

## دراسة العوامل المؤثرة على ألياف البولي أكريلونيتريل النانوية المنتجة بتقنية الغزل الكهربائي Factors affecting PAN nanofibers produced by electro-spinning technique

د. فوزي سعيد شريف

أستاذ مساعد بقسم الملابس والنسيج – كلية الاقتصاد المنزلي – جامعة المنوفية – مصر، f.sherif@hotmail.de

د. نهي محمد عبده السيد

أستاذ مساعد بقسم الملابس والنسيج، كلية الاقتصاد المنزلي، جامعة المنوفية، noha\_mabdo@yahoo.com

### كلمات دالة Keywords :

الغزل الكهربائي  
Electro-spinning  
الألياف النانوية  
Nanofibers  
ألياف البولي أكريلونيتريل  
النانوية  
PAN Nanofibers  
النانوتكنولوجي  
Nano-Technology

### ملخص البحث Abstract :

أصبحت تكنولوجيا النانو في العقود الأخيرة من أهم الصيحات الحديثة في العديد من الصناعات، وليست صناعة الغزل والنسيج بعيد عن تلك التكنولوجيا الحديثة، فقد أصبحت الألياف النانوية المغزولة الكترونياً الأكثر انتشاراً بالعديد من التطبيقات الحيوية مثل أجهزة الاستشعار وهندسة الأنسجة وتضميد الجروح والفلترية وصناعة الأدوية والتطبيقات الضوئية والإلكترونية وغيرها من المجالات. ويعتبر بوليمر البولي أكريلونيتريل (PAN) من أكثر البوليمرات العضوية استخداماً، وله العديد من الخصائص التي تؤهله للتطبيق بشتى المجالات. تتبنى هذه الدراسة على كيفية غزل ألياف نانوية دقيقة ومتماثلة الأقطار من بوليمر البولي أكريلونيتريل، (PAN) وتهدف الى دراسة تأثير الاختلافات في شدة التيار الكهربائي، ولزوجة المحلول البوليمري وغيرها من العوامل على خصائص الألياف المنتجة. باستخدام جهاز الغزل الكهربائي، تم انتاج ألياف نانوية من بوليمر البولي أكريلونيتريل (PAN) تحت تأثير تيارات كهربائية مختلفة (7ك.ف، 20ك.ف، 23ك.ف)، وكذلك باستخدام معدلات لزوجة مختلفة من المحلول البوليمري (5%، 10%، 15%)، وذلك بغرض الحصول على أنسب المتغيرات التي تساعد في انتاج أفضل صورة للألياف من حيث دقة الأقطار وتماتها وخلوها من التكتلات البوليمرية التي تقلل من كفاءة الألياف. وقد أظهرت النتائج أن أقطار ألياف البولي أكريلونيتريل (PAN) المغزولة كهربائياً تزداد بزيادة لزوجة المحلول البوليمري وكذلك تزداد بزيادة الجهد الكهربائي المستخدم. وتقل أقطار الألياف بانخفاض لزوجة المحلول والجهد الكهربائي. وأن أفضل المتغيرات التي تؤدي الى انتاج ألياف نانوية دقيقة متماثلة الأقطار ويمكن الاعتماد عليها بالعديد من التطبيقات، هي أن يكون الجهد الكهربائي المستخدم هو 23 ك.ف، وأن تكون لزوجة محلول البولي أكريلونيتريل (PAN) هي 10 %، وأوصت الدراسة بضرورة استكمال الأبحاث والدراسات بمجال الغزل الكهربائي للألياف، لما لها من أهمية بالغة في انتاج ألياف نانوية دقيقة الأقطار، يمكن استخدامها وتطبيقها بالعديد من المجالات المختلفة.

Paper received 19<sup>th</sup> January 2020, Accepted 20<sup>th</sup> March 2021, Published 1<sup>st</sup> of May 2021

العوامل المؤثرة عليها أثناء غزلها كهربائياً.

### أهمية البحث Significance :

تتمثل أهمية الدراسة في لقاء الضوء على أحد أهم تطبيقات تكنولوجيا النانو بمجال صناعة الغزل والنسيج، والمتمثلة في تقنية الغزل الكهربائي. وكذلك الاستفادة من تلك التقنية في انتاج ألياف نانوية من بوليمر البولي أكريلونيتريل، (PAN) والتي يمكن استخدامها بالعديد من التطبيقات المهمة مثل ترشيح المياه وأجهزة الاستشعار النانوية والعديد من التطبيقات الأخرى.

### أهداف البحث Objectives :

- انتاج ألياف نانوية دقيقة منتظمة الأقطار من البولي أكريلونيتريل (PAN) باستخدام تقنية الغزل الكهربائي.
- الاستفادة من تقنية المسح (التصوير) المجهرى (SEM) لدراسة طبيعة الألياف المنتجة.
- دراسة تأثير الاختلافات في شدة التيار الكهربائي، ولزوجة المحلول البوليمري وغيرها من العوامل على خصائص الألياف المنتجة.

### أدوات البحث Tools :

اعتمدت الدراسة على العديد من الأدوات والمحددات التي من خلالها تم بناء الجزء التجريبي للدراسة، فقد تم استخدام بوليمر البولي أكريلونيتريل (PAN) من انتاج شركة Dralon وقد تم

### مقدمة Introduction :

1. الإطار النظري: thoriical Framework  
اكتسبت تقنية الغزل الكهربائي اهتماماً متزايداً في العقد الماضي بسبب الاهتمام المتزايد بتكنولوجيا النانو، ويمكن لهذه التقنية تكوين ألياف دقيقة جداً من السائل بمساعدة شحنة كهربائية ولا تتطلب درجات حرارة عالية. وبالتالي تعتبر تقنية الغزل الكهربائي من أبسط التقنيات وأكثرها فاعلية لإنتاج ألياف نانوية مستمرة من محاليل البوليمر أو المواد المنصهرة باستخدام شحنات (مجالات) كهربائية عالي. (Subbiah, T, et al: 2005) في العقود الأخيرة، تم تطبيق الألياف النانوية الكهربائية في العديد من المجالات المختلفة مثل أجهزة الاستشعار وهندسة الأنسجة وتضميد الجروح والفلترية وصناعة الأدوية والتطبيقات الضوئية والإلكترونية وغيرها من المجالات، وذلك يرجع الى أنها عملية سهلة وفعالة من حيث التكلفة للحصول على ألياف نانوية دقيقة الأقطار (Lannuttia, J, et al: 2007), (Matthew, T, et al: 2008)

