

تأثير الجهد المطبق وقطر الإبرة في مرفولوجيا ألياف نانو بولي أميد-6,6 المتشكلة بتقنية الغزل الكهربائي

م. أحمد عبد الكريم*

د.م. محمد علي السيد علي***

د. إبراهيم الغريبي**

الملخص

نُفذ في هذا العمل تشكيل ألياف نانومترية من البولي أميد6,6 باستعمال تقنية الغزل الكهربائي. درسنا تأثير الجهد المطبق وقطر رأس الإبرة في مرفولوجيا الألياف المتشكلة (متوسط القطر، والارتفاع وخشونة السطح)، ووصفنا الألياف الناتجة بواسطة المجهر الضوئي ومجهر القوى الذرية (AFM)، وقد حصلنا على ألياف خطية، ملساء، طويلة ومستمرة وبأبعاد نانومترية، كما تبين أن أبعاد الألياف المتشكلة تناقصت بشكل واضح عند استخدام بارامترات معينة (جهد مطبق عالٍ، قطر رأس تشكيل صغير). هذا يقود بدوره إلى تحسين الخصائص الميكانيكية، والفيزيائية والبيولوجية للألياف المتشكلة، وتزيد من نشاطها الكيميائي، مما يزيد من إمكانية تطبيقها في تطوير وسائل الترشيح وتنقية المياه ومنظومة الفلاتر وزيادة كفاءة عملها.

الكلمات المفتاحية: تقنية الغزل الكهربائي، الألياف النانومترية، بولي أميد-6,6، مجهر القوى الذرية AFM.

*أعد هذا البحث في سياق رسالة الماجستير للطالب أحمد عبد الكريم بإشراف الدكتور إبراهيم الغريبي ومشاركة الدكتور محمد علي السيد علي.

**مدرس في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة دمشق.

***مدرس وباحث في قسم الفيزياء التطبيقية - المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق.

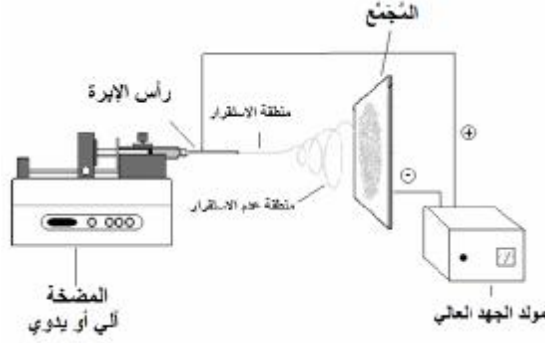
1- المقدمة:

مولد جهد عالٍ يراوح بين (0-30kV) الذي يعمل على تحريض القوى الكهربائية الساكنة للبوليمير أو السائل [13]. تُعدُّ ألياف النانو إنجازاً من أعظم إنجازات التقانة النانوية، وهي عبارة عن ألياف اسطوانية الشكل، يمكن أن تكون مجوفة أو مصمتة، وذات أقطار متناهية في الصغر يمكن أن تصل إلى أقل من 100nm، وقد يمتد طول الليف الواحد إلى أطول من ذلك بألاف المرات (عدة سنتيمترات) ليُشكل بذلك ليفاً نانويّاً، بُعدان من أبعاده من رتبة النانومتر. تمتاز الألياف النانوية، فضلاً عن أبعادها المتناهية في الصغر، بمسامية عالية مع تراكب مسامي مميّز و سطح نوعي ناعم وأملس وأداء ميكانيكي متفوق (الصلابة وقوة الشد والمرونة العالية)، ونسبة سطحها إلى حجمها كبيرة جداً. يقود تصغير أبعاد الألياف إلى المستوى النانوي إلى زيادة كبيرة لمساحة السطح الخارجي للألياف، ومن ثمّ الزيادة في عدد الذرات المتوضعة على السطح، إذ تتضاعف أعدادها تضاعفاً كبيراً عند الوصول إلى المستوى المتناهي في الصغر، وهذا يؤدي بدوره إلى تحسين خصائصها الميكانيكية، والفيزيائية، والكهربائية، والبيولوجيا، وتزيد من نشاطها الكيميائي. إن هذه البنية التركيبية للألياف النانوية والخصائص الفريدة التي تتمتع بها تجعلها مجالاً اجتذاباً كبيراً من الدراسات الأكاديمية والبحوث العلمية والتطبيقات الصناعية المتطورة. إذ تسمح تلك الميزات باستخدام الألياف النانوية في مجال واسع من التطبيقات المتنوعة كالدعامات الحيوية bioscaffold المستخدمة كتطبيق في هندسة الأنسجة [14]، والألبسة الواقية وخلايا الوقود والأجهزة الالكترونية النانوية ومجسات نانوية وتضميد الجروح Wound Dressing وتوصيل الدواء Drug Delivery [15,16]، فضلاً عن استخدامها في تطبيقات المرشحات الهوائية والتدفئة والتهوية والزيت والمرشحات الصيدلانية والكمادات، والمرشحات

