



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها

تحسين الخواص ذاتية التنظيف والمضادة للبكتريا للأقمشة المنسوجة

باستخدام مواد نانوية

أطروحة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في تكنولوجيا النسيج

إعداد:

م. سلام عبد الكريم محمود

إشراف:

المشرف المساعد

د. إبراهيم الغريبي

أستاذ مساعد في قسم الفيزياء

كلية العلوم_ جامعة دمشق

المشرف الرئيسي

أ.د.م. باسل يونس

أستاذ في قسم هندسة الصناعات النسيجية وتقاناتها

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية_ جامعة دمشق

2026

قرار لجنة الحكم على أطروحة دكتوراه

بالإشارة إلى قرار مجلس جامعة دمشق رقم 139/ ص. م تاريخ 2020/1/14 بشأن الموافقة على تسجيل بحث الدكتوراه لطالب الدراسات العليا المهندسة سلام عبد الكريم محمود، لنيل درجة الدكتوراه باختصاص "تكنولوجيا النسيج" بعنوان "تحسين الخواص ذاتية التنظيف والمضادة للبكتريا للأقمشة المنسوجة باستخدام مواد نانوية" وتسمية:

السيد الدكتور: باسل يونس مشرفاً

والسيد الدكتور: إبراهيم الغريبي مشرفاً مشاركاً

واستناداً إلى أحكام المادتين 163/ و164/ من اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادرة بالمرسوم الجمهوري رقم 250/ تاريخ 2006/7/10، وإشارةً إلى قرار مجلس الكلية رقم 493/ تاريخ 2025/11/30 باقتراح تشكيل لجنة الحكم والمصادق عليه بقرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا رقم 1160/ المتخذ في الجلسة رقم 7/ المنعقدة بتاريخ 2025/ 12 /9 المتضمن تشكيل لجنة الحكم على أطروحة الدكتوراه في تكنولوجيا النسيج التي أعدتها الطالبة سلام عبد الكريم محمود بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية والمؤلفة من السادة الأساتذة:

السيد الأستاذ الدكتور معن الحوراني عضواً

السيد الأستاذ الدكتور طاهر قدار عضواً

السيدة الأستاذة الدكتورة رشا مسعود عضواً

السيد الأستاذ الدكتور باسل يونس عضواً ومشرفاً

السيد الدكتور محمد عبد الكبير الكتاني عضواً

اجتمعت لجنة الحكم لمناقشة أطروحة الدكتوراه التي تقدّمت بها الطالبة في تمام الساعة العاشرة صباحاً من يوم الخميس الموافق 2026/2/12، وبعد الاستماع إلى دفاع الطالبة سلام عبد الكريم محمود ومناقشتها أوصت اللجنة بما يلي:

- 1- قبول هذه الأطروحة والحكم بالإجماع على أهلية الطالبة لنيل درجة الدكتوراه في تكنولوجيا النسيج.
- 2- منح الطالبة درجة على رسالة الدكتوراه بعد المناقشة العلنية بتقدير (امتياز) وعلامة (91) احدى وتسعون درجة فقط.

دمشق في 2026/2/12

الدكتور	الدكتور	الدكتورة	الدكتور	الدكتور
محمد	عبد	الكبير	باسل يونس	رشا مسعود
الكتاني			طاهر قدار	معن الحوراني

الاهداء:

إلى الروح التي تقف بجواري حيثما كنت، ترفعني إذا جثوت وتسندني إذا ملت، وتحضني إذا تهت
إلى الغائب الحاضر دوماً

أبي

إلى سديانة الصبر ونبع الحنان والقلب السموح والوجه العذب إلى من ربنتي وعلمتني وبين يديها
وجدت نفسي وعشت ذاتي إلى حبيبتي

أمي

إلى رفيق العمر وصديق الأيام الصعبة، الذي جعل للحياة نكهة مختلفة ورسم معي رحلة مملوءة
بالحب والشغف.

زوجي مريد

إلى رياحين القلب والروح ودفء الحياة وغبطتها إلى سندي في القادماات من الأيام

أولادي كرم وآرام وماريا

إلى سندي في كل زمان ومكان أحباب القلب والروح وصوت الفرح في هذه الحياة

أخوتي وأصهرتي وأولادهم

إلى أهلي وأصدقائي وأحبائي إلى وطني

كلمة شكر:

أشكر كل من علمني حرفاً في مسيرتي الدراسية.

أشكر من ساعدني على إتمام البحث ووقف بجانبني في مسيرتي البحثية:

- الأستاذ الدكتور المهندس: باسل يونس المشرف العلمي
- الدكتور: إبراهيم الغريبي المشرف المشارك

أشكر لجنة الحكم الموقرة:

الأستاذ الدكتور: معن الحوراني.

الأستاذ الدكتور: طاهر قدار.

الأستاذة الدكتورة: رشا مسعود.

الأستاذ الدكتور: باسل يونس.

الدكتور: محمد عبد الكبير الكتاني.

أشكر مدرسي ومهندسي في قسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها

الدكتور محمد أبو عصفور.

الدكتور خليل الحلبي.

المهندس محمد علي بلوق.

المهندس يحيى السمكري.

الدكتور مجد بركات الدكتور غاندي أحمد

الشكر الكبير للدكتور المهندس: عمار علي.

الشكر الكبير للدكتور المهندس: محمد مازن المحاييري.

فهرس المحتويات:

الجزء التمهيدي	15
أ. المقدمة:	16
إ. الإشكالية البحثية	18
إ. تساؤلات البحث	19
إ. فرضيات البحث	19
أ. أهداف البحث	20
أ. أهمية البحث	20
أ. مبررات البحث	21
أ. منهجية البحث:	21
أ. مكونات البحث:	22
أ. المصطلحات العلمية:	23
الجزء الأول	24
1. الفصل الأول: الدراسة المرجعية	25
1.1 تمهيد:	26
2.1 الأقمشة المضادة للجراثيم:	30
1.2.1 الفضة النانوية:	30
2.2.1 أكسيد الزنك النانوي:	40
3.1 الأقمشة ذاتية التنظيف:	45
1.3.1 نظريات الترطيب:	47
2.3.1 المعالجة النهائية للأقمشة باستخدام الفلوروكربون:	48

2. الفصل الثاني: الدراسة النظرية 58

- 1.2 تمهيد: 59
- 2.2 الأقمشة الوظيفية: 60
- 3.2 تقنية النانو وتطبيقاتها في الأقمشة الوظيفية: 62
- 1.3.2 تعريف تقنية النانو: 62
- 2.3.2 تطبيقات تقنية النانو في الأقمشة الوظيفية: 63
- 3.3.2 تصنيف المعالجة النهائية النانوية للمنسوجات: 63
- 4.2 الأقمشة المضادة للجراثيم: 65
- 1.4.2 المواد النانوية المستخدمة في الأقمشة المضادة للجراثيم: 66
- 2.4.2 الجراثيم الشائعة في الأقمشة: 68
- 3.4.2 استخدام الفضة النانوية في الأقمشة المضادة للجراثيم: 71
- 4.4.2 استخدام أكسيد الزنك النانوي في الأقمشة المضادة للجراثيم: 76
- 5.2 الأقمشة ذاتية التنظيف: 80
- 1.5.2 نظريات الترطيب: 84
- 1.1.5.2 المعالجة النهائية للأقمشة بمواد نانوية لإكسابها خصائص ذاتية التنظيف: 89
- 2.1.5.2 المعالجة النهائية بمركبات الفلوروكربونية : 90

الجزء الثاني 95

3. الفصل الثالث: الأجهزة المستخدمة وطرائق البحث 95

- 1.3 المواد والأجهزة والأدوات المستخدمة في البحث: 96
- 2.3 تحضير المواد النانوية: 100
- 1.2.3 الاصطناع الأخضر للفضة النانوية: 100
- 2.2.3 تحضير أكسيد الزنك النانوي: 108
- 3.3 توصيف المواد النانوية: 109
- 1.3.3 توصيف الفضة النانوية: 109
- 1.1.3.3 توصيف الفضة النانوية باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM) : 109
- 2.1.3.3 توصيف الفضة النانوية باستخدام مطيافية الامتصاص الذري (AAS) : 115
- 2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي: 116
- 1.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM) : 116
- 2.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي باستخدام تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) : 118
- 3.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي باستخدام تحليل الانعراج بالأشعة السينية (XRD) : 119
- 4.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي بالمجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي (FE-SEM) : 121
- 5.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي باستخدام تحليل مطيافية تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) : 122
- 4.3 تحضير وتوصيف راتنج الفلورو كربون السداسي C6-FLUOROCARBON RESIN : 123

- 1.4.3 أمثلة تركيز راتنج الفلورو كربون السداسي: 123.....
- 1.1.4.3 تحضير وتوصيف عينات القماش المدروسة: 123.....
- 2.1.4.3 الاختبارات العملية للعينات المعالجة: 125.....
- 5.3 تحضير وتوصيف عينات القماش المعالجة بالمادة النانوية وراتنج الفلورو كربون السداسي: 138.....
- 1.5.3 تحضير وتوصيف عينات القماش المعدلة بمركب الفضة النانوية وراتنج الفلورو كربون السداسي AG-C₆F₆: 138
- 2.5.3 تحضير وتوصيف عينات القماش المعدلة بمركب أكسيد الزنك النانوي وراتنج الفلورو كربون السداسي ZNO-C₆F₆: 142
- 6.3 اختبار ثباتية مواد المعالجة على الأقمشة بعد الغسيل: 146.....

4. الفصل الرابع: النتائج والمناقشة 148.....

- 1.4 دراسة خواص المقاومة الجرثومية للعينات: 152.....
- 1.1.4 دراسة مقاومة عينات القماش المدروس للجراثيم وفق المواصفة القياسية AATCC 147:2004: 152.....
- 1.1.1.4 اختبار النشاط المضاد للجراثيم لعينات القماش المعالجة بالفضة النانوية والفلورو كربون: 156.....
- 2.1.1.4 اختبار النشاط المضاد للجراثيم لعينات القماش المعالجة بأكسيد الزنك النانوي والفلورو كربون: 161.....
- 2.1.4 دراسة مقاومة عينات القماش المدروس للجراثيم وفق المواصفة القياسية AATCC 100-2004: 167.....
- 1.2.1.4 اختبار النشاط المضاد للجراثيم لعينات القماش المعالجة بالفضة النانوية والفلورو كربون: 176.....
- 2.2.1.4 اختبار النشاط المضاد للجراثيم لعينات القماش المعالجة بـ ZnO-C₆F₆: 184.....
- 2.4 دراسة الخواص ذاتية التنظيف لعينات القماش المدروس: 194.....
- 1.2.4 اختبار القطرة السائلة للعينات القماش المعالج بـ AG-C₆F₆: 195.....
- 2.2.4 اختبار القطرة السائلة للعينات القماش المعالج بـ ZNO-C₆F₆: 200.....
- 3.4 الدراسة الاحصائية: 206.....
- 1.3.4 الدراسة الاحصائية للجراثيم: 207
- 2.3.4 الدراسة الاحصائية للقطرة السائلة: 218.....
- 4.4 دراسة الجدوى الاقتصادية: 229.....

5. الفصل الخامس: الخاتمة 235.....

- 1.5 الاستنتاجات: 238.....
- 2.5 التوصيات: 241.....
- 3.5 مقترحات البحث المستقبلية: 242.....
- 4.5 الأعمال المرافقة للبحث: 243.....
- المراجع: 244..... A.