### مشكلة البحث Statement of the problem :

تشتمل تقنية الغزل الكهربائي على العديد من المتغيرات، والتي تؤثر بشكل كبير على طبيعة الألياف النانوية الناتجة من استخدام تلك التقنية. وتتمثل مشكلة الدراسة في كيفية انتاج ألياف نانوية دقيقة منتظمة الأقطار من بوليمر البولي أكريلونيتريل (PAN) يمكن الاعتماد عليها بالعديد من التطبيقات المختلفة، وأيضاً دراسة

زيادة الطلب العالمي علي الألياف النانوية المغزولة كهربائياً  
(Sherif, F: 2021)

ب. دراسة **Rivero, J, P** و **أخرون (2020):**

و هدفت الدراسة الي استخدام تقنية الغزل الكهربائي لإنتاج ألياف نانوية لها خصائص كارهة للماء، و استخدمت الدراسة مجموعة واسعة من المواد البوليمرية التي يمكن ترسيبها على أي نوع من الأسطح، ما يجعلها مقاومة جيدة للماء و البلل. و اعتمدت الدراسة علي العديد من متغيرات الغزل الكهربائي مثل الجهد الكهربائي المستخدم، و معدل تدفق المحلول البوليمري، و المسافة بين مجمع الألياف و طرف الأبرة. (Rivero, J,P, et al: 2020)

ج. دراسة **Esfahani, H** و **أخرون (2017):**

من خلال هذه الدراسة تم تطوير ألياف نانوية من السيراميك (NFs)، و التي استخدمت مؤخرًا بالعديد من التطبيقات المتقدمة نظراً لخصائصها الفريدة. و استعرضت الدراسة التطورات الحديثة صناعة ألياف السيراميك NFs المغزولة كهربائياً وخصائصها وتطبيقاتها و العوامل المؤثرة عليها. (Esfahani, H, et al: 2017)

د. دراسة **Linlin, L** و **أخرون (2017):**

قدمت هذه الدراسة نظرة عامة شاملة عن تحضير الألياف النانوية غير العضوية المغزولة بالكهرباء وتطبيقاتها في صناعة البطاريات الثانوية المتقدمة. بما في ذلك بطاريات أيون الليثيوم ، و بطاريات الصوديوم ، و بطاريات Li-S ، و البطاريات المعدنية الهوائية و غيرها. و اوضحت نتائج هذه الدراسة أن الألياف النانوية الكهربائية التي تم تصنيعها لها العديد من الخصائص الفريدة مثل مساحة السطح الكبيرة و المسامية العالية و التي لها تأثير مباشر على الأداء النهائي في التطبيقات المختلفة. (Lilin, L, et al: 2017)

ه. دراسة **Hasan, M, M** و **أخرون (2014):**

هدفت تلك الدراسة الي وضع صورة موضوعية و شاملة حول تقنية الغزل الكهربائي، و كيفية استخدام أنواع مختلفة من البوليمرات لإنتاج دعومات للخلايا من خلال هندسة الأنسجة. و قامت الدراسة بعرض شامل للمتغيرات اللازمة لإنتاج ألياف نانوية باستخدام تقنية الغزل الكهربائي يمكن تطبيقها في مجال هندسة الأنسجة (Hasan, M, M, et al: 2014)

**9.1. العوامل المؤثرة علي الغزل الكهربائي:**

تتأثر عملية تحويل محلول البوليمر إلى ألياف نانوية من خلال الغزل الكهربائي بعدة عوامل مختلفة بما في ذلك: (أ) خصائص المحلول مثل اللزوجة و المرونة و التوصيل و التوتر السطحي ، (ب) المعلمات الحاكمة مثل ضغط تغذية المضخة و الجهد الكهربائي و المسافة بين الطرف و مجمع (مستقبل) الألياف، و (ج) الظروف المحيطة مثل درجة حرارة المحلول و الرطوبة و سرعة الهواء في غرفة الغزل الكهربائي (Homaeigohar, S. S: 2011)

**2. الاطار التجريبي:**

من خلال هذه الدراسة قام الباحث بتصنيع ألياف نانوية من بوليمر البولي أكريلونيتريل (PAN) ذات أقطار متماثلة باستخدام تقنية الغزل الكهربائي، و ذلك بالمركز البحثي لعلوم النسيج DTNW بألمانيا، خلال مهمة علمية خارجية قام بها الباحث. و تم تحقيق ذلك من خلال توفير ظروف تصنيع مثالية لهذا الغرض، و قد تم تحليل تأثيرات العديد من معاملات عملية الغزل الكهربائي على أقطار ألياف البولي أكريلونيتريل النانوية الناتجة، كما تم فحص مورفولوجيا الألياف النانوية و قياسها إحصائياً عن طريق مسح (تصوير) المجهر الإلكتروني SEM

**1. 2. تجهيز المحلول البوليمري البولي أكريلونيتريل PAN:**

استخدامه دون مزيد من التنقية، و تم استخدام ثنائي ميثيل فورماميد (DMF) بنسبة تركيز 99.8% من انتاج شركة Roth كمنظف عضوي للبولي أكريلونيتريل، كما تم استخدام جهاز غزل الكتروني تم تصنيعه بمعهد DTNW الألماني.

**منهج البحث Methodology:**

انتهجت الدراسة المنهج التجريبي في اجراء الاطار العملي للدراسة وكذلك للحصول علي النتائج وتحليلها.

**مصطلحات البحث Terminology:**

أ. **الغزل الكهربائي:**

الغزل الكهربائي ، المعروف أيضاً باسم الغزل الكهروستاتيكي ، هو طريقة لإنتاج ألياف فائقة النعومة بأقطار تتراوح من أقل من 10 نانومتر إلى أكثر من 10 ميكرومتر، حيث لا تستطيع تقنيات غزل الألياف الميكانيكية التقليدية إنتاج ألياف بأقطار أصغر من 2 ميكرومتر (Dzenis, Y: 2004). هذا و قد اكتسب الغزل الكهربائي اهتماماً متزايداً في العقد الماضي بسبب الاهتمام المتزايد بتكنولوجيا النانو (Bhardwaj, N., Kundu, S, C: 2010)

ب. **البولي أكريلونيتريل PAN:**

بولي أكريلونيتريل (PAN) ، عبارة عن بوليمر عضوي اصطناعي شبه بلوري يحمل الصيغة (C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>N)<sub>n</sub>، و على الرغم من أنها لدائن حرارية ، إلا أنها لا تذوب في الظروف العادية، حيث يتحلل قبل الذوبان و يذوب فوق 300 درجة مئوية إذا كانت معدلات التسخين 50 درجة في الدقيقة أو أعلى (Heikkilä, P., Harlin, A: 2009)