تقنية الغزل الكهربائي Electrospinning (ES) هي اختصار لمصطلح الغزل بالكهرباء الساكنة Electrostatic spinning، التي هي إحدى الطرائق الحديثة الأكثر شيوعاً لتشكيل ألياف مستمرة مصمتة [1]، أو مجوفة [2]، أو مسامية [3]، ذات أبعاد ميكروية أو نانومترية (عشوائية أو منتظمة) [5,4]. يمكن أن تستخدم في هذه التقنية محاليل سيراميكية تحضر بطريقة هلام - جل [2]، أو مجموعة من المواد البوليميرية (الصنعية [6] منها والطبيعية [7] والبيولوجية [8]) على شكل محلول [9] أو مصهور بوليميري [10] أو مزيج بوليميري [11] أو مواد مركبة.

وتتدرج هذه التقنية ضمن التقنيات الميكانيكية والفيزيائية والكهربائية لتشكيل مواد وبنى بأبعاد ميكروية أو نانومترية، وتصنف أيضاً ضمن الطرائق الصعودية (أدنى-أعلى: bottom-up). كما تُعدُّ من أفضل التقنيات لإنتاج ألياف نانوية بصورة مستمرة وطويلة مقارنة بتقنيات منافسة لها كالتقنيات الميكانيكية أو قوس التفريغ الكهربائي Arc discharge وبعض تقنيات الإبيتاكسي Epitaxy [13,12]. تتميز تقنية الغزل الكهربائي عن الطرائق الأخرى الموازية لها، والمستعملة أيضاً في إنتاج الألياف النانوية، بأنها سهلة التطبيق وبسيطة ومتوسطة الكلفة ولا تحتاج إلى درجات حرارة مرتفعة، كما أنها لا تحتاج إلى تخلية عالية، ويمكن تطبيقها على مساحات واسعة وهي تقنية اقتصادية وغير معقدة وقابلة للتطبيق الصناعي، فضلاً عن إمكانية التحكم من خلالها بعدد كبير من البارامترات المتعلقة بطبيعة المادة والمنظومة ككل والوسط المحيط بهدف تحسين الخصائص البنوية ومرفولوجيا الألياف المشكّلة. تعتمد هذه التقنية على تطبيق حقل كهربائي مرتفع بواسطة

والمُنْتَظَمَ وَرَكَازَةَ (زجاج، ألمنيوم، سليكون،....) وقد استعملنا الرَكَازَاتِ الزَّجَاجِيَّةَ.



الشكل (1) النظام الهيكلي للغزل الكهربائي

المخطط الأكثر شيوعاً لمنظومة الغزل الكهربائي موضَّح في الشكل (1)، إذ يوضع المحلول البوليميري ضمن السيرنغ لضخه بشكل يدوي والتحكم بمعدل التدفق وكميته، وأيضاً لتوليد ضغط مستمر يُسهل عملية تدفق السائل من خلال الإبرة. توصل الإبرة بالقطب الموجب لمنع الجهد العالي في حين يوصل الأرضي (القطب السالب) بالركازة.

يمكن تلخيص أهداف الدراسة كالاتي:

- توليد ألياف النانو بوليمير البولي أميد 6/6. لتكون جاهزة للتطبيقات الصناعية (منظومة الفلاتر والألبسة الواقية).

- توطين تقنية جديدة من تقنيات إنتاج الألياف النانوية أو ما يعرف بتقنية الغزل الكهربائي.

- تحسين مرفولوجيا الألياف البوليميرية بدراسة أهم المعاملات والبارامترات التي يمكن التحكم بها بتقنية الغزل الكهربائي.

- توصيف ألياف النانو، باستخدام المجهر الضوئي ومجهر القوة الذرية.

3- العمل التجريبي:

1-3: تحضير العينة وتشكيل الألياف:

لتحضير العينات المدروسة نقوم بحل 1,7g من حبيبات البولي أميد-6,6 ($M_w \sim 262,35g/mol$) في

المستخدمة في التطبيقات الطبية، ومرشحات مياه الشرب ومعالجة المياه الملوثة لتنتجها سواء من المعادن الثقيلة أو من الميكروبات [17].

الألياف المتولدة بتقنية الغزل الكهربائي يمكن أن تكون على شكل ألياف خطية منتظمة غير محبوكة أو على شكل شبكة من الألياف العشوائية المحبوكة مع بعضها بعضاً مشكلة ما يعرف بالنسيج النانوي nanoweb [18].

يوجد العديد من المواد التي تدخل في صناعة الألياف وتطبيقاتها، معظمها يمكن أن يكون من البوليميرات الطبيعية أو الصناعية، وأبرز البوليميرات الصناعية المستعملة في هذا المجال، طائفة البولي أميدات (تدعى عادةً النايلون) التي تتميز عن الألياف البوليميرية الأخرى بالمثانة، وقوة التحمل، والمرونة، وسهولة امتصاص الصباغ ووزن نوعي منخفض. وأكثرها انتشاراً هو النايلون-6,6 الذي تدخل أليافه المصنعة تقليدياً كمادة تقوية في المواد المركبة، وعند إنتاجه كليف نانوي تتحسن خصائصه تحسناً كبيراً، وهذا يقود بدوره إلى إمكانية استخدامه في تطبيقات جديدة ومتنوعة [19].