فهرس الجداول:

جدول (1-1): مقارنة بين بعض الدراسات المرجعية المذكورة والمتقاربة مع دراستنا الحالية	57
جدول (1-3): المواد المستخدمة في البحث	96
جدول (2-3): مواصفات عينات القماش المدروسة لأمثلة تركيز راتنج الفلورو كربون السداسي	97
جدول (3-3): مواصفات عينة القماش المستخدمة للاختبارات الجرثومية والقطرة السائلة	97
جدول (4-3): تغيرات PH المحلول بتغير تركيز حجم الامونيا المضافة	104
جدول (5-3): وزن المتر مربع للعينات المعالجة بـ C_6F_6 بتركيز مختلفة	127
جدول (6-3): النسبة المئوية لانسداد عينات القماش (A-B-C) المعالجة بـ C_6F_6 وفق التراكيز (غ/ل-10-15-20)	130
جدول (7-3): معدل نفاذية الأقمشة للماء وفق المواصفة القياسية AATCC 2005:22	132
جدول (8-3): نتائج اختبار نفاذية الماء للعينات غير المعالجة والعينات المعالجة وفق التراكيز المدروسة	133
جدول (9-3): زوايا التماس بين قطرة الماء و سطح عينات القماش المعالج بالفلورو كربون عند التراكيز المختلفة	136
جدول (10-3): مواصفات عينات القماش المدروس	138
جدول (1-4): نسب تثبيط العينات القماشية المعالجة بـ $Ag-C_6F_6$ للجراثيم STAPHYLOCOCCUS AUREUS والجراثيم ESCHERICHIA COLI عند التراكيز (50, 75, 100, 200, 300 PPM) بعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل وفقاً للمواصفة القياسية AATCC 100-2004	182
جدول (2-4): نسب تثبيط العينات القماشية المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ وفقاً للمواصفة القياسية AATCC 100-2004 ضد كل من الجراثيم موجبة الغرام STAPHYLOCOCCUS AUREUS والجراثيم سالبة الغرام ESCHERICHIA COLI عند التراكيز (50, 75, 100, 200, 300 PPM) بعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل	189
جدول (3-4): زوايا التماس لقطرة (دم- ماء- زيت) لأقمشة القطن المعالجة بـ $Ag-C_6F_6$ عند تراكيز (50, 75, 100, 200, 300 PPM) قبل الغسيل و بعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل	197
جدول (4-4): زوايا التماس لقطرة (زيت- ماء- زيت) لأقمشة القطن المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ عند التراكيز المختلفة لـ ZnO (50, 75, 100, 200, 300 PPM) قبل الغسيل و بعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل	204
جدول (5-4): الإحصاءات الوصفية للجراثيم	207
جدول (6-4): نتائج اختبار التأثيرات داخل المجموعات لعامل التركيز وتفاعلاته مع المجموعة والمادة ونوع الجرثومة	211
جدول (7-4): نتائج اختبار التأثيرات بين المجموعات للعوامل التجريبية (الغسيل، المادة، ونوع الجرثومة)	213
جدول (8-4): الإحصاءات الوصفية للقطرة السائلة	218
جدول (9-4): نتائج اختبار التأثيرات داخل المجموعات لعامل التركيز وتفاعلاته مع المجموعة والمادة ونوع القطرة	221
جدول (10-4): نتائج اختبار التأثيرات بين المجموعات للعوامل التجريبية (الغسيل، المادة، ونوع القطرة)	224
جدول (11-4): تكاليف تحضير أكسيد الزنك النانوي المختبري	229
جدول (12-4): تكلفة متر قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي (300PPM)	230
جدول (13-4): تكلفة متر قماش معالج بالفضة النانوية (300PPM)	230
جدول (14-4): مقارنة الجدوى الاقتصادية والتقنية للمواد النانوية للقماش القطني الوظيفي	232
جدول (15-4): ملخص التوصيات بناءً على الجدول	233

فهرس الأشكال:

- شكل (1-1): مراحل معالجة القماش القطني بالكيوتوزان والذي يعمل كعامل مثبت لجزيئات الفضة النانوية في القماش القطني (RAJPUT ET AL., 2023) 32
- شكل (2-1): الاختلاف اللوني بين أقمشة القطن والحرير المعالجة بمحاليل مختلفة من الفضة النانوية (JAFARI ET AL., 2016) 35
- شكل (3-1): معالجات التشطيب المختلفة للقماش القطني (SARI & ARIK, 2023) 38
- شكل (4-1): مراحل تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية (TANIA ET AL., 2022) 41
- شكل (5-1): صور المجهر الإلكتروني الماسح لسطح ورقة نبات اللوتس (LI ET AL., 2016) 46
- شكل (1-2): مقارنة بين الجدار الخلوي للخلية الجرثومية موجبة الغرام والجدار الخلوي للخلية الجرثومية سالبة الغرام (YILMAZ ET AL., 2023) 69
- شكل (2-2): تمثيل تخطيطي لبنية الخلية لكل من المكورات العنقودية الذهبية (S. AUREUS) والإشريكية القولونية (E. COLI) (MONTAZER & HARIFI, 2018) 70
- شكل (3-2): آلية عمل الفضة النانوية كمضاد للجراثيم (ZHAO & MEI, 2020) 73
- شكل (4-2): خطوات معالجة القماش بجسيمات الفضة النانوية بطريقة غمر- تجفيف- معالجة حرارية (TAN, SIN, BEE, RATNAM, ET AL., 2019) 75
- شكل (5-2): آلية عمل جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZNO NPS) كمضاد للجراثيم 78
- شكل (6-2): صور المجهر الإلكتروني SEM لسطح ورقة اللوتس عند قيم تكبير مختلفة (BARTHLOTT ET AL., 2017) 84
- شكل (7-2): زوايا التماس بين قطرة السائل والسطح الصلب في حالة سطح محب للماء وسطح كاره للماء (BORKOWICZ ET AL., 2017) 85
- شكل (8-2): زاوية التماس بين السطح الصلب والسائل والقوى المؤثرة على قطرة السائل (WILLIAMS.J., 2018) 86
- شكل (9-2): توازن القوى عند تلامس قطرة سائلة مع سطح أملس وفق نموذج يونغ (MONTAZER & HARIFI, 2018) 87
- شكل (10-2): توضع قطرة الماء على السطح وفق نموذج وينزل (MONTAZER & HARIFI, 2018) 88
- شكل (11-2): توضع قطرة الماء على السطح وفق نموذج كاسي باكستر (MONTAZER & HARIFI, 2018) 88
- شكل (12-2): شكل تخطيطي يوضح معالجة قماش سادة بمركب ZNO-FC (Y. WANG ET AL., 2022) 93
- شكل (1-3): أوراق نبات اليوكالبتوس قبل التجفيف وبعد التجفيف 100
- شكل (2-3): خطوات تحضير مستخلص اليوكالبتوس A: تسخين مستخلص اليوكالبتوس حتى الغليان 101
- شكل (3-3): خطوات تحضير الفضة النانوية الغروية A: نترات الفضة من SIGMA-ALDRICH B: نترات الفضة والماء المقطر. C: مستخلص اليوكالبتوس D: محلول نترات الفضة بعد اضافة مستخلص اليوكالبتوس. E: محلول نترات الفضة ومستخلص اليوكالبتوس بعد خمس دقائق من التحريك المغناطيسي 102
- شكل (4-3): صورة للعينات المحضرة عند PH مختلف A1 : PH=5 ، A2 : PH=7 ، A3 : PH=9 ، A4 : PH=10 ، A5 : PH=11 وذلك بعد تمديد العينات بالماء المقطر بنسبة 120ML:3ML 105
- شكل (5-3): طيف الامتصاصية الضوئية في المجال المرئي وفوق البنفسجي لعينة الفضة النانوية المحضرة عند قيم مختلفة من PH حيث نسبة التمديد 3 ML : 40 ML (ماء مقطر : المحلول المحضر) 106
- شكل (6-3): جهاز الطرد المركزي (المتفلة) 107
- شكل (7-3): تحضير أكسيد الزنك النانوي A: محلول اسيتات الزنك والايثانول B: محلول حمض الاكسيليك ولايثانول C: إضافة المحلول B إلى المحلول A بواسطة سحاحة بالتنقيط البطيء 108
- شكل (8-3): تحضير مسحوق أكسيد الزنك النانوي A: عينة أكسيد الزنك النانوي بعد التجفيف لمدة 24 ساعة B: العينة في الفرن لمدة 4 ساعات C: عينة أكسيد الزنك النانوي بعد الطحن في مطحنة الكرات 109

- شكل (3-9) : شريحة زجاجية تم تحضيرها وتوضع عليها عينات فضة نانوية غروية مختلفة بـ PH 110
- شكل (3-10): صور المجهر الالكتروني الماسح والتي توضح شكل وأبعاد جسيمات الفضة النانوية 112
- شكل (3-11): صور المجهر الالكتروني الماسح والتي توضح شكل وأبعاد جسيمات الفضة النانوية 114
- شكل (3-12): عينة الفضة النانوية الغروية بعد تخفيفها بمعدل 1000 مرة قبل القياس 115
- شكل (3-13): صور مجهر القوة الذرية (AFM) ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد، وتوزيع حجم جسيمات أكسيد الزنك النانوية التي تم تصنيعها باستخدام طريقة السول-جيل 117
- شكل (3-14): طيف FTIR لعينة أكسيد الزنك النانوي 118
- شكل (3-15): طيف انعراج الأشعة السينية لجسيمات أكسيد الزنك (ZNO) النانوية مع رقم الكرت المرجعي الموافق 120
- شكل (3-16): صور المجهر الالكتروني الماسح FE-SEM والتي توضح حبيبات أكسيد الزنك النانوي بـ قيم تكبير مختلفة (100KX-80KX-45KX) 121
- شكل (3-17): التركيب العنصري بواسطة مطيافية تشتت الأشعة السينية (EDX) لجسيمات النانوية لأكسيد الزنك النانوية التي تم تحضيرها باستخدام طريقة السول-جيل مع جدول لنسب تلك العناصر 122
- شكل (3-18): طريقة تحضير عينات القماش: (A) غمر العينات بتركيز مختلفة من الفلوروكربون عند التراكيز (5-10-15-20-25G/L)، (B) عصر العينات (C) وزن العينات لحساب نسب التشريب (D) تجفيف العينات (F) معالجة حرارية في الفرن 124
- شكل (3-19): أطياف FTIR للعينات قطن غير معالج، عينات القطن المعالج A,B,C عند التركيز 20G/L ولمادة المعالجة الطاردة للماء C_6F_6 126
- شكل (3-20): العلاقة بين تركيز مادة المعالجة C_6F_6 ووزن عينات القماش المعالجة 128
- شكل (3-21): صور برنامج الماتلاب لحساب الانسدادية القماش 129
- شكل (3-22): مخطط العلاقة بين النسبة المئوية لانخفاض الانسدادية مع تغير تراكيز الفلورو كربون (5-10-15-20-25G/L) 129
- لعينات القماش المدروسة (A-B-C) 131
- شكل (3-23): اختبار نفاذية الماء: عينة قماش A قبل المعالجة على جهاز نفاذية الماء B: العينة A بعد معالجتها بـ C_6F_6 133
- شكل (3-24): اختبار نفاذية الماء A: عينة قماش B قبل المعالجة على جهاز نفاذية الماء B: العينة B بعد معالجتها بـ C_6F_6 134
- شكل (3-25): صور توضع قطرة الماء على السطح النسيجي وزاوية التماس بين قطرة الماء وسطح القماش للعينات (A-B-C) 135
- شكل (3-26): مراحل عملية الغمر-التجفيف-المعالجة الحرارية (PAD-DRY-CURE) لمعالجة القماش القطني بتركيز مختلفة من المركب النانوي $AG-C_6F_6$ (A) غمر العينات بمركب (B) عصر العينات (C) تجفيف العينات بدرجة حرارة 80° م (D) المعالجة الحرارية للعينات في الفرن 139
- شكل (3-27): صور المجهر الالكتروني الماسح FE-SEM بـ قيم تكبير مختلفة توضح موضع مركب $AG-C_6F_6$ على سطح الليف القطني المعالج 140
- شكل (3-28): التركيب العنصري بواسطة مطيافية تشتت الأشعة السينية EDX لقماش القطن المعالج بجزيئات AG والفلوروكربون (C_6F_6) باستخدام عملية (PAD-DRY-CURE) مع جدول لنسب تلك العناصر 142
- شكل (3-29): مراحل عملية الغمر-التجفيف-المعالجة الحرارية (PAD-DRY-CURE) لمعالجة القماش القطني بـ $ZNO-C_6F_6$ بتركيز مختلفة: (A) الغمر، (B) العصر الميكانيكي، (C) التجفيف و (D) المعالجة الحرارية 143
- شكل (3-30): صور المجهر الالكتروني الماسح FE-SEM بـ قيم تكبير مختلفة توضح اندماج $ZNO-C_6F_6$ مع الليف القطني المعالج بطريقة (PAD-DRY-CURE) 144
- شكل (3-31): التركيب العنصري بواسطة مطيافية تشتت الأشعة السينية EDX لقماش القطن المعالج بـ $ZNO-C_6F_6$ باستخدام عملية (PAD-DRY-CURE) مع جدول لنسب تلك العناصر 145
- شكل (3-32): غسل العينات في غسالة مخبرية وفق المواصفة القياسية AATCC61-2003 147
- شكل (4-1): مخطط تفصيلي يوضح مراحل دراسة الخواص المضادة للجراثيم لعينات القماش المعالجة 150
- شكل (4-2): مخطط تفصيلي يوضح خطوات اختبار القطرة السائلة لعينات القماش المعالجة 151