ج. **ثنائي ميثيل فورماميد (DMF):**

ثنائي ميثيل فورماميد (DMF) هو مركب عضوي بالصيغة (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NC(O)H، و يستخدم ثنائي ميثيل فورماميد بشكل أساسي كمنظف صناعي، و تستخدم محاليل ثنائي ميثيل فورماميد لمعالجة ألياف البوليمر والأغشية و الطلاء السطحي ؛ للسماح بغزل ألياف البوليمرات بسهولة ؛ و لإنتاج مينا الأسلاك ، و أيضا كوسيط تبلور في صناعة الأدوية (Wikipedia: 2019)

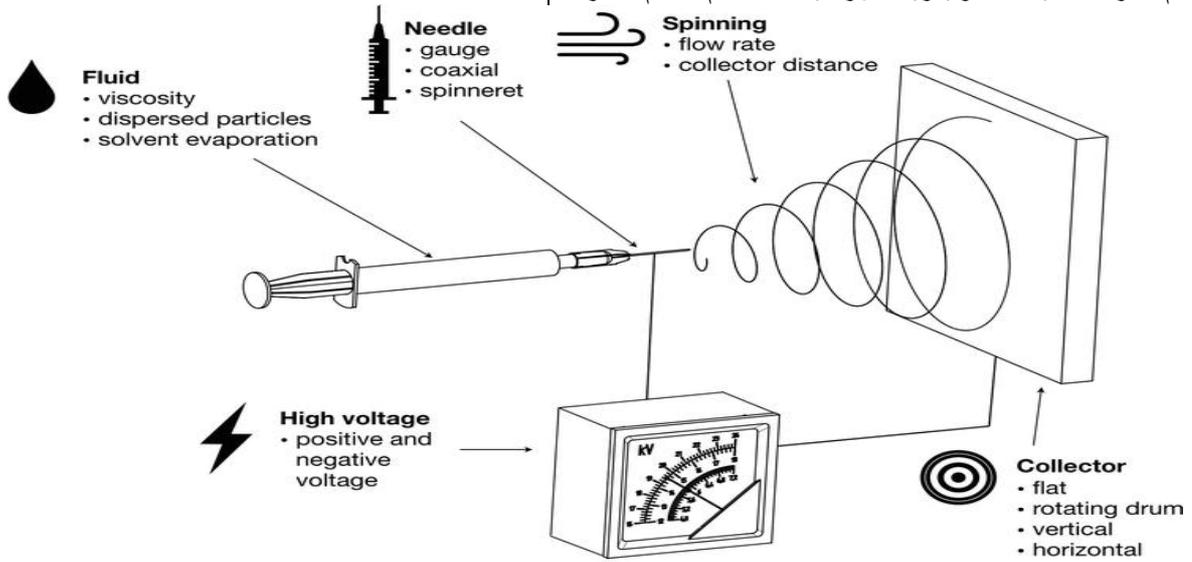
د. **المسح المجهر الإلكتروني (SEM):**

المسح (التصوير) المجهر الإلكتروني (SEM) هو تقنية متقدمة للحصول على صورة تحتوي على قدر كبير من التفاصيل والدقة. يمكن أن يوفر SEM معلومات عن تضاريس السطح ، و التركيب البلوري ، و التركيب الكيميائي و السلوك الكهربائي لمساحة نانومتر واحد أو نحو ذلك من العينة. و المجاهر الإلكترونية هي أدوات علمية تستخدم حزمة من الإلكترونات النشطة لفحص الأشياء على نطاق دقيق للغاية، و قد تم تطوير المجاهر الإلكترونية بسبب قيود المجاهر الضوئية التي تحددها فيزياء الضوء (Seyforth, A, J: 2016)

**الإطار النظري Theoretical Framework**

أ. دراسة **Sherif, F (2021):** واهتمت الدراسة بابرار كافة التطبيقات التي تعتمد منتجاتها بشكل كبير علي الألياف الدقيقة التي تنتجها تقنية الغزل الكهربائي. و عرضت الدراسة عرضاً إحصائياً لما تم انتاجه من أبحاث علمية متعلقة بهذا الشأن، و مدي التزايد المستمر للبحث العلمي بهذا المجال، و تبين أنه منذ عام 2000 كانت هناك زيادة تقريبية بنسبة 20% سنوياً في عدد مقالات المجلات المنشورة حول العالم ، و التي استخدمت مفهوم "الغزل الكهربائي" في أبحاثهم. كما عرضت الدراسة تطور الحالة التسويقية لمنتجات تقنية الغزل الكهربائي بالأسواق العالمية، و مدي

الكهربائي الذي طوره مركز أبحاث DTNW الألماني، ويتألف من مصدر طاقة تيار مستمر من نوع (Heinzinger) ومحقنة (حجم 6 سم 3) و إبرة للمحقنة و مستقبل للألياف (لوحة تجميع). تم تثبيت المحقنة بجهاز ضخ من نوع (Landgraf Laboratory Systems) أفقيًا و تم توصيله بالإبرة باستخدام أنبوب. تم توجيه طرف الإبرة عموديًا على المجمع. و من أجل الحفاظ على تقطير ثابت و متكرر من طرف الإبرة ، تم تطبيق ضغط ثابت على محلول البوليمر بواسطة جهاز الضخ المشار اليه و الذي يحتوي علي مضخة صغيرة تدفع نهاية المحقنة، ثم يتحرك محلول البوليمر باتجاه طرف الإبرة. و يوضح الشكل التخطيطي (1) ميكانيكية و فكرة عمل جهاز الغزل الالكتروني لانتاج ألياف نانوية دقيقة الأقطار.



شكل 1: رسم تخطيطي لميكانيكية عمل جهاز الغزل الكهربائي (Rivero, J,P, et al: 2020)

بوليمرية كثيرة و متعددة من المحلول تظهر في شكل نقاط دائرية، و ذلك عند استخدام أقل فولت كهربائي (17 ك.ف)، كما تظهر الألياف دقيقة و غير منتظمة، و مع زيادة الفولت الي 20 ك.ف بدأت التكلسات البوليمرية في الانخفاض مع استمرار وجودها، و مع زيادة الفولت الكهربائي الي أعلى معدل (23 ك.ف) قلت التكلسات البوليمرية. فبسبب انخفاض تركيز المحلول، يزداد عدد الألياف و تقل أقطارها و تزداد عشوائيتها و تظهر التكلسات البوليمرية، و ذلك عند استخدام تيارات كهربائية مختلفة.