2- توصيف العمل:

دُرِسَ في هذا العمل أهم العوامل التي تتحكم بشكل الألياف وأبعادها (متوسط قطر الليف، والارتفاع)، وخشونة السطح باستخدام تقنية الغزل الكهربائي.

يتكون نظام الغزل الكهربائي المُستعمل كما هو موضَّح بالشكل (1) من الأجزاء الرئيسية الآتية: سرينغ أو محقنة، ومضخة سرينغ (pump syringe) آلية ويمكن أن تكون يدوية (آلية الضخ المستعملة في هذا العمل يدوية)، تستخدم عادةً لضبط معدل المحلول البوليميري المقذوف وكميته، ومولد جهد عالٍ مستمر DC، واستعمال جهد متناوب AC ممكن أيضاً [20]، يراوح بين (0-30kV)، إبر معدنية مجوفة مختلفة الأقطار، ومحلل بوليميري، ومُجمَعٌ مؤرَّضٌ لتجميع الألياف بصنفيها العشوائي

10mL من حمض النمل تركيزه (85%) بدرجة حرارة الغرفة لنحصل على محلول بتركيز 14wt%. وتجري عملية المزج بواسطة خلاط مغناطيسي، تستمر عملية التحريك مدة 3 ساعات تقريباً حتى تمام انحلال المحلول وتجانسه. نمّد المحلول الناتج للحصول على محاليل بتركيز مختلفة تتناسب مع عملية الغزل الكهربائي، وقد استخدمنا التراكيز الآتية: 7wt% و 10wt% و 14wt%.

درس تأثير تغيير الجهد المطبق في أبعاد الألياف الناتجة ومرفولوجيتها، وذلك من أجل القيم الآتية: 10kV، 15kV، 20kV، 25kV. ومن البارامترات التي استُخدمت تغيير قطر رأس التشكيل وقد استُخدم كل من الأفطار الآتية: Gauge (18, 20, 22G) لدراسة تأثيرها في طوبوغرافيا الألياف المشكّلة. وتجب الإشارة إلى أننا استخدمنا في جميع التجارب المخبرية المنجزة طريقة الغزل الكهربائي الأفقية التي هي أكثر استخداماً وشيوعاً من طريقة الغزل الكهربائي العمودية، وقد تبين من الدراسات المرجعية أن أبعاد الألياف الناتجة بالطريقة الأفقية أصغر بعشر مرات من تلك المتولدة بالطريقة العمودية [21].

كما تجب الإشارة إلى أن التجارب التي أُجريت بتقنية الغزل الكهربائي للمحلول والأفقية تمت بشروط الوسط المحيط نفسها من حيث الرطوبة ودرجة حرارة الغرفة 25°C.

وقبل البدء بعملية تجمّع الألياف على الركازات الزجاجية قمنا بتنظيفها تنظيفاً جيداً باستخدام الأمواج فوق صوتية، وقد أُجريت عملية التنظيف على مرحلتين: غُسِلت في البداية بالكحول مدة 15 دقيقة وغُمست بالمرحلة الثانية بالماء المقطر مدة 15 دقيقة أيضاً، ومن ثم تُركت لتجف بالهواء داخل فرن تجفيف ويستخدم في التجربة. إن تنظيف الركائز يؤدي دوراً مهماً في انتظام الألياف على سطحها وتعيق بشكل غير مباشر تشكّل ما يسمى بالخرزات beads في الألياف.

كما قمنا بتعرّف التفاصيل الدقيقة للتضاريس السطحية ومرفولوجيا الألياف المشكّلة باستخدام المجهر الضوئي ومجهر القوة الذرية (AFM Nanosurf-easyScan2) في نمط النقر Tapping mode. وبعد أخذ الصور عُولجت بواسطة برنامج خاص مُرفق بمجهر القوة الذرية (Nanosurf Report Expert 5.0). تمكنا بواسطته من قياس أبعاد الألياف الناتجة (متوسط قطر الليف وارتفاعه) وكثافتها وخشونة سطحها وتوزعها على السطح.