- شكل (3-4): المواد المستخدمة في الاختبار A: سلالات معيارية لكل من جراثيم STAPHYLOCOCCUS AUREUS الموجبة لصبغة الغرام (ATCC 8538) وبكتيريا ESCHERICHIA COLI السالبة لصبغة الغرام (ATCC 8739) B: وسط الزرع باستخدام تربتون سويا آغار 153.....
- شكل (4-4): تجهيزات اختبار مقاومة العينات للمعالجة للجراثيم A: جهاز تدفق الهواء الصفائحي (LAMINAR AIR FLOW) B: جهاز قياس العكارة (MCFARLAND TURBIDITY METER) C: تحضير المعلق الجرثومي. 154.....
- شكل (4-5): تحضير عينات القماش للمعالجة للاختبار الجرثومية A: إجراء المسح الجرثومي على أطباق بتري بوضع خطوط متوازية من المحلول البكتيري B: وضع العينات (قطع الأقمشة) على سطح أطباق بتري بعد الانتهاء من المسح الجرثومي C: تحضير الأطباق للحضانة عن طريق كتابة معلومات تعريفية عليها، مثل نوع المادة المعالجة، وتركيزها، تاريخ الإعداد، ونوع الجراثيم المستخدمة في الاختبار. 155.....
- شكل (4-6): صور أطباق بتري توضح القدرة التثبيطية للأقمشة المعالجة بـ AG-C₆F₆ والمعرضة لجراثيم STAPHYLOCOCCUS AUREUS بعد حضانة 24 ساعة على (A) عينة قماش غير معالج، (B) قماش معالج بـ AG-C₆F₆ بتركيز 50PPM (C) قماش معالج بتركيز 75PPM (D) قماش معالج بتركيز 100PPM (F) النشاط المضاد للجراثيم لعينة الصاد الحيوي، (G) العينة غير المعالجة بعد 48 ساعة، (H) العينات المعالجة عند التراكيز مختلفة للفضة النانوية (50-75-100PPM) بعد حضانة للجراثيم 48 ساعة. 157.....
- شكل (4-7): صور أطباق بتري توضح القدرة التثبيطية للأقمشة المعالجة بـ AG-C₆F₆ والمعرضة لجراثيم (ESCHERICHIA COLI) بعد حضانة 24 ساعة على (A) عينة قماش غير معالج، (B) قماش معالج بـ AG-C₆F₆ فيه AG بتركيز 50PPM (C) قماش معالج بـ AG-C₆F₆ فيه AG بتركيز 75PPM (D) قماش معالج بـ AG-C₆F₆ فيه AG بتركيز 100PPM (F) النشاط المضاد للبكتيريا لعينة الصاد الحيوي، (G) العينة غير المعالجة بعد 48 ساعة، (H) العينات المعالجة بـ AG-C₆F₆ عند التراكيز (50-75-100PPM) بعد حضانة للجراثيم 48 ساعة. 159.....
- شكل (4-8): صور أطباق بتري توضح القدرة التثبيطية للأقمشة المعالجة بـ ZNO-C₆F₆ والمعرضة لجراثيم إيجابية الغرام (STAPHYLOCOCCUS AUREUS) بعد حضانة 24 ساعة. (A) عينة قماش غير معالج، (B) قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 50PPM (C) قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 75PPM (D) قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 100PPM (F) النشاط المضاد للبكتيريا لعينة الصاد الحيوي، (G) العينة غير المعالجة بعد 48 ساعة، (H) العينات المعالجة بأكسيد الزنك النانوي عند التراكيز (50-75-100PPM) بعد حضانة للجراثيم 48 ساعة. 163.....
- شكل (4-9): صور أطباق بتري توضح القدرة التثبيطية للأقمشة المعالجة بـ ZNO-C₆F₆ والمعرضة لجراثيم سالبة الغرام (ESCHERICHIA COLI) بعد حضانة 24 ساعة على A عينة قماش غير معالج، B قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 50PPM، C قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 75PPM، D قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 100PPM (F) النشاط المضاد للجراثيم لعينة الصاد الحيوي، (G) العينة غير المعالجة بعد 48 ساعة، H العينات المعالجة بأكسيد الزنك النانوي عند التراكيز (50-75-100PPM) بعد حضانة للجراثيم 48 ساعة. 165.....
- شكل (4-10): تحضير اللقاح الجرثومي المخفف A: مغذي تربتون صويا (TSB) B: وسط مغذي (TBS) ووسط جراثيم STAPH A: جهاز vortex لج المحاليل وخلطها D: جهاز قياس العكارة (MCFARLAND TURBIDITY METER) E: تحضير التركيز الميكروبي المطلوب. 169.....
- شكل (4-11): صور العينات المعالجة بـ AG-C₆F₆ للاختبارات الجرثومية الكمية بجراثيم STAPH. 171.....
- شكل (4-12): تحديد عدد المستعمرات الجرثومية في طبق الآغار. 173.....
- شكل (4-13): صور العينات المعالجة بـ ZNO-C₆F₆ للاختبارات الجرثومية الكمية لـ STAPH. 175.....
- شكل (4-14): صور أطباق بتري للقدرة التثبيطية لعينات الأقمشة القطنية المعالجة بـ AG-C₆F₆ والمعرضة لجراثيم S.AUREUS إيجابية الغرام، عند تراكيز مختلفة من الفضة النانوية (50,75,100,200,300PPM)، قبل وبعد 5 و10 دورات غسيل. 178.....
- شكل (4-15): صور أطباق بتري للقدرة التثبيطية لعينات الأقمشة القطنية المعالجة بـ AG-C₆F₆ والمعرضة لجراثيم سالبة الغرام (ESCHERICHIA COLI)، عند تراكيز مختلفة من الفضة النانوية (50,75,100,200,300PPM)، قبل وبعد 5 و10 دورات غسيل. 180.....

- شكل (4-16): مخطط بياني لنسبة تثبيط النمو الجرثومي للأقمشة المعالجة بـ $AG-C_6F_6$ بتركيزات مختلفة من الفضة النانوية (50-183 PPM) بعد 5 دورات غسيل وبعد 10 دورات غسيل.
- شكل (4-17): صور أطباق بيري للقدرة التثبيطية للأقمشة القطنية المعالجة بـ $ZNO-C_6F_6$ ضد الجراثيم موجبة الغرام (*STAPHYLOCOCCUS AUREUS*)، عند تراكيز مختلفة من جسيمات الفضة النانوية (50, 75, 100, 200, 300 PPM)، قبل وبعد 5 و 10 دورات غسيل.
- شكل (4-18): صور أطباق بيري للقدرة التثبيطية للأقمشة القطنية المعالجة بـ $ZNO-C_6F_6$ ضد الجراثيم سالبة الغرام (*ESCHERICHIA COLI*)، عند تراكيز مختلفة من جسيمات الفضة النانوية (50, 75, 100, 200, 300 PPM)، قبل وبعد 5 و 10 دورات غسيل.
- شكل (4-19): مخطط بياني لنسبة تثبيط النمو الجرثومي للأقمشة المعالجة بـ $ZNO-C_6F_6$ بتركيزات مختلفة لـ ZNO (50-190 PPM) بعد 5 دورات غسيل وبعد 10 دورات غسيل.
- شكل (4-20): مقارنة النشاط التثبيطي للجراثيم بين العينات المعالجة بـ $AG-C_6F_6$ والعينات المعالجة بـ $ZNO-C_6F_6$ عند التراكيز المدروسة وذلك قبل الغسيل وبعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل وذلك ضد الجراثيم موجبة الغرام.
- شكل (4-21): مقارنة النشاط المضاد للجراثيم بين العينات المعالجة بـ $AG-C_6F_6$ والعينات المعالجة بـ $ZNO-C_6F_6$ عند التراكيز المدروسة وذلك قبل الغسيل وبعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل وذلك ضد الجراثيم سالبة الغرام.
- شكل (4-22): اختلاف زاوية التماس لقطرات من سوائل مختلفة (الدم، الماء، وزيت الزيتون) على سطح القماش القطني المُعالج بـ $AG-C_6F_6$ عند تراكيز مختلفة من الفضة النانوية (50 PPM، 75، 100، 200، 300) قبل الغسيل وبعد 5 و 10 دورات غسيل.
- شكل (4-23): قطرات من سوائل متنوعة (الدم، الماء، وزيت الزيتون) على سطح قماش قطني معالج بـ C_6F_6 وبتراكيز مختلفة من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (50-202 PPM) قبل الغسيل وبعد 5 و 10 دورات غسيل.
- شكل (4-24): تأثير نوع المادة النانوية على الجرثومة قبل الغسيل.
- شكل (4-25): تأثير نوع المادة النانوية على الجرثومة بعد غسيل 5 دورات غسيل.
- شكل (4-26): تأثير نوع المادة النانوية على الجرثومة بعد غسيل 10 دورات غسيل.
- شكل (4-27): تأثير نوع المادة النانوية والتركيز على زاوية التماس قبل الغسيل.
- شكل (4-28): تأثير نوع المادة النانوية والتركيز على زاوية التماس بعد 5 دورات غسيل.
- شكل (4-29): تأثير نوع المادة النانوية والتركيز على زاوية التماس بعد 10 دورات غسيل.
- شكل (5-1): مخطط تفصيلي يوضح المتغيرات الأساسية في البحث المدروس والنتائج المثلى.

المخلص:

تعد العدوى المكتسبة في القطاع الصحي من أبرز التحديات في مرافق الرعاية الصحية على مستوى العالم، حيث تسهم في زيادة معدلات الإصابة بالمرض والوفيات بين المرضى. تنتقل هذه العدوى غالباً عبر التلامس مع الأسطح الملوثة، ومن ضمنها المنسوجات الطبية القطنية مثل زي العاملين في المجال الصحي وأثواب المرضى وأغطية الأسرة في المستشفيات. هدفت هذه الدراسة إلى تطوير أقمشة قطنية طبية (غطاء سرير مشفى لمرضى قرح الفراش) تتمتع بخواص كارهة للماء ومضادة للجراثيم من خلال دمج جسيمات أكسيد الزنك (ZnO) النانوية وجسيمات الفضة النانوية (Ag) مع راتنج الفلوروكربون السداسي السلسلة (C₆F₆-resien)، باستخدام تقنية الغمر والتجفيف والمعالجة الحرارية (pad-dry-cure).

حضرت الفضة النانوية بطريقة صديقة للبيئة باستخدام مستخلص نبات اليوكالبتوس، بينما حضرت جسيمات أكسيد الزنك النانوية عبر تقنية المحلول-الهلام (sol-gel). وصفت الخصائص المرفولوجية للجسيمات المحضرة باستخدام كل من المجهر القوة الذرية (AFM) والمجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي (FE-SEM)، وشخصت بنيتهما البلورية بواسطة انعراج الأشعة السينية (XRD). تبين أن أبعاد جسيمات أكسيد الزنك النانوية متجانسة وتتراوح بين 54-66nm، في حين بلغت أبعاد جسيمات الفضة النانوية 30nm. أكدت تحاليل مطيافية تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) وجود عنصر الفضة والزنك على سطح ألياف القطن لعينة القماش المعالجة.

قيمت فعالية تثبيط الجراثيم للأقمشة المعالجة ضد المكورات العنقودية الذهبية (Staphylococcus aureus) موجبة الغرام والإشريكية القولونية (Escherichia coli) سالبة الغرام، حيث حققت الأقمشة التي تحتوي على 300ppm من جسيمات أكسيد الزنك تثبيطاً للنمو الجرثومي بنسبة 99.8%، بينما حققت الأقمشة المعالجة بالفضة النانوية عند تركيز 300ppm تثبيطاً كاملاً بنسبة 100%.

ودرس الخواص الكارهة للماء، وقيست زاوية التماس للماء (WCA) لكلا عینتی القماش المعالجتين بالفضة النانوية مع الفلوروكربون وأكسيد الزنك النانوي مع الفلوروكربون، حيث أظهر أعلى تركيز لجسيمات ZnO (300ppm) قيمت زاوية تماس بمتوسط 152.3° للدم، 151.1° للماء، 151.0° لزيت الزيتون. في حين سجلت جسيمات الفضة النانوية عند نفس التركيز زوايا تماس أقل قبل الغسيل، حيث بلغت 149.1° للدم، 147.8° للماء، 146.9° للزيت. كما درست الفعالية المضادة للجراثيم وزوايا التماس لكل من العينتين وتبين أن الفعالية المضادة للجراثيم وخاصية الكراهية للماء للعينة المعالجة بالفضة النانوية استمرت حتى بعد عشر دورات غسيل وهذا يؤكد ثباتيتها بعد الغسيل. متفوقة على العينة المعالجة بأكسيد الزنك النانوي، حيث انخفضت الفعالية المضادة للجراثيم وزاوية التماس بعد الغسيل، وذلك بعد اجراء الاختبارات الإحصائية.

يمثل هذا العمل تطوراً واعداً لأقمشة فائقة الأداء تجمع بين خصائص مضادة للجراثيم وذاتية التنظيف بتطوير مركبات نانوية بوليميرية يمكن أن تكون بديلاً للمستوردات في مراكز الرعاية الصحية.

الكلمات المفتاحية: جسيمات الفضة النانوية، جسيمات أكسيد الزنك النانوي، راتنج الفلوروكربون السداسي، أقمشة قطنية مضادة للجراثيم، أقمشة قطنية ذاتية التنظيف.

الجزء التمهيدي

1. المقدمة:

تعتبر الأقمشة القطنية من أكثر المواد استخداماً في الصناعة النسيجية نظراً لخصائصها المريحة وسهولة التعامل معها في التطبيقات المختلفة. يتميز القطن بكونه مادة طبيعية لها قدرة عالية على التهوية وامتصاص الرطوبة، مما يجعله مناسباً للملابس اليومية والمفروشات وحتى المستلزمات الطبية. رغم ذلك، عمل الباحثون على اكساب الأقمشة القطنية خصائص جديدة مثل مقاومة الجراثيم والقدرة على التنظيف الذاتي، حيث تؤثر هذه العوامل بشكل مباشر على جودة وأداء المنتجات النسيجية النهائية وصلاحيتها استخدامها لفترات طويلة.