و بالنظر الي الشكل 3 (أ، ب، ج) ، فنجد أنه قد تم انتاج ألياف مغزولة كهربائيا من محلول PAN ذات تركيز 10%، و هو تركيز أكثر لزوجة من المحلول السابق. و قد لوحظ أن الألياف قد بدأت تتشكل بسلاسة و بدت أقطار الألياف متماثلة. و عند استخدام تيار كهربائي بقيمة 17 ك.ف، فقد تم رصد تكلسات قليلة من المحلول البوليمري في شكل نقاط متبعثرة. و عند استخدام تيار كهربائي بقيمة 20 ك.ف، فقد لوحظ انخفاض تكلسات المحلول البوليمري تماما. أما عند استخدام تيار كهربائي بقيمة 23 ك.ف، فقد لوحظ اختفاء التكلسات تماما، و أنه يمكن رؤية الألياف بشكل أكثر وضوحاً

و وفقاً لصور المسح المجهرية فإنه من خلال الشكل 4 (أ، ب، ج)، فقد تم انتاج ألياف مغزولة كهربائيا من محلول PAN عالي التركيز (15%). و قد لوحظ وجود تكلسات قليلة جداً من المحلول البوليمري عند استخدام تيار كهربائي بقيمة 17 ك.ف، مع وضوح

البولي أكريلونيتريل هو بوليمر كاره للماء له خصائص ميكانيكية رائعة على الرغم من كراهيته للماء، و تعتبر الأغشية المتكونة من ألياف البولي أكريلونيتريل مرشحة (مفلترة) ممتازة و تستخدم للعديد من التطبيقات، نظراً لخصائص سطحها المتميزة و التي تؤهلها لذلك. البولي أكريلونيتريل (PAN) الذي تم استخدامه بالدراسة هو من شركة Dralon و قد تم استخدامه دون مزيد من التنقية. كما تم استخدام ثنائي ميثيل فورماميد (DMF) بنسبة تركيز 99.8% من شركة Roth و ذلك لاذابة و اطلاق البولي أكريلونيتريل (PAN). كما تم تحضير تركيزات مختلفة من ذلك المحلول (PAN / DMF) و هي 5%، و 10%، و 15% عن طريق التقليب عند درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة 24 ساعة للحصول على محلول متجانس.

## 2.2. غزل ألياف البولي أكريلونيتريل PAN كهربائياً:

تم غزل الألياف البوليمرية كهربائياً باستخدام نظام الغزل

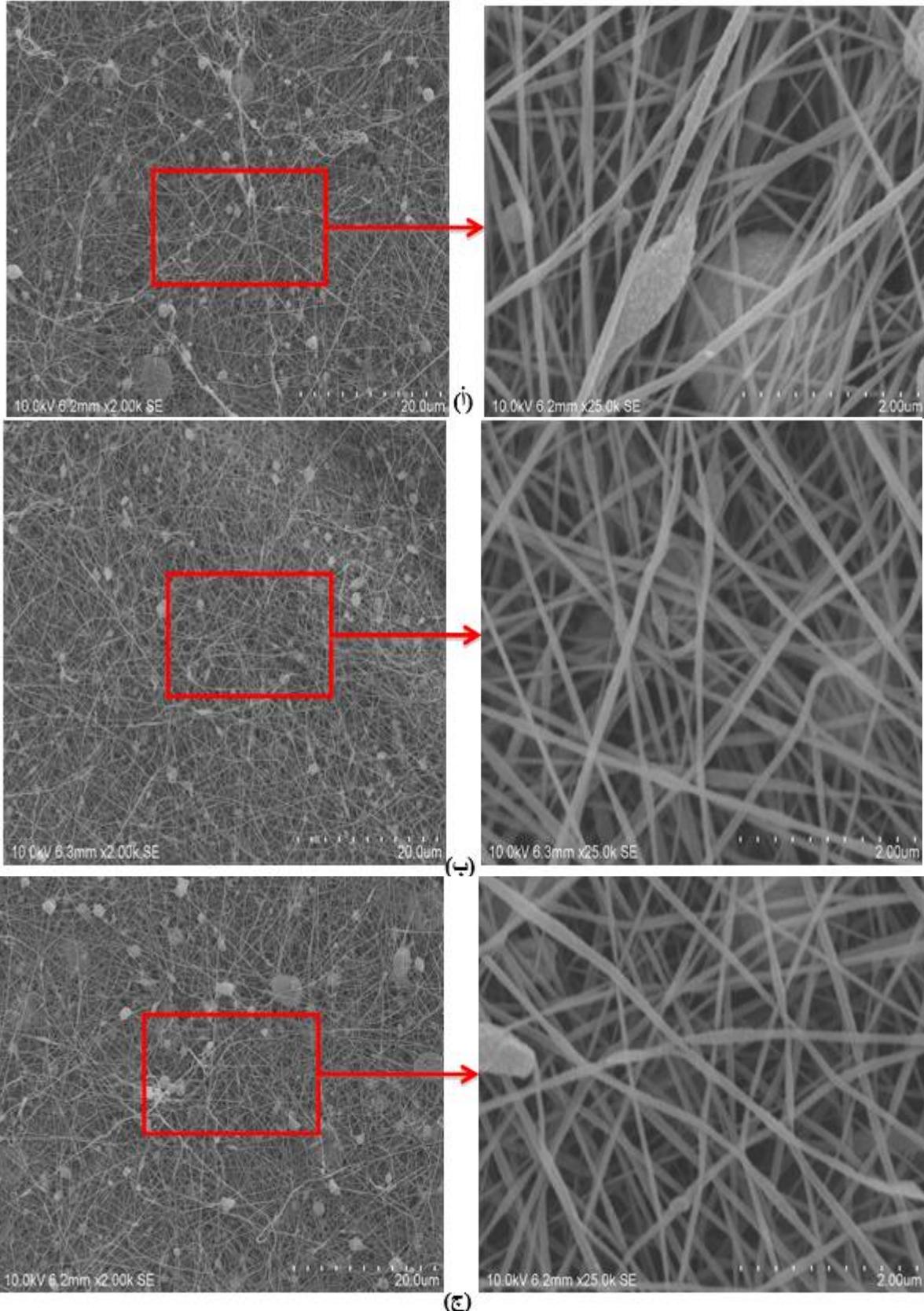
كانت المسافة بين طرف الإبرة و لوحة التجميع 20 سم ، وكانت مقادير الجهد الكهربائي محل الدراسة هي 17 و 20 و 23 كيلو فولت علي الترتيب. كان معدل تدفق محلول البوليمر أثناء الضخ 0.4 مل / ساعة. بعد الغزل الكهربائي ، تم تحليل العينات عن طريق المسح المجهر الإلكتروني (SEM)، و الذي من خلاله يمكن الحصول علي صور عالية الدقة لجميع أقطار الألياف النانوية متناهية الصغر الناتجة من الغزل الكهربائي، بالإضافة الي توضيح أسطح هذه الألياف بدرجة عالية.