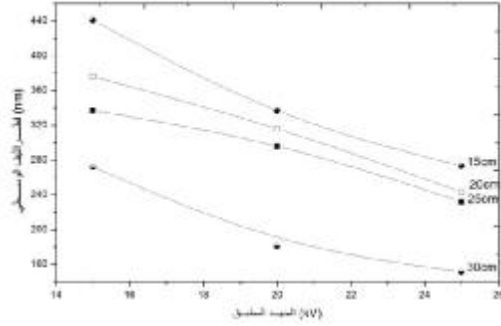
2-3: البارامترات المستعملة في تقنية الغزل الكهربائي:

1-2-3: دراسة تأثير الجهد المطبق:

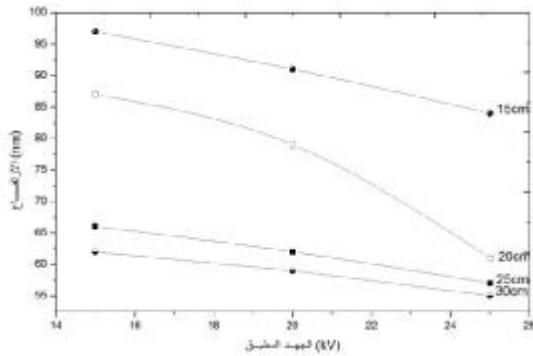
للجهد المطبق تأثير كبير في مورفولوجيا الألياف المشكّلة. ولدراسة هذا التأثير قمنا بدراسة تأثير الجهد المطبق في مرفولوجية الألياف الناتجة؛ وذلك من أجل قيم مختلفة للجهد (15kV حتى 25kV)، بعد تثبيت كل من تركيز المحلول البوليميري عند تركيز (7wt%)، ومسافة 20cm وقطر رأس التشكيل 20G طيلة مدة غزل الألياف وتجميعها على الركازة الزجاجية.

يُظهر الشكل (2) صور مجهر القوة الذرية للألياف الناتجة عن تغيير الجهد المطبق على المحلول البوليميري. فمن أجل قيم منخفضة للجهد المطبق 20kV تتشكل ألياف بأبعاد (قطر الألياف وارتفاعها) كبيرة، وعند زيادة قيمة الجهد المطبق إلى 25kV نلاحظ تناقصاً واضحاً في أبعاد الألياف المشكّلة، وانحيازاً نحو تشكّل خرزات نانوية أو خرزات مرتبطة بعضها مع بعض بخيط أو ليف-beads-on-string تشبه حبات المسبحة. وهذا ما لوحظ من خلال الصور المأخوذة بالمجهر الضوئي الموضحة في الشكل (3) الذي يبيّن وبشكل متسلسل مراحل الانتقال من حبيبات إلى ألياف مروراً بالخرزات.

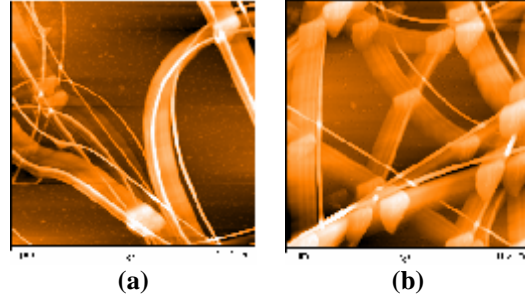
تظهر الأشكال (4)، (5) العلاقة بين الجهد المطبق والمسافة بين الإبرة والمُجمَع ومدى تأثيرهما في كل من متوسط قطر الألياف وارتفاعها.



الشكل (4) تأثير تغير الجهد المطبق عند مسافات مختلفة في متوسط قطر الليف بتثبيت التركيز عند 10wt% وقطر الإبرة عند 22G.



الشكل (5) تأثير تغير الجهد المطبق عند مسافات مختلفة في ارتفاع الليف بتثبيت التركيز عند 10wt% وقطر الإبرة عند 22G. نلاحظ من الأشكال (4)، (5) تناقصاً في متوسط قطر الألياف وارتفاعها بشكل كبير من أجل المسافات الكبيرة نسبياً بين رأس التشكيل والمُجمَع ويزيادة الجهد المطبق. وكما هو واضح من الشكل نلاحظ أن معدل التغير في متوسط قطر الألياف بدلالة الجهد المطبق يكون أكبر ما يمكن من أجل المسافات الصغيرة 15cm. وبمعنى آخر نلاحظ أن هناك تغيراً واضحاً في ميل المستقيم الناتج عن تغيير المسافة بين رأس التشكيل والمُجمَع، إذ إن قيمة الميل تتناقص من 17nm/kV إلى 12nm/kV تقريباً عند تغير المسافة من 15cm إلى 30cm. وكما هو معلوم فإن المسافة



الشكل (2) صور AFM لألياف متشكلة بتقنية الغزل الكهربائي عند تغير قيمة الجهد المطبق (a) 25KV (b) 20KV. عند تركيز 7wt%، مسافة 20cm وقطر إبرة 20G.



الشكل (3) صور مجهر ضوئي (70x70 μm) للألياف المتشكلة بتقنية ES.

كما تُرست العلاقة بين الجهد المطبق والمسافة بين الإبرة والمُجمَع ومدى تأثيرهما في أبعاد الألياف الناتجة. ويوضح الجدول (1) القيم المستعملة للجهد، عند مسافات مختلفة مع تثبيت باقي البارامترات السابقة الذكر طيلة مدة عزل الألياف.