أحد أبرز المشاكل الصحية المرتبطة بالمنسوجات هو انتقال العدوى المكتسبة من المستشفيات أو المرتبطة بالرعاية الصحية (HAIs)، حيث تم توثيق حالات انتقال الأمراض المعدية عبر المنسوجات مثل المعاطف البيضاء للكادر الطبي، أغطية الأسرة، الستائر، والمناشف في مرافق الرعاية الصحية. تتأثر نسبة الحمل الجرثومي على الأقمشة بعدة عوامل منها خصائص سطح الجراثيم وكذلك خصائص سطح النسيج مثل شحنة السطح، خشونة السطح، تضاريس النسيج، ورطوبة السطح. هذه العوامل تتفاعل مع حركة الجراثيم وانتشارها بشكل معقد.

لذلك، ظهرت تقنيات جديدة تعتمد على تعديل الأسطح باستخدام مواد نانوية بهدف تحسين أداء الأقمشة، تعرف المواد النانوية Nano-materials بأنها تلك الفئة المتميزة من المواد المتقدمة التي يمكن إنتاجها بحيث تتراوح مقاييس أحد أبعادها أو أبعاد حبيباتها في حيز صغير يسمى بحيز النانو والذي يمتد من (1-100 نانومتر)، تكون فيه خواص المواد مختلفة اختلافاً كبيراً جداً عن مثيلاتها في الحيز الأكبر. فالمواد نانوية البنية تعطي صفات وخواص فيزيائية وكيميائية فريدة، أقوى وأخف وأقسى وأسرع وأشدّ أماناً وذاتية الإصلاح، ولذلك استغلت هذه الظاهرة في إنتاج مواد وأجهزة وأنظمة فريدة في خواصها، بواسطة التحكم بشكلها وحجمها في الحيز النانوي. وتعزى الصفات الفريدة التي تتصف بها المواد النانوية الى كون نسبة

أسطحها الى حجمها كبيرة بالمقارنة مع المواد الحجمية وكذلك لمساميتها العالية ولزيادة عدد الذرات المتواجدة على السطح والتي تقود بدورها الى زيادة نشاطها الكيميائي وفعاليتها الحيوية ضد طيف واسع من الجراثيم والسرطانات. أحد أهم التطبيقات العملية لهذه المواد هو استخدامها في تطوير أقمشة قطنية ذات خصائص مضادة للجراثيم وذاتية التنظيف مثل أكسيد الزنك النانوي والفضة النانوية، مع التركيز على تحميلها مع بوليمرات فلوروكربون سداسية السلسلة لتكوين مركبات تضيف على الأقمشة خواصاً مضادة للجراثيم وذاتية التنظيف في الوقت ذاته. وقد تم تطوير عدة طرق لتطبيق هذه الجسيمات على الأقمشة، حيث تشمل تقنيات الترسيب بالغمر أو الرذاذ، واستخدام البوليمرات الحاملة، والدمج مع طبقات بوليمرية طاردة للماء مثل بوليمرات الفلوروكربون، مما يحقق توازناً بين الوظائف المضادة للجراثيم والمقاومة للماء. تعطي هذه التقنيات الفرصة لإنتاج أقمشة بخصائص نوعية وثباتية عالية على الغسيل.

علاوة على ذلك، بدأت الأبحاث تتجه نحو استخدام مواد بوليمرية صديقة للبيئة بديلة للفلوروكربونات التقليدية، بهدف تقليل الآثار البيئية الضارة وتعزيز استدامة المنتجات النسيجية. هذا الاتجاه يؤكد أهمية الجمع بين الأداء الوظيفي العالي مع المسؤولية البيئية في تطوير أقمشة المستقبل.

يمثل هذا التكامل فرصة جديدة لتعزيز جودة الأقمشة القطنية وزيادة فعاليتها في الاستخدامات الصحية والصناعية المختلفة، مما يفتح آفاقاً واسعة لتطوير أقمشة عالية الأداء ذات خصائص وظيفية متقدمة.

١١. الإشكالية البحثية

تواجه الطرق التقليدية المستخدمة لإكساب الأقمشة خصائص وظيفية متعددة تحديات جوهرية، أبرزها ضعف ثباتية هذه الخصائص بعد عمليات الغسيل أو الاستخدام المتكرر، مما يؤدي إلى تراجع أداء الأقمشة واستدامتها. هنا تكمن أهمية توظيف تقنية المواد النانوية التي أظهرت قدرة فائقة على تحسين ثباتية وفعالية الخواص الوظيفية للأقمشة. فالأقمشة المعالجة بالجسيمات النانوية ليست فقط أكثر ثباتاً، بل تحتفظ أيضاً بخصائصها دون التأثير على الصفات الفيزيائية والكيميائية الأساسية للنسيج .

تعد تقنية النانو خياراً مثالياً في تطوير أقمشة متعددة الوظائف تجمع بين الأداء العالي والثباتية الدائمة، إلى جانب أن تصنيع المواد النانوية محلياً يجعلها بديلاً اقتصادياً واعداً بدلاً من الاعتماد على الاستيراد، مما يسهم في توطيد الصناعات النسيجية محلياً. وبفضل الخصائص الفريدة التي توفرها الجسيمات النانوية مثل أكسيد الزنك والفضة، والتي يمكن تحميلها مع بوليمرات فلوروكربون، يمكن تحسين مقاومة الأقمشة للجراثيم وتوفير خواص التنظيف الذاتي، مع تعزيز قدرة الأقمشة على مقاومة الماء والحفاظ على الوظائف عبر دورات الغسيل المتكررة.

بذلك يشكل هذا التوجه التقني أساساً علمياً لتطوير منتج نسيجي وظيفي وعالي الجودة، قادر على تلبية متطلبات الأسواق الصحية ، وتحقيق أثر اقتصادي وبيئي مستدام في آن واحد.

III. تساؤلات البحث

تتمحور تساؤلات البحث حول كيفية إكساب الأقمشة الخواص الوظيفية المقاومة للجراثيم والذاتية التنظيف باستخدام المواد النانوية بتركيز مختلفة للوصول إلى التركيز الأمثل الذي يحقق أعلى فعالية. كما يتناول البحث في مدى ثباتية هذه الخواص بعد تعرض الأقمشة لعمليات الغسيل المتكررة، مع التأكيد على أهمية أن تكون تقنية التحميل على الأقمشة بسيطة واقتصادية، وذلك عن طريق تصنيع المواد النانوية محلياً واستخدام طرق معالجة غير معقدة. كما تتضمن التساؤلات دراسة تأثير استخدام راتنج الفلوروكربون السداسي كمادة بوليمرية حاملة تساهم في تعزيز خواص المقاومة للماء والثباتية دون التأثير السلبي على راحة وخصائص القماش الأساسية وإمكانية تحضير مركب نانوي بوليميري وتحميله للقماش بطريقة عملية تكسبه خصائص مضادة للجراثيم وذاتية التنظيف بثباتية عالية على الغسيل. هذه التساؤلات ستساعد في تحديد الطريقة المثلى لإنتاج أقمشة تقنية متقدمة لاستخدامات طبية، مستدامة وعملية تلبي احتياجات السوق المحلية وتساهم في تحسين جودة المنتجات النسيجية الطبية.

IV. فرضيات البحث

يمكن تصنيع المواد النانوية محلياً وباستخدام تقنيات معالجة بسيطة واقتصادية، مما قد يساهم في تطوير أقمشة ذات خصائص طبية وتكلفة منخفضة نسبياً مقارنة بالمنتجات المستوردة. هناك علاقة واضحة بين التركيز المستخدم للمواد النانوية وتنشيط نمو الجراثيم على الأقمشة، مع المحافظة على خواص التنظيف الذاتي لفترات طويلة.

التقنيات المستخدمة لتحميل الجسيمات النانوية على الأقمشة يمكن أن تؤثر بشكل مباشر على كفاءة الوظائف المضادة للجراثيم والتنظيف الذاتي، وبالتالي يجب اختيار تقنية مناسبة لضمان أفضل أداء.

دمج جسيمات المواد النانوية مع بوليمر للحصول على مركب نانوي يحسن من ثباتية الخواص الوظيفية دون التأثير سلباً على الخصائص الفيزيائية الأساسية للأقمشة.

٧. أهداف البحث

يهدف البحث الحالي إلى تطوير أقمشة تتميز بخواص وظيفية مضادة للجراثيم وذاتية التنظيف عن طريق المعالجة النهائية باستخدام مواد نانوية مصنعة محلياً، وتحميل القماش المراد معالجته بهذه المواد، بحيث تكون هذه الأقمشة قابلة للاستخدام كأقمشة طبية (غطاء سرير مشفى لمرضى قرح الفراش) ذات مواصفات عالية الجودة. كما يهدف البحث إلى تقديم حل عملي يتيح ربط البنى النانوية بشكل دائم مع الأقمشة، مما يسهل الانتقال إلى مرحلة الإنتاج الصناعي.

٧١. أهمية البحث

يمثل البحث في تطوير أقمشة ذاتية التنظيف ومضادة للجراثيم باستخدام مواد نانوية أهمية كبيرة في تحسين جودة المنتجات النسيجية وتلبية الاحتياجات المتزايدة للوظائف المتقدمة في مختلف المجالات. توفر هذه الأقمشة حماية مستمرة ضد الجراثيم، مما يقلل من خطر العدوى ويعزز من النظافة والسلامة، خصوصاً في أماكن الرعاية الصحية والملابس الرياضية والأقمشة العسكرية. كما تساهم في تقليل الحاجة إلى الغسيل المتكرر، مما يدعم الحفاظ على البيئة من خلال تقليل استهلاك المياه والطاقة والمواد الكيميائية.

بالإضافة إلى ذلك، يتيح هذا البحث إنتاج أقمشة تقنية بمواصفات عالية وبتكلفة منخفضة عن طريق تصنيع المواد النانوية محلياً واستخدام طرق تحميل غير معقدة، مما يعزز من استدامة الصناعة المحلية ويقلل الاعتماد على الاستيراد. ويعتبر دمج الراتنجات البوليمرية مع المواد النانوية مفتاحاً لتحقيق التوازن المنشود بين الوظائف المضادة للجراثيم وخواص التنظيف الذاتي للماء، مع المحافظة على راحة وجودة الأقمشة.

من هذا المنطلق، يشكل هذا البحث خطوة مهمة نحو تطوير أقمشة متقدمة تجمع بين الفعالية والاقتصاد والاستدامة، وتفتح آفاقاً جديدة في سوق النسيج الحديث بما يخدم الصحة العامة ويحسن من جودة الحياة.

VII. مبررات البحث

تكمن مبررات البحث في الحاجة الملحة إلى تطوير أقمشة فائقة الأداء تجمع بين خصائص مضادة للجراثيم وذاتية التنظيف، وذلك باستخدام مواد نانوية تقدم حلاً فعالاً توفر ثباتية عالية عند التعرض لغسيل متكرر وبتكاليف اقتصادية مناسبة. بهدف حل مشكلات ضعف ثباتية الخواص الوظيفية للأقمشة المستخدمة في مراكز الرعاية الصحية.

كما يمثل البحث فرصة واعدة لاستثمار تصنيع المواد النانوية محلياً باستخدام تقنيات بسيطة وقابلة للتطبيق الصناعي، ما يسهم في تقليل الاعتماد على الاستيراد ويعزز من التنمية الصناعية المستدامة. وتسعى الدراسة إلى تطوير مركبات نانوية بوليميرية تجمع بين الفعالية في مقاومة الجراثيم، والقدرة على تنظيف الأقمشة ذاتياً، مع الحفاظ على ثبات هذه الخواص على الغسيل المتكرر.

بناءً عليه، فإن البحث يسعى لخلق قيمة علمية وتقنية حقيقية توجه صناعة النسيج نحو ابتكارات مستدامة ومتطورة تلبي متطلبات السوق العالمية وتحسن من جودة حياة المستخدمين.

VIII. منهجية البحث:

اعتمدت منهجية البحث نهجاً تجريبياً متكاملاً يجمع بين تحضير الفضة النانوية بطريقة خضراء وأكسيد الزنك النانوي بطريقة sol-gel و توصيفهما، وأمثلة تركيز بوليمير فلوروكربون C_6F_6 ثم تحضير مركب بوليميري نانوي $Ag-C_6F_6$ و $ZnO-C_6F_6$ ومعالجة أقمشة قطنية طبية بتقنية (pad-dry-cure) لإكسابها خواص مضادة للجراثيم وذاتية التنظيف. تضمنت الدراسة اختبارات كمية مضادة للجراثيم لقياس نسب تثبيط نمو

جراثيم *S. aureus* و *E. coli*، واختبارات نوعية لمراقبة حالة تثبط نمو الجراثيم (zone of inhibition) إلى جانب قياس زوايا التماس (WCA) لقطرات من الماء والدم وزيت الزيتون مع عينات القماش المعالج قبل وبعد 10 دورات غسيل، مع تحليل إحصائي باستخدام برنامج SPSS اختبار Repeated Measures ANOVA.