## نتائج البحث Results:

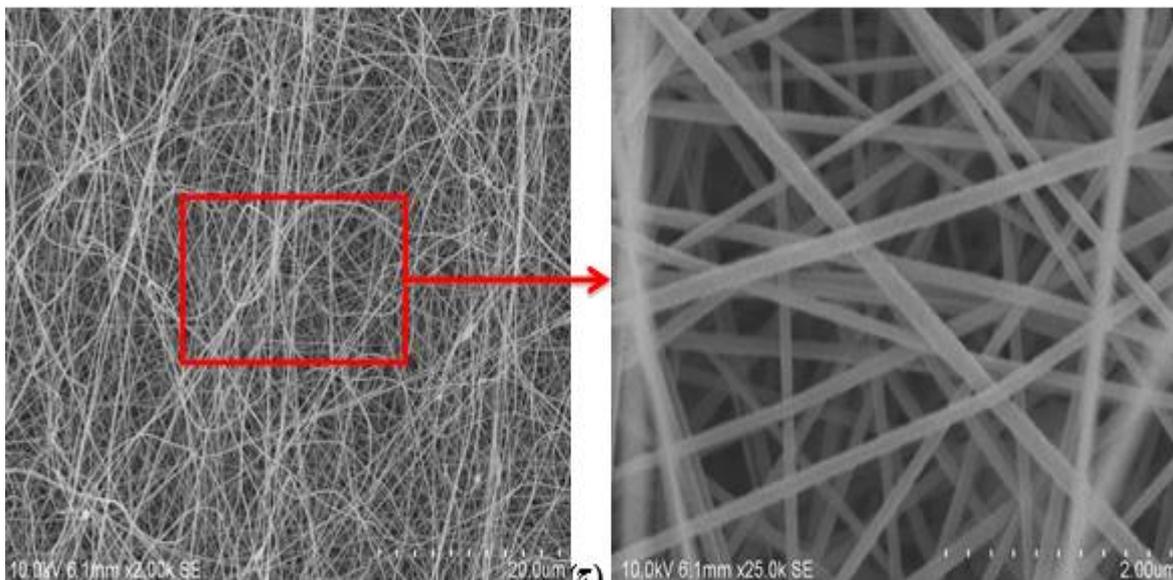
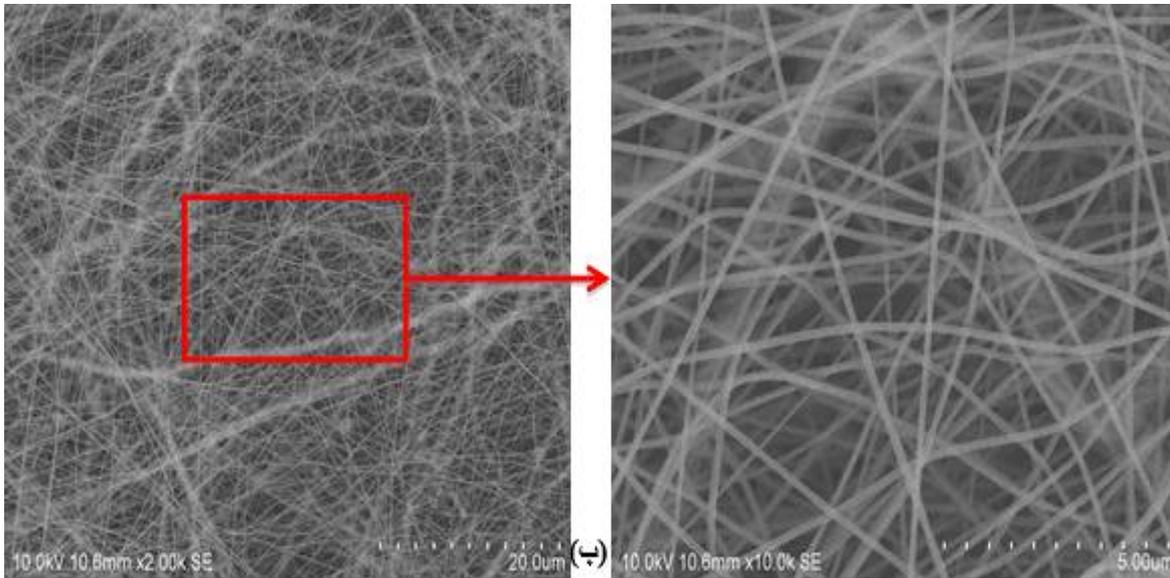
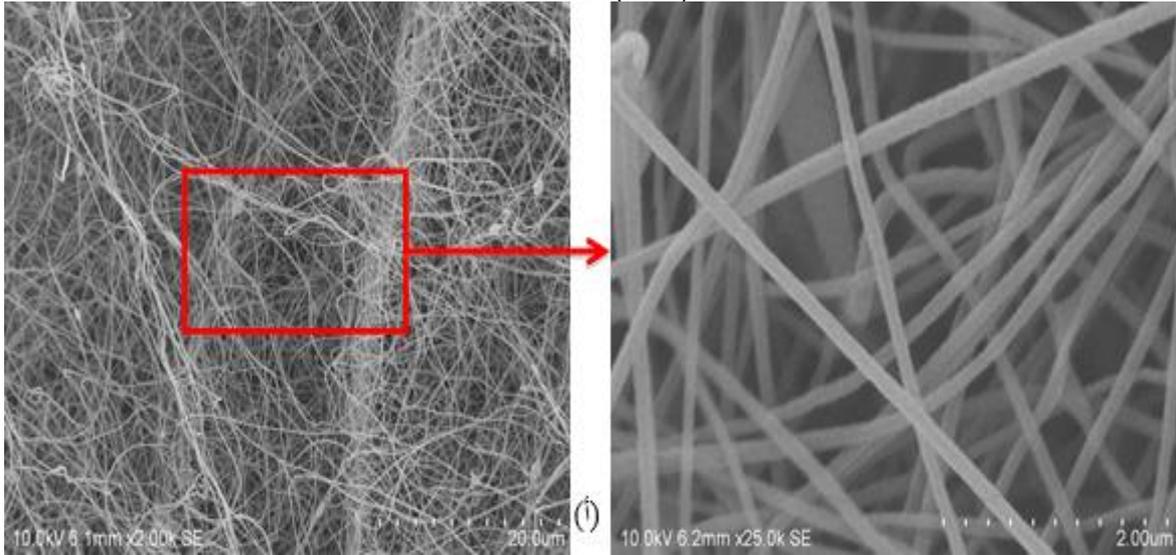
اعتماداً على بعض الدراسات السابقة (Albanil-Sanchez, L, et al: 2013) و (Reneker, D. H, et al: 2000) و (Deitzel, J. M, et al: 2001) ، فقد لوحظ أن معدل لزوجة المحلول تزداد أضعافاً مضاعفة مع زيادة تركيز PAN. و بتطبيق هذا المبدأ بهذه الدراسة، فهذا يعني أن محلول PAN 5% لديه أقل معدل لزوجة ، و أن محلول PAN 15% لديه أعلى معدل لزوجة مقارنة بالمحاليل الأخرى. و وفقاً لصور المسح المجهرية SEM و التي تظهر في الأشكال 2 و 3 و 4 ، فإن هناك تباين و اختلاف واضح بين أشكال الألياف الناتجة من المحاليل الثلاثة محل الدراسة. ففي الشكل 2 (أ، ب، ج) و الذي يظهر الألياف المغزولة كهربائياً و الناتجة من استخدام المحلول الأقل تركيزاً (5% PAN). فإنه يمكن ملاحظة وجود تجمعات (تكلسات)