الجدول (1) تغير متوسط القطر والارتفاع للألياف المتشكلة مع تغير المسافة والجهد معاً وذلك عند تركيز 10wt%.

المسافة (cm)	الجهد (kV)	متوسط قطر الليف (nm)	الارتفاع (nm)
15	15	441	97
	20	337	91
	25	273	84
20	15	376	87
	20	316	79
	25	243	61
25	15	337	66
	20	296	62
	25	232	57
30	15	272	62
	20	181	59
	25	151	55

تسبب هذه الزيادة تسارع تدفق القطرات المشكّلة، ومن ثمّ تتناقص مدّة طيران المحلول بين رأس التشكيل والمُجمّع وتشكّل مخروط صغير غير مستقر [24]. كما يؤدي ارتفاع الجهد إلى استطالة كبيرة للمحلول تسببها الزيادة الكبيرة في قوة كولون. وكذلك الزيادة في قيمة الجهد المطبق تؤدي دوراً مهماً في تجفيف الألياف المشكّلة مسببة ارتفاعاً في معدل تبخر المُحل وإزالته بسرعة [26,25].

وتجب الإشارة إلى أن معامل الجهد العالي لا يؤثر فقط في أبعاد تشكّل البنى البوليميرية وكيفيتها، إنما يؤثر أيضاً في تركيبها البلوري. إذ يقوم الحقل الكهربائي خلال عملية الغزل الكهربائي بخلق ترتيب بلوري معين للجزيئات البوليميرية، فتصبح البنى الناتجة بتركيب بلوري جديد يختلف عن التركيب البلوري للمادة الأساسية. فعند تناقص الجهد سوف يتناقص تسارع القطرات المشكّلة وتزداد مدة تطاير المحلول البوليميري. ونتيجة لذلك فإنّ توجيه الجزيئات البوليميرية سوف تأخذ زمناً معيناً حتى يتم فيه توضع البنى النانوية على الركازة، وقبل أن تأخذ الجزيئات البوليميرية بالاصطفاف في زمنها المحدد. لذلك يجب أن يكون هناك زمن تطاير معين تتم خلاله عملية الغزل الكهربائي بشكلها الصحيح. والجهد العالي المطبق عامل كفيل بذلك ويضمن تحسين المواصفات البلورية للبنى المشكّلة وجودتها [27].

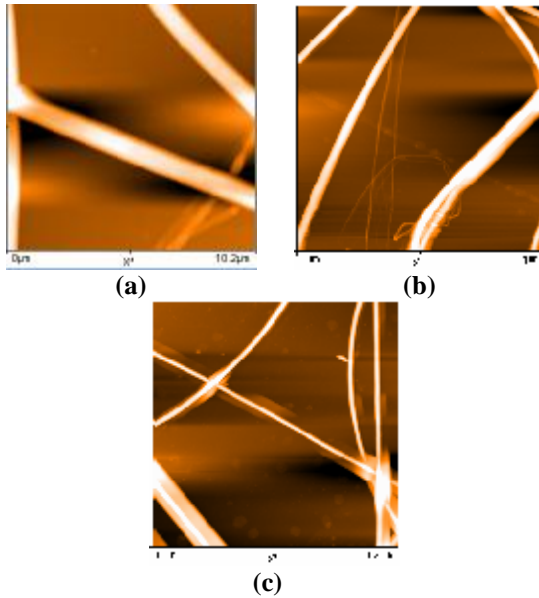
وكما ذكرنا سابقاً في حال قوة حقل كهربائي مرتفعة جداً (جهد مرتفع) يؤدي ذلك إلى اضطراب التدفق وتشكّل تكتلات على طول الليف. نحصل عند زيادة المسافة إلى حدٍ كافٍ على قيمة مثلى لقوة الحقل الكهربائي ويؤدي ذلك إلى خفض التكتلات على طول الليف. إذ إن زيادة المسافة تؤدي إلى إنقاص متوسط قطر الألياف المشكّلة. تؤدي زيادة المسافة في بعض الحالات إلى زيادة في متوسط قطر الليف، وذلك بنقصان قوة الحقل الكهربائي الناشئ الذي يسبب اتساع الألياف المشكّلة [26].