IX. مكونات البحث:

- الجزء التمهيدي
- الجزء الأول
 - الفصل الأول: الدراسة المرجعية.
 - الفصل الثاني: الدراسة النظرية.
- الجزء الثاني
 - الفصل الثالث: الأجهزة المستخدمة وطرائق البحث
 - الفصل الرابع: النتائج والمناقشة
 - الفصل الخامس: الخاتمة

X. المصطلحات العلمية:

الاختصار	المصطلح باللغة الإنكليزية	المصطلح باللغة العربية
(HAIs)	Healthcare-Associated Infections	العدوى المرتبطة بالرعاية الصحية
AgNPs	Silver Nano Particles	جسيمات الفضة النانوية
ZnNPs	Zinc Oxide Nano Particles	جسيمات أكسيد الزنك النانوية
DWRs	Durable Water Repellents	مواد طاردة للماء ذات ثباتية عالية
FC	Fluorocarbon	مركب عضوي يحتوي على عنصر الفلور
C ₆ F ₆ -resin	C6 Fluorinated Resin	راتنج فلوروكربون سداسي
pad-dry-cure	Padding-Drying-Curing	(غمر - تجفيف - معالجة حرارية)
FE-SEM	Field Emission Scanning Electron Microscope	المجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy	تحليل مطيافية الأشعة السينية الطاقية التشتتية
AFM	Atomic Absorption Spectroscopy	مجهر القوة الذرية
XRD	X-ray Diffractometer	جهاز الانعراج بالأشعة السينية
CFU	Colony Forming Unit	وحدة تشكيل المستعمرات الجرثومية
E. coli	Escherichia coli	جراثيم الإشريكية القولونية
S. aureus	Staphylococcus aureus	جراثيم المكورات العنقودية الذهبية
ppm $\frac{1\mu g}{1mL}$	parts per million	جزء في المليون

الجزء الأول

1. الفصل الأول: الدراسة المرجعية

1.1 تمهيد:

علم النانومتر هو العلم الذي يتم فيه دراسة وفهم خواص المادة بمستوى المقياس النانومتري، حيث يمكن أن تظهر الخصائص والصفات المعتمدة على البعد والبنية والتي تختلف عن تلك المرتبطة بالذرات أو الجزيئات الفردية أو بالمواد في حالتها الجرمية bulk.

المقياس النانومتري هو المجال الذي تتراوح فيه أبعاد المادة بين (1-100nm) حيث أن $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ (Chakrabarty & Jasuja, 2022)

تقانة النانومتر هي تطبيق المعرفة العلمية للمعالجة والتحكم بالمادة في المقياس النانومتري للاستفادة من الخصائص والظواهر المعتمدة على البعد والبنية.

المادة النانومترية هي المادة التي أحد أبعادها في المقياس النانومتري، أو لها بنية داخلية أو بنية سطح في المقياس النانومتري (Chakrabarty & Jasuja, 2022).

دخلت التقانة النانومترية في بشكل كبير جميع جوانب الحياة العملية، والذي أدى إلى دخول هذا النمط العلمي إلى الصناعة التقليدية محاكاته للطبيعة، حيث اكتشف العلماء أنه يمكن تطوير هياكل أسطح تحاكي الطبيعة باستخدام تقانة النانو (Barthlot and Ehler 1977).

أدى استخدام التقانة النانومترية في المنسوجات إلى الحصول على بدائل ووسائل محسنة عن الوسائل التقليدية بتكاليف معالجة أقل، توفير استخدام الطاقة وأيضاً تقليل المعالجات الكيميائية هي قيمة مضافة ناتجة عن استخدام تقانة النانومتر (Saleem & Zaidi, 2020)

يمكن تقسيم المنسوجات المعالجة بالمواد النانومترية إلى أربعة أقسام رئيسية (Haydon, 2013) :

المنسوجات ذات المعالجة النهائية بالنانومتر (Nanofinished textiles) : هي الأقمشة التي تضاف إليها خاصية على النطاق النانوي بعد تصنيع القماش الأساسي. يشمل ذلك المعالجات والطلاءات التي تتم بعد

التصنيع لتطبيق المواد النانوية أو تصنيع أسطح نانومترية على الألياف. تشمل المواد النانوية المضافة جسيمات نانوية معدنية (مثل الفضة لوظائف مضادة للجراثيم) قد تشمل الأسطح النانومترية تلك التي تصبح خشنة بواسطة المعالجات للخاصية الكارهة للماء ذاتية التنظيف.

المنسوجات ذات المركبات النانومترية (Nanocomposite textiles) : تحتوي الأقمشة ذات المركبات النانومترية على ألياف مركبة تحتوي على واحد أو أكثر من المكونات ذات البنية النانومترية أو المزايج النانومترية. يركز هذا النوع على دمج خصائص النانو في مكونات الألياف قبل التصنيع، المصفوفات البوليمرية هي الأكثر شيوعاً في الألياف المركبة نانويًا.

تشبه الألياف المركبة نانويًا الأقمشة المعالجة نانويًا من حيث أنها قد لا تتطلب تغييرات كبيرة في عملية التصنيع. التعديلات التي تتم على المستوى البحثي قد تواجه تحديات في التوسع للإنتاج لتحقيق مادة مركبة مستقرة. هذه الأقمشة واعدة، لكنها قليلة نسبيًا في السوق التجاري حاليًا.

المنسوجات الليفية النانومترية (Nanofibrous textiles): هي أقمشة تحتوي على ألياف ذات أبعاد نانوية . هذه الألياف لها مساحة مقطع عرضي نانوي، وقد يكون طولها نانوي. يركز هذا النوع من الأقمشة على تصنيع الألياف لاستغلال الخصائص النانوية. قد تنشأ هذه الخصائص إما من تركيب المادة النانوية (مثل الألياف المصنوعة من أنابيب الكربون النانوية ذات القوة العالية جدًا) أو من أبعاد الألياف الفردية (مثل وسائط الترشيح التي تعطي زيادة في مساحة السطح ونفاذية نانوية). يتطلب التصنيع الأولي للألياف عملية قادرة على إنتاج ألياف نانوية (مثل الغزل الكهربائي). بالنسبة للأقمشة المنسوجة، لا تتوفر تكنولوجيا صناعية على نطاق واسع في الوقت الحالي لنسج ألياف بهذا الحجم. علاوة على ذلك، قد يحتاج الصباغ والطلاءات إلى إعادة توصيف لتناسب الألياف النانوية. يمكن دمج الألياف النانوية في الأقمشة عبر إدخالها أو تغليفها

داخل ألياف أكبر. على الرغم من أن البحث في الأقمشة النانوية واسع النطاق، إلا أن القليل منها وصل إلى مستوى تجاري كبير .

الأقمشة غير المنسوجة المعالجة باستخدام تقنية النانومتر (Nano-enabled nonwovens): تستخدم تقنيات النانو في الأقمشة غير المنسوجة لتحسين الخصائص التي تفيد عملية النسيج؛ مثل تحسين الخواص اللاصقة أو استبدال الطرق التقليدية لتثبيت الطبقات بالأسطح النانومترية اللاصقة.

تعد التقنية النانومترية واحدة من التقانات الحديثة المستخدمة في صناعة الأقمشة الذكية، حيث تم استخدام الجسيمات النانومترية لإكساب الأقمشة خصائص مضادة للجراثيم، ومقاومة للأشعة فوق البنفسجية، كارهة للماء وعازلة للحرارة، ومقاومة للحريق، موصله كهربائياً، وبصرية بصورة دائمة في الأقمشة والملابس (Ummah, 2019a).

صناعة النسيج هي واحدة من أكبر الصناعات في العالم التي توفر الاحتياجات الأساسية لكل فرد. للأقمشة التقنية مجالات تطبيق واسعة. لاستخدام المنسوجات في المجال الطبي أهمية كبيرة، يعد النسيج الطبي أحد القطاعات الأسرع نمواً في المنسوجات التقنية. ومن المتوقع أن ينمو القطاع بمعدل نمو سنوي مركب يبلغ 4% بين عامي 2021 و 2026 (Ummah, 2019a).

تتميز الجسيمات النانوية بنسبة مساحة سطح إلى حجم كبيرة، مما يمنحها خصائص فريدة وإمكانات متميزة تختلف عن المادة في حالتها الجرمية (Montazer & Harifi, 2018). تصنع المواد النانوية بطرائق مختلفة تتنوع بين طرائق فيزيائية وطرائق كيميائية يمكن تصنيفها وفق تصنيفين أساسيين إما من الأعلى إلى الأسفل كالطحن الميكانيكي Mechanical milling أو التنرية Sputtering أو من الأسفل إلى الأعلى (Bottom- Up) كالترسيب بالتبخير Vapour deposition أو طريقة السول-جل Sol- gel process (Montazer & Harifi, 2018).

مع التقدم المتسارع في مجال علم النانو وتطبيقاته المتنوعة، برزت إمكانية تحسين خصائص الأقمشة التقليدية وتحويلها إلى أقمشة ذات وظائف متقدمة تلبي متطلبات الاستخدامات الحديثة. من بين الخصائص الوظيفية الأساسية التي حظيت باهتمام واسع، تأتي تثبيط الجراثيم والطرء الدائم للماء في مقدمة الأولويات، خاصة في ظل التحديات الصحية المتزايدة والحاجة إلى الحفاظ على النظافة والراحة في مختلف البيئات.

تعد الأقمشة المقاومة للجراثيم من الحلول الفعالة للحد من نمو وتكاثر الكائنات الدقيقة التي تسبب الروائح الكريهة، وتلف الأقمشة، بالإضافة إلى تقليل مخاطر العدوى، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في المجالات الطبية، والرياضية، والمنزلية (X. F. Zhang et al., 2016).

تشكل المواد النانوية حجر الزاوية في تطوير الأقمشة الوظيفية الحديثة، حيث تستخدم لتعديل وتحسين خصائص النسيج بطرق لا يمكن تحقيقها باستخدام المواد التقليدية. تنقسم المواد النانوية المستخدمة في الصناعات النسيجية إلى عدة أنواع رئيسية تشمل الجسيمات النانوية المعدنية مثل جسيمات الفضة (Ag)، الذهب (Au)، أكسيد الزنك (ZnO)، أكسيد التيتانيوم (TiO₂)، وأكسيد النحاس (CuO)، بالإضافة إلى الألياف والأنابيب النانوية مثل أنابيب الكربون النانوية (CNTs) والألياف النانوية البوليمرية. كما تشمل المركبات النانوية (Nanocomposites) التي تجمع بين مادتين أو أكثر لإكساب الأقمشة خصائص وظيفية (Gokarneshan N., 2015) (Kafafy et al., 2021).

وقد أظهرت الدراسات أن دمج المواد النانوية مثل الفضة وأكسيد الزنك في الأقمشة يعزز من فعاليتها المضادة للجراثيم بفضل قدرتها على التفاعل مع الخلايا الجرثومية وتدميرها (N, 2017) (Anita et al., 2010). من ناحية أخرى، تلعب خاصية طرد الماء دوراً كبيراً في تحسين أداء الأقمشة، حيث تمنع تسرب السوائل وتحافظ على جفاف الأقمشة لفترات أطول، مما يطيل من عمرها الافتراضي ويزيد من راحة المستخدم، تجمع الأقمشة الحديثة بين مقاومة الماء والبقع والنمو الجرثومي، مما يعرف بالقماش "ثلاثي الحماية"، ولهذا النوع

من الأقمشة تطبيقات واسعة في الصناعات التي تتطلب حماية متقدمة مثل الملابس الواقية، والملابس الرياضية، والملابس الطبية (M. Z. Khan et al., 2018). من بين الأقمشة الوظيفية، تعد الأقمشة المضادة للجراثيم والأقمشة ذاتية التنظيف من أهم الأنواع التي تحظى باهتمام واسع نظراً لدورها الفعال في تحسين النظافة والصحة العامة، إلى جانب تقليل الحاجة للغسيل المتكرر والحفاظ على متانة الأقمشة.

2.1 الأقمشة المضادة للجراثيم:

الأقمشة المضادة للميكروبات هي أقمشة وظيفية نشطة قد تقوم بقتل الكائنات الدقيقة أو تثبيط نموها. يوجد أنواعاً متعددة من الأقمشة المضادة للميكروبات بما في ذلك المضادة للجراثيم، والفطريات، والفيروسات. تستخدم هذه الأقمشة في مجموعة متنوعة من التطبيقات من الاستخدامات المنزلية إلى التجارية مثل مرشحات الهواء، تغليف الأغذية، الرعاية الصحية، النظافة، الملابس الطبية والرياضية، التخزين، التهوية وأنظمة تنقية المياه (Gulati et al., 2022).