عندما كان تركيز المحلول 5% هو الأدنى مقارنة بالتركيزات الأخرى. و بعد زيادة الجهد الكهربائي إلى 20 ك.ف، سجلت قطر الألياف قيمة متوسطة عندما كان تركيز المحلول بنسبة 10%. بينما سجل قطر الألياف عندما كان تركيز المحلول 15% أعلى قيمة عند الجهد 23 ك.ف. هذا يعني أن أقطار الألياف تزداد بازدياد نسبة لزوجة المحلول، و أيضا بازدياد الجهد الكهربائي.

كامل و جيد لتشكيل الألياف ممتاثلة الأقطار، مع ملاحظة عدم رؤية أي تكلسات عند استخدام التيار الكهربائي بجهد 20 و 23 ك.ف. و يوضح شكل 5 العلاقة بين أقطار الألياف المغزولة كهربائيا، و لزوجة المحلول و الجهد الكهربائي، حيث أنه في حالة تطبيق جهد كهربائي 17 ك.ف ، كان قطر الألياف التي تم الحصول عليها

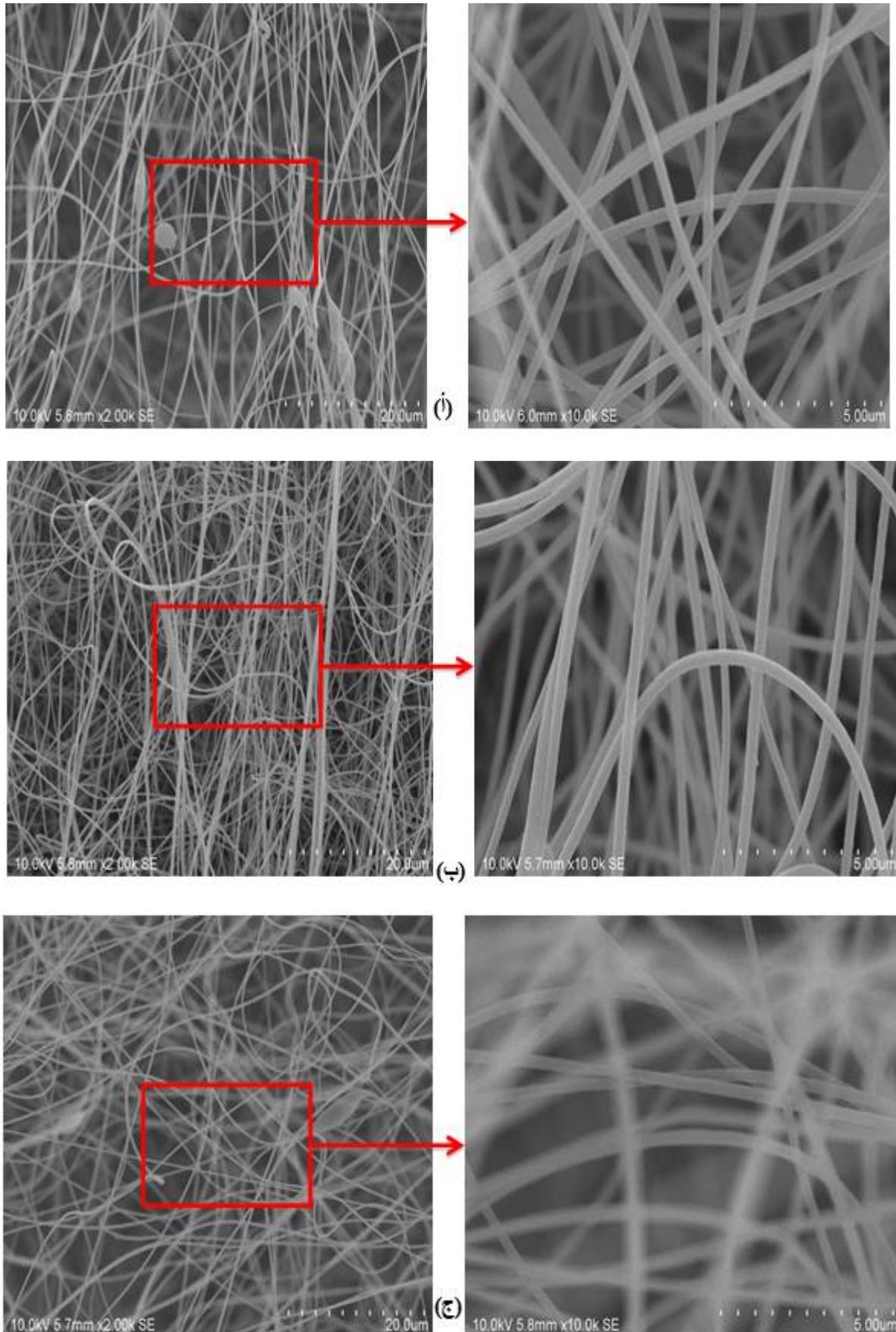


شكل 2: صور المسح المجهرى للألياف المغزولة كهربائياً عند تيار كهربى (أ) 17 ك.ف, (ب) 20 ك.ف, (ج) 23 ك.ف, و ذلك لمحول (PAN) تركيز 5%