الصغيرة تُنقص من مدّة الطيران الألياف عند عملية الغزل الكهربائي وهذا يؤدي بدوره إلى انخفاض في نسبة تبخر المُحل وإزالته من المحلول البوليميري، وهذا يقود إلى تشكّل ألياف بأقطار كبيرة. وعند زيادة المسافة (إلى أكثر من 15cm) سوف تزداد مدّة الطيران وتكون فرصة تبخر المُحل والحصول على ألياف بأقطار صغيرة أكبر (نتيجة مقارنة من أجل المسافات غير المتفاوتة 25cm، 20). وبزيادة المسافة أكثر فأكثر (30cm) تزداد مدة التطاير وتتناقص أبعاد الألياف بشكل جلي. على سبيل المثال: يتناقص متوسط القطر من 441nm إلى 151nm ومتوسط الارتفاع للألياف من 97nm إلى 55nm عند تغير قيمة الجهد المطبق والمسافة 15cm ⊕ 15kV إلى 30cm ⊕ 25kV. فمن أجل قيمة مرتفعة للجهد المطبق 25kV ومسافة كبيرة 30cm يتناقص متوسط قطر الليف بنسبة 66% ويتناقص الارتفاع بنسبة 43%. في حين أن نسبة التناقص في قطر الليف تقتصر فقط على 15% من أجل المسافات المتقاربة (15cm حتى 25cm) وجهد مرتفع 25kV، وهي نسبة منخفضة جداً. لذلك يُفضل العمل ضمن مجالات المسافات البعيدة والجهود المرتفعة التي هي الشروط المثلى لإنتاج ألياف ملساء بأبعاد صغيرة وبجودة عالية (القيم التي حصلنا عليها متوافقة مع الدراسة المرجعة [22]).

مناقشة النتائج:

الجهد المطبق من العوامل المسهمة في تحديد شكل الألياف المشكّلة بتقنية الغزل الكهربائي وقطرها. وتتشكل خرزات موزعة على طول الليف بزيادة الجهد المطبق، ويعود سبب ذلك إلى عدم الاستقرار في مخروط تايلور [23]. وكما لاحظنا من الأشكال (4)، (5) أنه كلما ازداد الجهد المطبق ازداد عدد لفات للألياف المغزولة في مرحلة عدم الاستقرار للغزل وتتناقص أبعاد الألياف. ويفسر ذلك بأن الجهد المرتفع يحدث زيادة في شدة الحقل الكهربائي الناشئ بين المُجمّع والإبرة فيسبب زيادة في كمية الشحن الكهربائية، إذ

18G الحصول على ألياف بأبعاد كبيرة نسبياً. في حين نلاحظ انخفاضاً واضحاً في أبعاد الليف عند خفض قطر رأس التشكيل من 18G إلى 20G وصولاً إلى 22G.



الشكل (6) صور AFM (10x10 μm) لألياف متشكلة بتقنية الغزل الكهربائي مع تركيز 14wt% وجهد مطبق عند 20kV بواسطة رؤوس تشكيل مختلفة: (a) 18G (b) 20G (c) 22G.

نلاحظ في الشكل (7) أن هناك تغيراً واضحاً في متوسط قطر الألياف وارتفاعها بدلالة تغير قطر رأس التشكيل، فمن أجل قطر رأس تشكيل 18G بلغ متوسط قطر الليف 759nm والارتفاع 192nm وعند استخدام قطر رأس تشكيل 22G يتناقص متوسط قطر الليف بنسبة 56% في حين يتناقص الارتفاع بمقدار 40%، بحيث يصل متوسط قطر الليف ومتوسط الارتفاع للألياف الناتجة إلى 334nm و 78nm على التوالي.

كما قيست خشونة سطح الألياف المتشكلة، إذ نلاحظ في الشكل (8) أن هناك تغيراً واضحاً لخشونة السطح بدلالة تغير قطر رأس التشكيل، ففي حالة قطر رأس التشكيل 18G تبلغ الخشونة 67nm وعند قطر رأس تشكيل 22G تتناقص الخشونة بنسبة 50% بحيث تصبح 33nm.

ويعود سبب انخفاض أبعاد الليف عند زيادة المسافة إلى ازدياد المنطقة الخاضعة للحقل الكهربائي، مما يزيد من مدة طيران الألياف قبل وصولها إلى الركازة، ومن ثمّ تحصل زيادة في معدل تبخر المحلّ، ويسهم ذلك في جفاف الألياف بشكل أكبر كلما زادت المسافة بين الإبرة والمُجمّع. ذلك كلّهُ يؤدي إلى خفض أبعاد الألياف المتجمعة على الركازة [28].

2-2-3: دراسة تأثير قطر رأس التشكيل:

لقطر رأس التشكيل أو الإبرة المعدنية تأثير كبير في قيمة الجهد الحدي، ومن ثمّ في مرفولوجيا الألياف المتشكلة، إذ إنّ قيمة الجهد الحدي (v_c) تتناسب عكساً مع طول الإبرة (L) (أخذ طول الإبرة نفسه للعينات المدروسة نفسها 2,8 cm) وتتناسب طردياً مع قطر الإبرة ($2R$) كما هو موضّح في العلاقة [29,30]:

$$V_c^2 = 4 \frac{H^2}{L^2} \left(\ln \frac{2L}{R} - \frac{3}{2} \right) (0.117 pgR)$$

(المعطاة في الجملة الثغنية C_{gs})

وللتحقّق من تأثير قطر رأس الإبرة في مرفولوجيا الألياف الناتجة، قمنا باستخدام رؤوس إبر مختلفة الأقطار (18G، 20، 22) مع تثبيت كل من تركيز المحلول، والجهد المطبّق والمسافة بين رأس الإبرة والمُجمّع طيلة مدة غزل الألياف وتجميعها على الركازة الزجاجية عند القيم 14wt% و 20kV و 20cm على الترتيب.