مع تقدم تقنية النانو، تم تطوير مواد نانوية وظيفية ذات خصائص كيميائية وفيزيائية فريدة. توفر الجسيمات النانوية ذات نسبة مساحة السطح إلى الحجم الكبيرة خيارات واسعة لتطوير عوامل علاجية للعدوى الميكروبية (Huang et al., 2022). تعتبر الجسيمات النانوية المعدنية وأكاسيدها واعدة جداً كمعامل مضادة للميكروبات. تظهر المواد النانوية نشاطاً مضاداً للميكروبات وقدرة على قتل الكائنات الحية الدقيقة بما في ذلك الجراثيم والفطريات والفيروسات. تستخدم المواد النانوية المستخلصة من الذهب والفضة وثاني أكسيد التيتانيوم وأكسيد الزنك وأكسيد النحاس على نطاق واسع في مجالات متنوعة من أهمها أقمشة الرعاية الصحية.

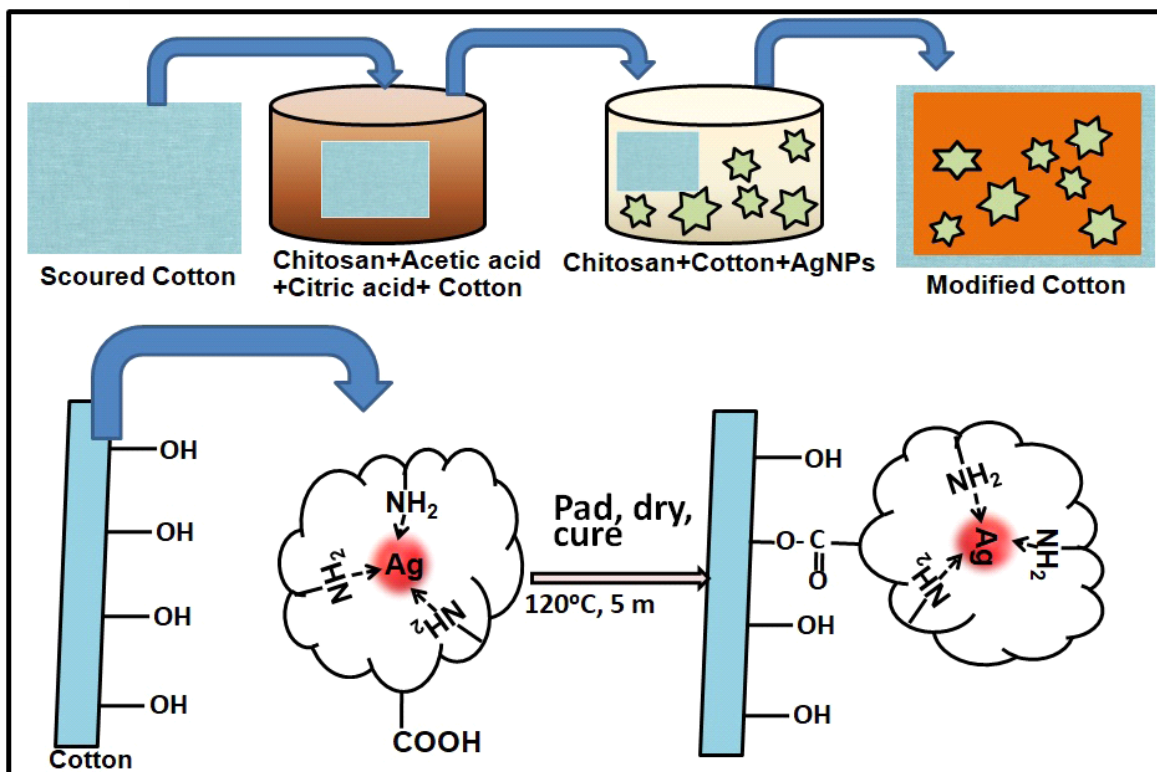
1.2.1 الفضة النانوية:

تعد الفضة النانوية من أوائل المواد التي درست نظراً لخصائصها المضادة للميكروبات وقدرتها على التثام الجروح، تم تسويق العديد من المنتجات التي تحتوي على هذه الجزيئات بشكل تجاري حيث يتم تحضير جسيمات الفضة النانوية عبر مختزلات كيميائية أو مستخلصات نباتية (Huang et al., 2022).

• الاصطناع الحيوي لجسيمات الفضة النانوية باستخدام النباتات:

يعتمد الاصطناع الحيوي (التخليق الأخضر) لجسيمات الفضة النانوية (AgNPs) على استخدام المستخلصات النباتية كعوامل مختزلة ومواد مثبتة، مما يقلل الاعتماد على المواد الكيميائية السامة. تعزى قدرة المستخلصات النباتية على إرجاع أيونات الفضة إلى المركبات الكيميائية النباتية (phytochemicals) الموجودة مثل: الفلانوئيدات والتربينويدات والتربينينات والفلافونيات وعديدات السكاريد والصابونينات والتانينات والقلويدات. وتعود القدرة الإرجاعية لهذه المركبات إلى المجموعات الوظيفية مثل المجموعات الهيدروكسيلية والألدهيدية والكيثونية والأمينية والكربوكسيلية (Nasr et al., 2019).

قام باحثون بتصنيع جسيمات الفضة النانوية (AgNPs) عن طريق الاختزال الحيوي لنترات الفضة باستخدام مستخلص أوراق *Eucalyptus corymbia*. يقوم المستخلص العشبي باختزال وتغطية (تثبيت) جسيمات الفضة النانوية (Rajput et al., 2023). حيث تمت معالجة القماش القطني أولاً بالكتوزان لتوفير مواقع نشطة تساعد على التفاعل مع الفضة النانوية وارتباطها بسطح القماش، الذي يحتوي على العديد من مجموعات الهيدروكسيل بسبب وجود السليلوز في ألياف القطن، جسيمات الفضة النانوية المغلفة بالمستخلص النباتي ترتبط بمجموعات الهيدروكسيل الموجودة في وحدة السيلوبوز ضمن ألياف القطن. تظهر صور المجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحقلية (FESEM) جسيمات الفضة النانوية، مما يشير إلى قدرة مختزلة فعالة لمستخلص نبات اليوكالبتوس في تحويل أيونات الفضة إلى جسيمات نانوية. حيث بلغ قطر الجسيمات 62 نانومتر. يوضح الشكل (1-1) معالجة القماش القطني بالكتوزان والذي يعمل كعامل مثبت لجزيئات الفضة النانوية في القماش القطني.



شكل (1-1): مراحل معالجة القماش القطني بالكيروزان والذي يعمل كعامل مثبت لجزيئات الفضة النانوية في القماش القطني (Rajput et al., 2023)

ازدادت الفعالية المضادة للجراثيم للأقمشة القطنية المعالجة بجسيمات الفضة النانوية عند التراكيز (100-200-300ppm مع زيادة محتوى الكيروزان من 0.5% إلى 1% بنسبة 91.8%، 94.6%، و 97.8% على التوالي بالنسبة لجراثيم E.coli قبل الغسيل (Rajput et al., 2023) .

استخدم باحثون نبات الازدرخت *Azadirachta indica* كمرجع لنترات الفضة لتحضير الفضة النانوية حيث خضعت عينات قماش قطني لعملية مرسرة وتحضير للجسيمات النانوية في الموقع تحت ظروف محددة (درجة حرارة 120 درجة مئوية وضغط 15 psi لمدة 180 دقيقة) باستخدام جهاز صباغة بالأشعة تحت الحمراء المخبرية، وعولجت عينات بدون عملية المرسرة حيث لوحظ أن عملية المرسرة ساهمت بتحسين ارتباط الجسيمات النانوية بالسيلولوز في القماش (Jain et al., 2022) .

اعتماد استراتيجية التخليق الأخضر المباشر (in situ) لجسيمات الفضة النانوية على الأقمشة القطنية بعد عملية المرسرة، باستخدام مستخلص أوراق الازدرخت وتحت ظروف حرارية مائية، أدى إلى زيادة ترسيب المادة النانوية وتحسين الثباتية على الغسيل. هذه الطريقة تميزت بعدم استخدام مواد كيميائية سامة أثناء التصنيع، كما أن ثبات المادة النانوية الكبير على القماش قلل من فقدانها أثناء الغسيل، وبالتالي قلل من التلوث النانوي في مياه الصرف، ما يجعل هذه التقنية أكثر استدامة وصداقة للبيئة. أظهرت الأقمشة القطنية المعالجة بالفضة النانوية (Ag) فعالية متفاوتة ضد ثلاث سلالات جرثومية مقاومة للأدوية (*Klebsiella pneumoniae* سالبة الغرام، (*Escherichia coli*) سالبة الغرام، و(*Bacillus licheniformis*) موجبة الغرام. تم تقييم الأداء باستخدام نهجين: اختبار التخفيف التسلسلي (Microdilution Assay) و طريقة الانتشار بالقرص (Disc Diffusion Method) (Jain et al., 2022).

حضر الباحثون الفضة النانوية عبر مزج مستخلص قشور البازلاء والقرع مع محلول نترات الفضة ($AgNO_3$)، حيث لوحظ تغير لون المحلول من الأخضر المصفر إلى البني، وهو مؤشر على تشكل الجسيمات النانوية. تم تأكيد إنتاج الجسيمات النانوية باستخدام تقنيات مثل مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis)، المجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي (FESEM)، انعراج الأشعة السينية (XRD)، والتحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء (ATR-IR). أظهرت النتائج أن جسيمات الفضة النانوية المنتجة من قشور البازلاء والقرع ذات شكل كروي، وبنية بلورية واضحة، كما تحتوي على نسب عالية من المركبات الفينولية والفلافونويدات ذات النشاط الحيوي عند اختبار النشاط المضاد للجراثيم، أظهرت الفضة النانوية فعالية واضحة ضد جراثيم *Escherichia coli* باستخدام طريقة انتشار القرص، وأثبتت قدرتها على تثبيط نمو الجراثيم الممرضة (Deepa et al., 2022).

• اصطناع الفضة النانوية بطريقة كيميائية:

تعتمد على اختزال أملاح الفضة مثل نترات الفضة (AgNO_3) باستخدام عوامل مختزلة كيميائية مثل بوروهيدريد الصوديوم (NaBH_4) في وجود مثبتات غروية. هذه الطرق تعرف بـ "الكيمياء الرطبة" وتشمل استخدام مواد مثل الكحول، البوليمرات، أو البروتينات لتثبيت الجسيمات النانوية ومنع تكتلها. تتميز هذه الطرق بالدقة والسرعة، لكنها قد تستخدم مواد كيميائية سامة.

صنعت جسيمات الفضة النانوية بأبعاد مختلفة، مما أدى إلى ظهور ألوان متنوعة على أقمشة الحرير والقطن من خلال اختزال نترات الفضة حيث حضرت المحاليل الغروية ذات الألوان المختلفة باستخدام طريقة ميركن حيث تعد طريقة ميركن (Mirkin's method) من الطرق الفعالة لتحضير محاليل Ag-NPs ذات الألوان المختلفة، حيث تعتمد هذه الطريقة على اختزال نترات الفضة في وسط مائي بوجود عوامل مختزلة ومثبتة. في هذا السياق، أجريت عدة دراسات استخدمت فيها هذه الطريقة لتحضير جسيمات الفضة على أقمشة القطن أو الحرير كما في الشكل (1-2)، حيث تم مزج 100 مل من محلول نترات الفضة بمولارية 0.1 مع (0.36) غ من بولي فينيل بيروليديون و (3.6) مل من ثلاثي صوديوم سترات مائي، بالإضافة إلى (0.8) مل من بيروكسيد الهيدروجين، والتحريك لمدة 10 دقائق في درجة حرارة الغرفة. بعد ذلك، تغمر الأقمشة في المحلول وتضاف كميات مختلفة من محلول بوروهيدريد الصوديوم (0.4، 1.4، 1.6، 1.8) مل لتر تحت إشعاع فوق صوتي (100 واط، 40 كيلو هرتز)، ثم يعرض الخليط للإشعاع عند 40 درجة مئوية لمدة 30 دقيقة. أخيراً، تجفف الأقمشة المعالجة عند 50 درجة مئوية لمدة 30 دقيقة (Jafari et al., 2016).

Sample	Treated with silver colloids			
	Green	Brown	Blue	Yellow
Cotton				
Silk				

شكل (1-2): الاختلاف اللوني بين أقمشة القطن والحرير المعالجة بمحاليل مختلفة من الفضة النانوية (Jafari et al., 2016).