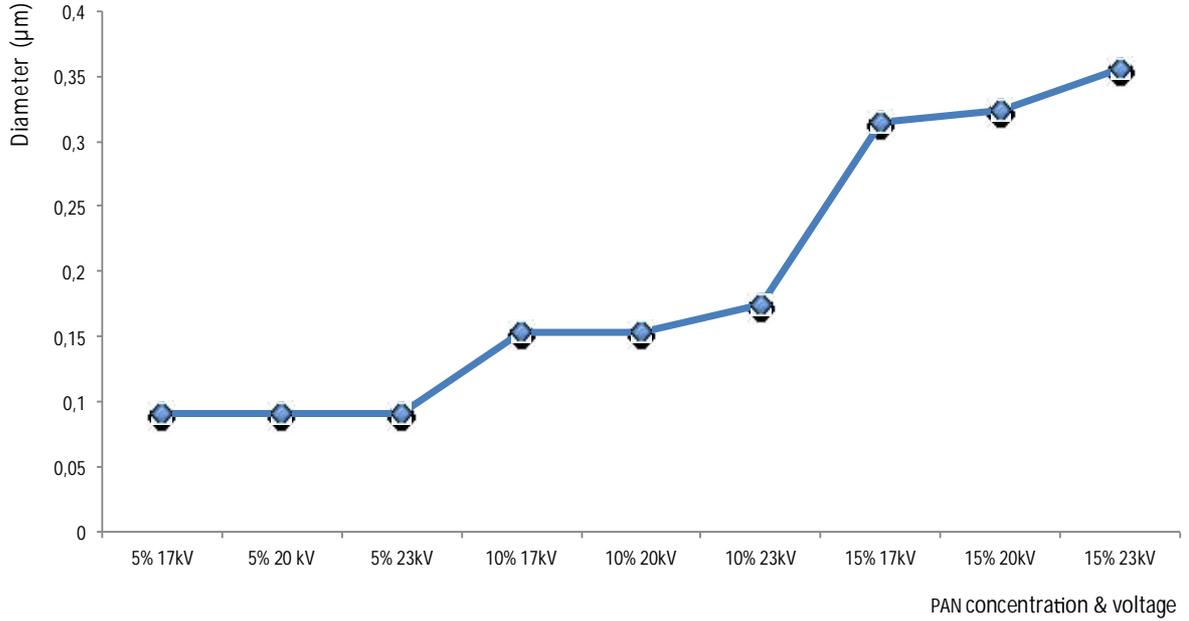
شكل 3: صور المسح المجهرى للألياف المغزولة كهربائياً عند تيار كهربى (أ) 17 ك.ف, (ب) 20 ك.ف, (ج) 23 ك.ف, و ذلك لمحول

(PAN) تركيز 10%



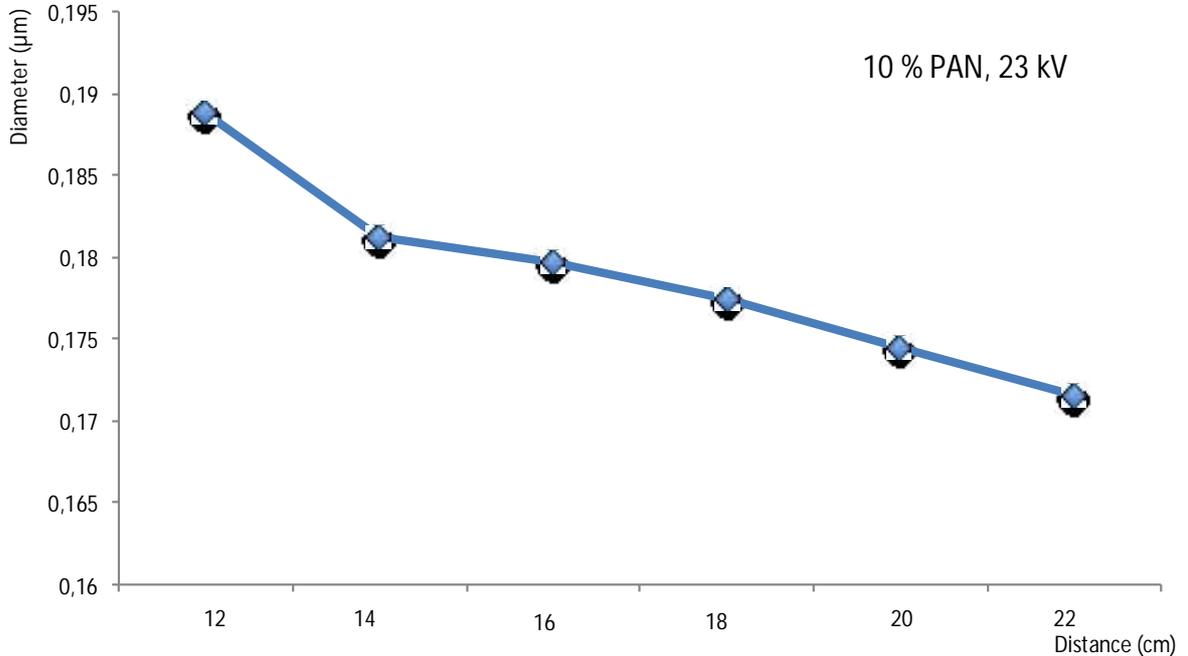
شكل 4: صور المسح المجهرية للألياف المغزولة كهربائياً عند تيار كهربائي (أ) 17 ك.ف, (ب) 20 ك.ف, (ج) 23 ك.ف, وذلك لمحول

## تركيز 15% (PAN)



**شكل 5:** العلاقة بين أقطار الألياف المغزولة كهربائياً، ولزوجة المحلول و الجهد الكهربائي جهد كهربائي ثابت (23 ك.ف). و من الشكل 6 يتضح أنه أثناء زيادة المسافة بين طرف الابرة ومجمع الألياف، فإن ذلك يؤدي إلى تقليل قطر الألياف.

