of the electrospray ionization parameters on the formation and morphology of colloidal microspheres of polyacrylonitrile,” *Journal of applied polymer science*, vol. 102, no. 3, pp. 2889-2893, 2006.

[45] J. Gomez-Estaca, M. P. Balaguer, R. Gavara, and P. Hernandez-Munoz, “Formation of zein nanoparticles by electrohydrodynamic atomization: Effect of the main processing variables and suitability for encapsulating the food coloring and active ingredient curcumin,” *Food Hydrocolloids*, vol. 28, no. 1, pp. 82-91, 2012.

[46] A. Mehregan Nikoo, R. Kadkhodae, B. Ghorani, H. Razzaq, and N. Tucker. “Controlling the morphology and material characteristics of electrospray generated calcium alginate mi-