أظهرت النتائج أن النشاط المضاد للجراثيم للأقمشة المعالجة بالفضة النانوية يزداد مع تناقص أبعاد الجسيمات على سطح الألياف . ويرجع ذلك إلى أن الجسيمات الأقل حجماً تمتلك مساحة سطح أكبر تتيح تفاعلاً أوسع مع الجراثيم، مما يعزز من قدرتها على الارتباط بجدار الخلية الجرثومية واختراقه، مسببة تغييرات هيكلية في غشاء الخلية تزيد من نفاذيته وتؤدي بالتالي إلى موت الخلية . وقد أظهرت الدراسات أن الجسيمات النانوية ذات البعد الأصغر تمتلك تأثيراً مشبهاً للجراثيم أقوى مقارنة بالجسيمات الأكبر . كما كان تثبيط الجراثيم في الأقمشة الحريرية المعالجة أعلى منه في أقمشة القطن المعالجة، وذلك بسبب احتواء الأقمشة الحريرية على نسبة أكبر من الفضة، وهو ما تم تأكيده من خلال تحليل طيف تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) . أكدت النتائج أن زيادة ارتباط الفضة النانوية مع سطح الألياف يؤدي إلى تحسين النشاط المضاد للجراثيم (Jafari et al., 2016).

أشارت الدراسة إلى أن تحضير جسيمات الفضة النانوية ضمن محاليل كربوكسي ميثيل السليلوز الصوديومي (Na-CMC) باستخدام التحفيز الفوتوكيميائي، وفقاً لنظرية موت-جيرني، يمكن من التحكم الدقيق في شكل

وأبعاد الجسيمات. حيث يمكن تكوين جسيمات مستقرة ذات أشكال كروية وعصوية، بأبعاد تتراوح بين 5 و 35 نانومتر. أظهرت الأقمشة القطنية المطعمة بمحلول Na-CMC الذي يحتوي على جسيمات فضة كروية ضمن هذا النطاق الحجمي نشاطاً مضاداً قوياً ضد سلالات المكورات الجلدية والفطر المبيضي، ويمكن تفسير ذلك بزيادة محتوى الجسيمات ضمن القماش ومساحة سطحها الفعالة.

في المقابل، أظهرت الأقمشة المطعمة بمحلول Na-CMC المحتوي على جسيمات فضة ذات شكل شعيري (whiskers) بأطوال تتراوح بين 130 و 420 نانومتر وعرض 15-40 نانومتر نشاطاً أقل في قتل الجراثيم مقارنةً بالأقمشة التي احتوت جسيمات الفضة الكروية. ويرجع ذلك إلى اختلاف مساحة السطح الفعالة وأبعاد الجسيمات. كما توضح النتائج أن نقصان أبعاد جسيمات الفضة النانوية يعزز من قدرتها المضادة للميكروبات عند تراكيز متساوية داخل المصفوفة البوليمرية.

أثبتت الأقمشة القطنية المعالجة بمحاليل Na-CMC التي تحتوي على الفضة النانوية قدرة قاتلة ومثبطة فعالة ضد الجراثيم والفطريات، كما حافظت هذه الخصائص على ثباتها واستمراريتها حتى بعد تكرار عمليات الغسيل، وهو ما يعود إلى توزيع الفضة النانوية ضمن بنية الألياف النسيجية. وتشير الدراسات أيضاً إلى أن جسيمات الفضة، بغض النظر عن شكلها، لديها القدرة على اختراق جدران الخلايا الدقيقة وتعطيل نموها، مما يجعلها فعالة للغاية في مكافحة العدوى الفطرية والجراثيمية، بالإضافة إلى قدرتها على منع تكون الروائح الكريهة في الأقمشة المعالجة، مما يعزز من قيمة هذه المعالجات في التطبيقات الطبية واليومية (Yunusov et al., 2020).

استخدم باحثون في عملية إنهاء القماش مركبات نانوية لتقليل تكتل جسيمات الفضة النانوية حيث صنع قماش قطني مضاد للجراثيم باستخدام جسيمات الفضة النانوية (AgNPs) بقطر (20 nm) وصمغ التراكانث (GT) القابل للتحلل الحيوي بتركيز مختلفة منه (2-4-6) غ/ل مع كمية ثابتة من الفضة

5% من وزن (GT) الجاف المستخدم في المحاليل بطريقة (pad-dry-cure) لدراسة فعالية القدرة المضادة للجراثيم ضد الإشريكية القولونية والمكورات العنقودية الذهبية، وتأثيرها على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحيوية لعينات القماش القطني .

حققت عينات الأقمشة المعالجة بـ GT/AgNPs تثبيطاً ملحوظاً لنمو الجراثيم بنسبة تصل إلى 99% تؤدي زيادة تركيز صمغ التراجكانث إلى تحسين تغطية الألياف وزيادة ارتباط جزيئات الفضة النانوية معها، حيث يشكل الصمغ شبكة بوليميرية حول الجسيمات النانوية مما يحسن استقرارها ويمنع تجمعها مع الحفاظ على فعاليتها المضادة للجراثيم. حيث تحسنت المتانة وزادت قوة الشد للأقمشة المعالجة بالصمغ من 38 M Pa إلى 45 M Pa وارتفعت الاستطالة من 67% إلى 91% وذلك بسبب تشكيل شبكة بوليميرية تعزز تماسك الألياف (Ranjbar-Mohammadi, 2018).

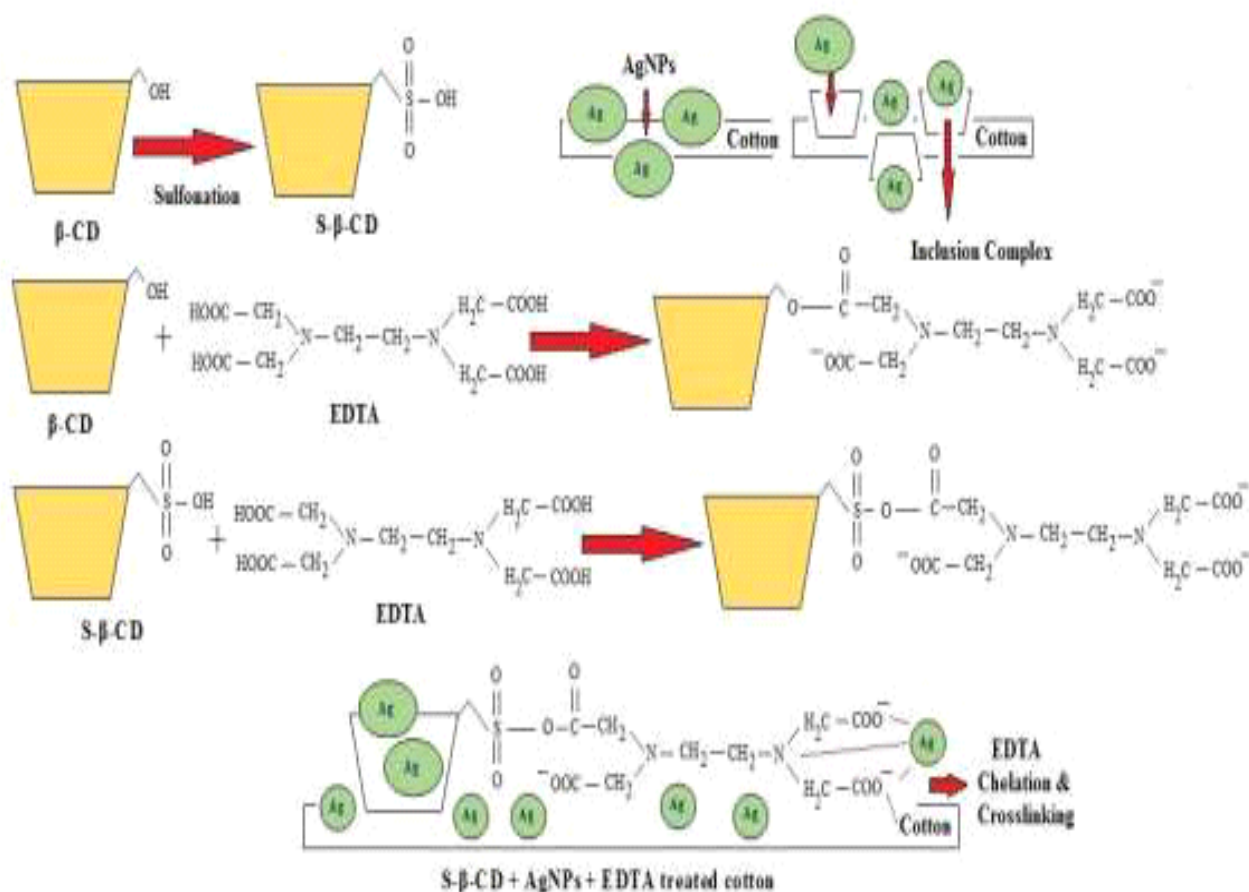
استخدم باحثون جسيمات الفضة النانوية (AgNPs) كعامل مضاد للجراثيم، وتم تكوين مركبات احتواء بين (سايكلودكسترين-β) ومشتقه (سايكلودكسترين-β-المسلفن) مع جسيمات الفضة النانوية بهدف تقليل التأثيرات السمية لها، ثم طبقت هذه المركبات على الأقمشة القطنية مع وبدون مادة الربط الكيميائية (Ethylenediaminetetraacetic acid) (EDTA) باستخدام طريقة (Pad-Dry-Cure) تم اختيار EDTA بسبب قدرته على الارتباط مع أيونات المعادن، وكذلك قدرته على الارتباط مع السايكلودكستريانات. وبفضل التأثير الثنائي الوظيفة لـ EDTA، زادت قدرة السايكلودكسترين على احتواء جسيمات الفضة النانوية، كما تعززت قدرة السايكلودكسترين على الارتباط بسطح القطن عبر تفاعل تشابك (crosslinking).

درست خمس معالجات تشطيب مختلفة كما هو موضح بالشكل (1-3)، أُجريت أربع منها على مرحلتين . تشمل هذه المعالجات:

المرحلة الأولى: تطبيق (سايلودكسترين - β) أو (سايلودكسترين - β) المسلفن مع و بدون عامل الربط (EDTA).

المرحلة الثانية: تطبيق جسيمات الفضة النانوية (AgNPs) لتشكيل معقدات احتجازية (inclusion complexes) على سطح القطن.

أما التي استخدمت كمرجع شملت تطبيق جسيمات الفضة النانوية مباشرة على القطن دون تكوين معقدات احتجازية.



شكل (3-1): معالجات التشطيب المختلفة للقماش القطني (Sari & Arik, 2023).

وفقاً لنتائج الاختبارات المضادة للجراثيم، في العينات غير المغسولة، كانت العينات المعالجة بمشتق السايكلودكسترين β -CD المسلفن هي الأكثر فعالية، بينما في العينات المغسولة، كانت العينات المعالجة بعامل الربط (EDTA) هي الأكثر فعالية. عند النظر في هذه النتائج، اتضح أن S - β -CD أظهر نشاطاً مضاداً للجراثيم أفضل من β -CD لأن البنية المعدلة لـ β -CD عبر تفاعل السلفنة حسنت التمدد في المواد البوليمرية والقدرة على تكوين معقدات احتجازية مع جسيمات الفضة النانوية (AgNPs) التي تقتل الجراثيم. وبالتالي، نظراً لأن عدد المعقدات الاحتجازية المتكونة بواسطة S - β -CD كان أعلى من تلك المتكونة بواسطة β -CD، وجد أن النشاط المضاد للجراثيم كان أفضل.

في حالة EDTA، ضمن عامل الربط المتقاطع EDTA بقاء المعقدات الاحتجازية وجسيمات الفضة النانوية ملتصقة بسطح القماش حتى بعد الغسيل. يعزى هذا الأمر إلى قدرة EDTA على الارتباط بجسيمات الفضة النانوية وتحسين الربط المتقاطع بين القطن والمعدلات الاحتجازية بفضل EDTA.

من حيث نوع الكائنات الدقيقة، لوحظ أن النشاط المضاد للجراثيم ضد الجراثيم إيجابية الغرام (*S. aureus*) كان أفضل من الجراثيم سالبة الغرام (*E. coli*). يعزى هذه النتيجة إلى حقيقة أن الجراثيم إيجابية الغرام لديها غشاء خلوي سيتوبلازمي واحد، بينما الجراثيم سالبة الغرام لديها غشائين خلويين (الغشاء السيتوبلازمي والغشاء الخارجي).

المعالجة باستخدام S - β -CD + AgNPs + EDTA تعزز مقاومة القماش للجراثيم وتزيد من ثبات الفضة النانوية عليه حتى بعد الغسيل المتكرر، ويفسر ذلك بزيادة تكوين المعقدات الاحتجازية التي تثبت الجسيمات على القماش. مما يجعلها طريقة جيدة للتطبيقات الطبية الحيوية (Sari & Arik, 2023).