بعد ذلك تم دراسة التغيرات في المسافة بين طرف ابرة ضخ محلول PAN و بين مستقبل (مجمع) الألياف المغزولة، و مدي تأثيرها على تشكيل الألياف وقطرها. و لمعرفة ذلك تم استخدام معلمتين ثابتتين و هما (تركيز محلول PAN والجهد الكهربائي) حيث تم اسخدام محلول PAN ذات تركيز ثابت 10%، و أيضا



**شكل 6:** العلاقة بين المسافة بين طرف ابرة ضخ المحلول و مجمع الألياف، و قطر الألياف المغزولة الكهربائي، و هذا دليل على أن اللزوجة والجهد الكهربائي المستخدمان يحددان تدفق المحلول عبر طرف ابرة المضخة. و لهما تأثيراً مباشراً على شكل وطول الألياف. كما أثبتت الدراسة أن المسافة بين طرف ابرة مضخة المحلول و مجمع (مستقبل) ألياف البولي أكريلونيتريل (PAN) المغزولة كهربائياً، لها تأثير واضح على قطر الألياف أيضاً. فكلما زادت المسافة قل قطر

المسافة بين طرف ابرة ضخ المحلول و مجمع الألياف، و قطر الألياف المغزولة

**المناقشة Discussion:**

مما سبق عرضه، فإن النتائج قد أظهرت أن أقطار ألياف البولي أكريلونيتريل (PAN) المغزولة كهربائياً تزداد بزيادة لزوجة المحلول البوليمري و كذلك تزداد بزيادة الجهد الكهربائي المستخدم. و تقل أقطار الألياف بانخفاض لزوجة المحلول و الجهد

8. Deitzel, J. M.; Kleinmeyer, J.; Harris, D.; Beck Tan, N.C, 2001: The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles, *Polymer Journal*, vol. 42, pp 261-272.
9. Rivero, J.P., Vicente, A., Rodriguez, J. R., 2020: Electrospinning Technique as a Powerful Tool for the Design of Superhydrophobic Surfaces, *Handbook of 21st Century Surface Science*, IntechOpen Publications.
10. Esfahani, H., Jose, R., Ramakrishna, S., 2017: Electrospun Ceramic Nanofiber Mats Today: Synthesis, Properties, and Applications, *Materials Journal (Basel)*, vol. 10(11).
11. Lilin, L., Peng, S., Kong, J., Lee, Y., Ji, D., Srinivasan, M., Ramakrishna, S., 2017: Electrospun hollow nanofibers for advanced secondary batteries, *Nano Energy Journal*, vol. 39, Pages 111-139.
12. Hasan, M, M., Alam, A, K, M., 2014: APPLICATION OF ELECTROSPINNING TECHNIQUES FOR THE PRODUCTION OF TISSUE ENGINEERING SCAFFOLDS: A REVIEW, *European Scientific Journal*, vol.10, No.15.
13. Vollath, D., 2008: *Nanomaterials: An Introduction to Synthesis, Properties and Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim.
14. Guo, Z., Tan, L., 2009: *Fundamentals and Applications of Nanomaterials*, Artech House, Boston.
15. Bhardwaj, N., S. C. Kundu, S, C., 2010: *Electrospinning: A Fascinating Fiber Fabrication*
16. *Technique*, *Biotechnology Advances Journal*, vol. 28:325.
17. Dzenis, Y., 2004: Spinning continuous fibers for nanotechnology, *Science Journal*, vol. 304(5679).
18. Sherif, F., 2021: Utilizing electro-spinning technique, in various functional textiles industries, *International Design Journal*, vol. 11, issue. 2
19. Seyforth, A, J., 2016: *Scanning Electron Microscopy (SEM): An Introduction to the use of SEM for characterizing the Surface Topology and Composition of Matter with Further Applications*, ResearchGate publications.

الألياف، و كلما قلت المسافة ازدادت قطر الألياف. و أثبتت الدراسة أيضا أن أفضل المتغيرات التي تؤدي الي انتاج ألياف نانوية دقيقة ممتائلة الأقطار و يمكن الاعتماد عليها بالعديد من التطبيقات، هي أن يكون الجهد الكهربائي المستخدم هو 23 ك.ف، و أن تكون لزوجة محلول البولي أكريلونيتريل (PAN) هي 10 %، و أن تكون المسافة بين طرف ابرة مضخة المحلول و مجمع الألياف هي 22 سم. هذا و يمكن أن تجد الألياف التي تم الحصول عليها من خلال هذه الدراسة، تطبيقات مهمة في العديد من المجالات مثل ترشيح المياه وأجهزة الاستشعار النانوية والعديد من التطبيقات الأخرى.

### التوصيات Recommendations

أ. للحصول علي ألياف نانوية مغزولة كهربائيا من بوليمر البولي أكريلونيتريل (PAN) ذات أقطار دقيقة و ممتائلة، توصي الدراسة باستخدام المتغيرات المذكورة بالدراسة.  
ب. كما توصي الدراسة بضرورة استكمال الأبحاث و الدراسات بمجال الغزل الإلكتروني للألياف، لما لها من أهمية بالغة في انتاج ألياف نانوية دقيقة الأقطار، يمكن استخدامها و تطبيقها بالعديد من المجالات المختلفة.

### المراجع References

1. Subbiah, T.; Bhat, G. S.; Tock, R. W.; Parameswaran, S.; Ramkumar, S. S, 2005: Electrospinning of Nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 96(2), pp 557-569.
2. Heikkilä, P.; Harlin, A, 2009: Electrospinning of polyacrylonitrile (PAN) solution: Effect of conductive additive and filler on the process, *Polymer Letters Journal*, vol.3(7), pp 437-445.
3. Lannuttia, J.; Reneker, D.; Mac, T; Tomaskod, D.; Farsone, D, 2007: Electrospinning for tissue engineering scaffolds, *Materials Science and Engineering Journal (C)*, vol. 27 (3), pp 504-509.
4. Matthew, T.; Timothy, H.; Long, E, 2008: Electrospinning functional nanoscale fibers: a perspective for the future, vol. 57 (3), pp 385-389.
5. Homaeigohar, S. S, 2011: *Functional Electrospun Nanofibrous Membranes for water filtration*, PhD Thesis, Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
6. Albanil-Sanchez, L.; Piza-Betancourt, J. L.; Cruz-Silva, R, 2013: Electrospun nylon nanofibers for polymer composites, *Emerging Materials Research Journal*, vol. 2 (EMR1), pp 35-57.
7. Reneker, D. H.; Yarin, A.L.; Fong, H.; Koombhongse, S, 2000: Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning, *Journal of Applied Physics*, vol. 87(9), pp.4531-4547.