وبيّن الجدول (2) مدى تأثير تغير قطر رأس التشكيل في معدل متوسط القطر والارتفاع والخشونة للألياف المتشكلة، عند تثبيت باقي المتغيرات.

الجدول (2) متوسط القطر، والارتفاع وخشونة السطح للألياف

المتشكلة نتيجة تغير قطر إبرة التشكيل وتثبيت كل من التركيز، المسافة والجهد المطبّق 20KV، 20cm، 14wt%.

خشونة السطح (nm)	الارتفاع (nm)	متوسط قطر الليف (nm)	قطر رأس التشكيل عند تركيز 14wt%
66.7	192	759	18
41.7	176	455	20
32.7	78	334	22

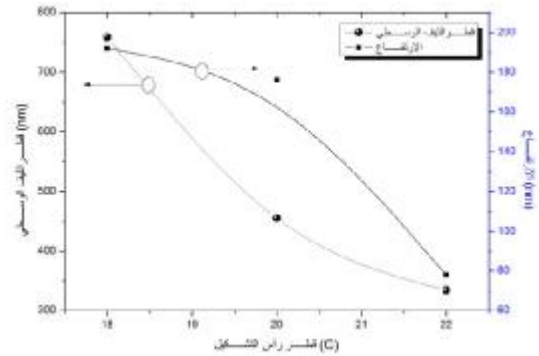
يُظهر الشكل (6) صور AFM للألياف الناتجة عن تغير قطر رأس التشكيل، إذ نلاحظ من أجل قطر رأس تشكيل

5- خلاصة

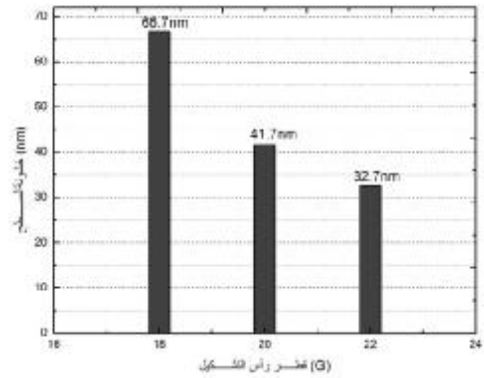
يمكن تلخيص أهم النتائج التي حصلنا عليها بما يأتي:
أولاً- تم الحصول على ألياف ملساء وبأبعاد صغيرة عند تخطي قيمة الجهد الحدي. وعند الزيادة الكبيرة للجهد المطبق تتشكل الخرزات. مع الإشارة إلى أن قيمة الجهد الحدي يمكن التحكم بها بتغيير بعض البارامترات المتعلقة بعملية الغزل الكهربائي.

ثانياً- تتشكل ألياف ملساء وبأبعاد صغيرة (متوسط قطرها 151nm وارتفاعها 55nm)، عند العمل ضمن مجال المسافات البعيدة والجهود المرتفعة.

ثالثاً- تتناقص أبعاد الألياف الناتجة (متوسط قطرها وارتفاعها 334nm، 78nm على التوالي) مع استخدام قطر رأس تشكيل صغير وتراكيز مرتفعة للمحلول البوليميري.



الشكل (7) تأثير قطر رأس التشكيل في كل من متوسط قطر الليف والارتفاع في تقنية الغزل الكهربائي؛ وذلك بعد تثبيت بقية المتغيرات.



الشكل (8) تأثير قطر رأس التشكيل في خشونة سطح الألياف المشكلة بتقنية الغزل الكهربائي؛ وذلك بعد تثبيت بقية المتغيرات.

مناقشة النتائج:

يعد اختيار قياس مناسب لقطر رأس التشكيل من الأمور الأساسية والمهمة في هذه التقنية. يؤثر قطر الإبرة في مرفولوجيا الليف الناتج. إذ عند استخدام رؤوس بأقطار صغيرة تتشكل ألياف بأبعاد صغيرة، ويعود سبب هذا الانخفاض لمتوسط القطر والارتفاع إلى تناقص حجم القطرة المندفعة من رأس الإبرة وزيادة قوى التوتر السطحي الناشئ عليها. وللتغلب على قوة التوتر السطحي وحدوث التدفق يتطلب زيادة في قيمة الجهد المطبق. ويؤدي ذلك إلى ازدياد تسارع السائل المندفع مما يزيد من مدة التطاير ونسبة تبخر المحل قبل وصول الألياف إلى الركازة ومن ثم الحصول على ألياف بأبعاد صغيرة.

6 - المراجع*

- fabrication techniques, *Textile Research Journal*. 2011. 82(2). pp129-147.
- [19] Herman F.Mark, *Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Polyamides, Aromatic*, Vol 3, 2005, pp 585-595.
- [20] Kessick, R., Fenn, J., Tepper, G. The use of AC potentials in electrospinning and electrospinning processes. *Polymer*, 2004. 45, pp. 2981-2984.
- [21] Joo Y.L., Zhou H., Apparatus and method for elevated temperature electrospinning, Wo patent WO2006007287, 2006.
- [22] Lilia Muller Guerrini, Marcia Cristina Branciforti, Thomas Canova, Rosario Elida Suman Bretas, *Electrospinning and Characterization of Polyamide 66 Nanofibers With Different Molecular Weights*, *Materials Research*, Vol. 12, No. 2, 181-190, 2009.
- [23] Zong, X., Kim, K., Fang, D., Ran, S., Hsiao, B. S. and Chu, B. (). Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes. *Polymer*. 2002, 43, pp. 4403-4412.
- [24] Lee, J.S., Choi, K.H., Ghim, H.D., Kim, S.S., Chun, D.H., Kim, H.Y. and Lyoo, W.S. Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning, *J. Appl.Polym.* 2004. Sci. 93, pp. 1638-1646.
- [25] Pawlowski, K. J., Belvin, H. L., Raney, D. L., Su, J., Harrison, J. S. and Siochi, E. J. Electrospinning of a micro-air vehicle wing skin. *Polymer*. 2003. 44, pp. 1309- 1314.
- [26] H. Y. Kim, K. H. Lee, B. S. Lee, and C. K. Kim, 3rd IEEE Conference on Nanotechnology 2 (2003).
- [27] S.Ramakrishna, et al, *An Introduction to, Electrospinning and Nanofibers*, National University of Singapore, Co. Pte. Ltd, 2005, pp 20-150.
- [28] Saima N. Khan, Martin E. Kordesch, *Electrospinning Polymer Nanofibers Electrical and Optical Characterization*, thesis. Ohio University.US. 2007. Pp 33-44.
- [29] G. Taylor, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1969, 313, 453
- [30] Taylor, G, *Electrically driven jets. Proceedings of the Royal Society of London*, 1969. A(313): p. 453.
- [1] J. H. Yu, S. V. Fridrikh, and G. C. Rutledge, *Advanced Materials*, 2004, 16, 1562.
- [2] D. Li and Y. Xia, *Nano Letters*, 2004, 4, 933.
- [3] M. Bognitzki, M. Czado, T. Frese, A. Schaper, M. Hellwig, M. Steinhart, A. Greiner, and J. H. Wendorff, *Advanced Materials*, 2001, 13, 70.
- [4] D. Li, Y. Wang, and Y. Xia, *Advanced Materials*, 2004, 16, 361.
- [5] J. S. Kim and D. H. Reneker, *Polymer Engineering and Science*, 1999, 39, 849.
- [6] 3. R. Jaeger, H. Schönherr, and G. J. Vancso, *Macromolecules*, 1996, 29, 7634. i
- [7] J. Xie and Y. L. Hsieh, *Journal of Materials Science*, 2003, 38, 2125.
- [8] J. A. Matthews, G. E. Wnek, D. G. Simpson, and G. L. Bowlin, *Biomacromolecules*, 2002, 3, 232.
- [9] A. Pedicini and R. J. Farris, *Polymer*, 2003, 44, 6857.
- [10] J. Lyons, C. Li, and F. Ko, *Polymer*, 2004, 45, 7597.
- [11] Y. Dror, W. Salalha, R. L. Khalifin, Y. Cohen, A. L. Yarin, and E. Zussman, *Langmuir*, 2003, 19, 7012.
- [12] M.J.G. van de Molengraft, G.W.M. Peters, H.E.H. Meijer, *Position-controlled deposition for Electrospinning* Eindhoven University. Solberg. 2007. pp.5-20.
- [13] S. Kumar Rout, K. Parmanik, *Design of Digital Thermometer and Application in Electrospinning*, thesis, National Institute of Technology, 2011, p32.
- [14] A. Gholipour Kanani, S. Hajir Bahrami, *Review on Electrospun Nanofibers Scaffold and Biomedical Applications*, *Trends Biomater. Artif. Organs*, Vol 24(2), 2010, pp 93-115.
- [15] S. Piperno, L. Lozzi, R. Rastelli, M. Passacantando, S. Santucci, *PMMA nanofibers production by Electrospinning*, *Applied Surface Science* 252 (2006) 5583-5586.
- [16] Jia Xu, Jinhui Zhang, Weiyan Gao, Hongwei Liang, Hongyan Wang, Junfeng. *Preparation of chitosan/PLA blend micro/nanofibers by Electrospinning*. *Materials Letters*. Volume 63, Issue 8, 31 2009, pp 658-660
- [17] N. P. Gule, B. Klumperman, T. E. Cloete, *Electrospun antimicrobial and antibiofouling nanofibres*, thesis, Stellenbosch University, South Africa. 2011, pp 10- 150.
- [18] Rajkishore Nayak, Rajiv Padhye, Illias Louis Kyratzis, *Recent advances in nanofibre*