عولجت أقمشة قطنية محاكة بالطريقة الكيميائية الرطبة لإكسابها خصائصاً فائقة الكره للماء، ذاتية التنظيف، مضادة للجراثيم بتحميلها الفضة النانوية بطريقة التحميل في الموقع حيث يتم غمر القماش التنظيف في محلول

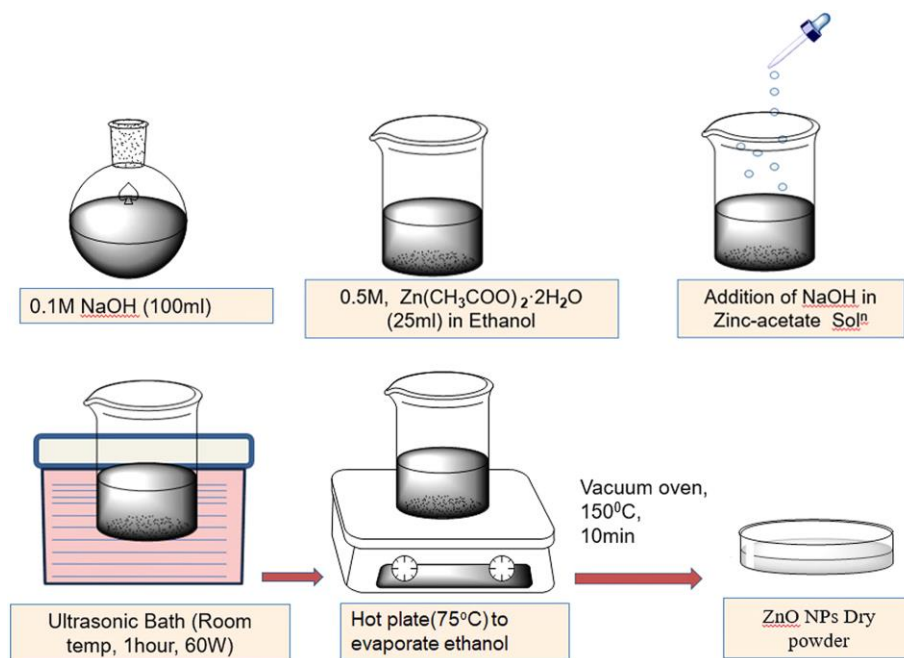
هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) عند درجة حرارة الغرفة لمدة 10 دقائق، مما يؤدي إلى قلوية سطح النسيج بشكل فعال. بعد ذلك، يغمر النسيج في محلول نترات الفضة (AgNO_3) بتركيز 0.5 مول/لتر لمدة 45 دقيقة، مما يسمح لأيونات الفضة بالارتباط بالنسيج، ثم يعالج القماش بمحلول بيرفلوروأوكسيل ثلاثي إيثوكسي سيلان لجعله فائق الكراهية للماء. يبدي سطح القماش خشونة ميكروية نانوية لإكسابه خصائص فائقة الكره للماء. أظهرت اختبارات المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) وتحليل طيف تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) وقياس الطيف بالأشعة تحت الحمراء (FTIR) نجاح التغطية بالفضية ومحلول perfluorooctyltriethoxysilane تبلغ زاوية تماس الماء للقماش المغلف $157 \pm 1^\circ$ كما أظهر القماش المنتج خصائصاً مضادة للجراثيم الاشريكية الكولونية (M. Khan et al., 2024).

2.2.1 أكسيد الزنك النانوي:

يستخدم أكسيد الزنك النانومتر في معالجة الأقمشة لجعلها مضادة للجراثيم، إذ يتميز بقدرته على القضاء على الجراثيم، كما أنه لا يؤثر سلباً على صحة المستخدم مما يجعل استخدامه في الأقمشة مثالياً. حيث يعمل على تدمير جدران الخلايا الجرثومية ومنع تكاثرها، ويمكن أن يضاف إلى الأقمشة بعدة طرق مثل الطباعة والبخ والتغطية (Belay et al., 2020a)

يحضر أكسيد الزنك النانوي (ZnO) باستخدام طرق مختلفة مثل الترسيب الكيميائي (Reningtyas et al., 2021) والتخليق الحيوي (Ibrahim et al., 2024) لتطبيقه في تعديل سطوح المواد النسيجية، وذلك إما باستخدام عامل إرجاع كيميائي أو باستخدام عامل إرجاع عضوي (Asmat-Campos et al., 2021)، حيث تُستخدم أكسيد الزنك النانوي لتحسين خصائص الأقمشة مثل الحماية من الأشعة فوق البنفسجية، تحسين الخصائص المضادة للجراثيم والخصائص ذاتية التنظيف (Belay et al., 2020b).

حضر باحثون أكسيد الزنك النانوي بطريقة معدلة باستخدام خلات الزنك ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) حيث يستخدم الإيثانول كمذيب (Shahidi et al., 2014) يوضح الشكل (4-1) مراحل تحضير أكسيد الزنك النانوي.



شكل (4-1): مراحل تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية (Tania et al., 2022).

يُحضَّر محلول من خلات الزنك ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) بتركيز 0.5 مولار في الإيثانول عند درجة حرارة الغرفة. يُحضَّر 100 مل من محلول مائي 0.1 مولار من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) في وعاء منفصل. يُضاف محلول NaOH ببطء (قطرة قطرة) إلى 25 مل لتر من محلول خلات الزنك مع التحريك المستمر لمدة 15 دقيقة. يُعرَّض الخليط لموجات فوق صوتية باستخدام حمام فوق صوتي بقدرة 60 واط لمدة ساعة واحدة. يُسخَّن المحلول عند 75°C لمدة ساعة إضافية لتبخير الإيثانول. يُجفَّف الراسب الناتج في الفرن للحصول على مسحوق أكسيد الزنك النانوي. توصف الجسيمات النانوية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) وتحليل انعراج الأشعة السينية (XRD) حيث تظهر بلورات ZnO نانوية كروية تقريباً متوسط

قطرها من خلال أنماط XRD باستخدام معادلة ديبي-شريير (Debye-Scherrer) يبلغ حوالي 54.33 نانومتر. تستخدم تقنية تعرف باسم التثبيت الحراري (thermo-fixation) لتطبيق أكسيد الزنك النانوي على القماش باستخدام آلة الغمر، تليها عمليات التجفيف والمعالجة الحرارية، وذلك باستخدام عامل ربط من الأكرليك. قامت الدراسة الحالية بتقييم أداء الأقمشة المعالجة بـ ZnO النانوية من خلال قياس القدرة التثبيطية للجراثيم، والحماية من الأشعة فوق البنفسجية، وخصائص إزالة البقع. استخدمت الطريقة الكمية في الاختبارات المضادة للجراثيم (طريقة التخفيف التسلسلي) حيث تكون الجراثيم تحت ظروف تلامس ديناميكية مع القماش، تظهر النتائج أن القماش المعالج يبدى تثبيطاً كبيراً لجراثيم بالإضافة إلى معدل عال لإزالة البقع وحماية عالية من الأشعة فوق البنفسجية، ووفقاً للدراسة يمكن استخدام أكسيد الزنك النانومري في صناعة النسيج بشكل أكثر من الجسيمات الأخرى مثل الفضة والذهب بسبب تكلفته الرخيصة وخصائصه المتعددة (Tania et al., 2022).

قدم باحثون دراسة منهجية مبتكرة لتحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnONPs) وجسيمات الكيتوزان النانوية (CSNPs) باستخدام تقنيات تخليق حيوي صديقة للبيئة. اعتمدت الدراسة على استخدام المستخلص المائي لجذور نبات المسواك (*Salvadora persica*) كعامل طبيعي فعال في الاختزال والتثبيت أثناء تخليق جسيمات ZnONPs، بينما جرى تحضير جسيمات CS/TPP النانوية عبر تفاعل الكيتوزان مع ثلاثي فوسفات الصوديوم (TPP) مع إدخال تعديلات تحسينية على الطريقة التقليدية. تم تطبيق المادة النانوية المحضرة على أقمشة القطن والفيسكوز باستخدام تقنية (Pad-Dry-Cure).

أظهرت النتائج تحسناً نوعياً في الخصائص الوظيفية للأقمشة المعالجة، حيث سجلت زيادة في زاوية مقاومة التجاعيد (WRA) بنسبة 196° للقطن و 165° للفيسكوز، وهو ما يعزى إلى دور ZnO النانوية في تعزيز التثبيت المتقاطع للإستر وتقليل انزلاق سلاسل السليلوز. كما لوحظت كفاءة عالية في الحماية من الأشعة

فوق البنفسجية (UPF) بلغت 47 للقطن و 40 للفيسكوز، نتيجة قدرة الجسيمات النانوية على امتصاص الأشعة UV-B ومنع اختراقها للقماش.

على الصعيد المضاد للميكروبات، حققت العينات المعالجة بتركيز 15g/L من ZnONPs مع 2.5g/L من CSNPs نسبة تثبيط جرثومي (R%) وصلت إلى 94% ضد *S. aureus* و 89% ضد *E. coli* للقطن، و 97% و 92% للفيسكوز على التوالي. يعود هذا الأداء المتفوق إلى التأثير التآزري بين:

إطلاق أيونات الزنك (Zn^{2+}) وأنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) من جسيمات ZnO النانوية.

الطبيعة الموجبة لشحنات الكيتوزان ($-NH_3^+$) التي تعطل أغشية الخلايا الجرثومية سالبة الشحنة.

المكونات الفينولية في مستخلص المسواك ذات الخصائص المطهرة (Ibrahim et al., 2024).

قام باحثون بتحضير أكسيد الزنك النانوي باستخدام طريقتين رئيسيتين: طريقة الترسيب الكيميائي (S-1) وطريقة التوضع المباشر (In Situ - S-2). في طريقة الترسيب، أُذيب كلوريد الزنك ($ZnCl_2$) في ماء منزوع الأيونات مع التحريك عند 90°C ، ثم أُضيف محلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) تدريجياً لتحفيز ترسيب ZnO. ثم غُسلت عدة مرات بالماء المقطر، وعولجت حرارياً عند 250°C لمدة 5 ساعات لبلورة جسيمات ZnO ذات أبعاد تتراوح بين 40 و 150 نانومتر. أما في طريقة التوضع المباشر، تحضر المادة النانوية في وسط مختلف (الإيثانديول) وعند درجة حرارة 150°C ، حيث تم ترسيبها مباشرة على ألياف القطن من خلال تفاعل كيميائي معقد يشمل نترات الزنك، الأمونيا، واليوريا، مع تسخين وتحريك مستمرين.

طبقت المادة النانوية على أقمشة القطن بأبعاد $10\text{ cm}^2 \times 10\text{ cm}^2$ عن طريق نقع القماش في محلول ZnO في الإيزوبروبانول بتركيز 5%، تلاه عصر وتجفيف عند 130°C . في طريقة التوضع المباشر، تم غسل

القماش مسبقاً، ثم نغعه في محلول نترات الزنك مع إضافة الأمونيا واليوريا، وتسخينه إلى 90° م لمدة ساعة، ثم شطفه وتجفيفه عند 150° م لتعزيز ترابط المادة النانوية.

أظهرت تحليلات المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) أن طريقة الترسيب أنتجت تراكبات نانوية متجانسة على سطح القماش، بينما أنتجت طريقة التوضع المباشر جسيمات ذات أشكال متفرعة تشبه الحزم أو الأزهار بأحجام مختلفة، مما أثر بشكل إيجابي على الخصائص الوظيفية للأقمشة. حيث سجلت طريقة التوضع المباشر قيمة أعلى لعامل الحماية من الأشعة فوق البنفسجية (UPF) وفعالية مضادة للجراثيم ضد *S.aureus* و *E.coli* مقارنة بطريقة الترسيب، ويعزى ذلك إلى زيادة مساحة السطح التفاعلية للجسيمات ذات الشكل المتفرع. تبرز هذه النتائج أهمية التحكم في شروط التصنيع (مثل المذيب ودرجة الحرارة) لتحسين الخصائص الوظيفية للأقمشة الذكية (Belay et al., 2020b).

وجد الباحثون أن المواد النسيجية ذات المعالجة النهائية بمواد نانومترية تتمتع بخصائص فيزيائية أفضل من المنسوجات ذات التشطيب التقليدي، حضرت جزيئات نانوية من أكسيد الزنك بطريقة كيميائية رطبة باستخدام نترات الزنك وهيدروكسيد الصوديوم كمادة أولية والنشا المذاب كعامل تثبيت. حمل ZnO النانوي للأقمشة قطنية بطريقة (غمر - تجفيف - معالجة حرارية) باستخدام رابط أكريليك. استخدمت عينات من نسيج قطني ناعم متوسط الوزن لهذا الغرض. اختبر النشاط المضاد للجراثيم في الأقمشة، بطريقتين قياسيتين، AATCC 147 (اختبار نوعي) و AATCC 100 (اختبار كمي) باستخدام نوعين أساسيين من الكائنات الحية للاختبار كائنات سلبية الغرام (*Escherichia coli*)، كائنات إيجابية الغرام (*Staphylococcus aureus*) حيث أظهرت نتائج الاختبار بطريقة نوعية قطر الهالة للجراثيم السلبية 24mm وقطر الهالة للجراثيم الموجبة 27mm، بينما أظهرت النتائج بطريقة نوعية أن نسبة تخفيض الجراثيم السلبية الغرام 80% ونسبة تخفيض الجراثيم موجبة الغرام 100%. أثبتت طريقة المعالجة (Pad-Dry-Cure) كفاءتها في تثبيت المادة النانوية

على الأقمشة . لم يقدم الباحثون أي معلومات حول ثباتية الخواص المضادة للجراثيم بعد الغسيل (Babu et al., 2021).

3.1 الأقمشة ذاتية التنظيف:

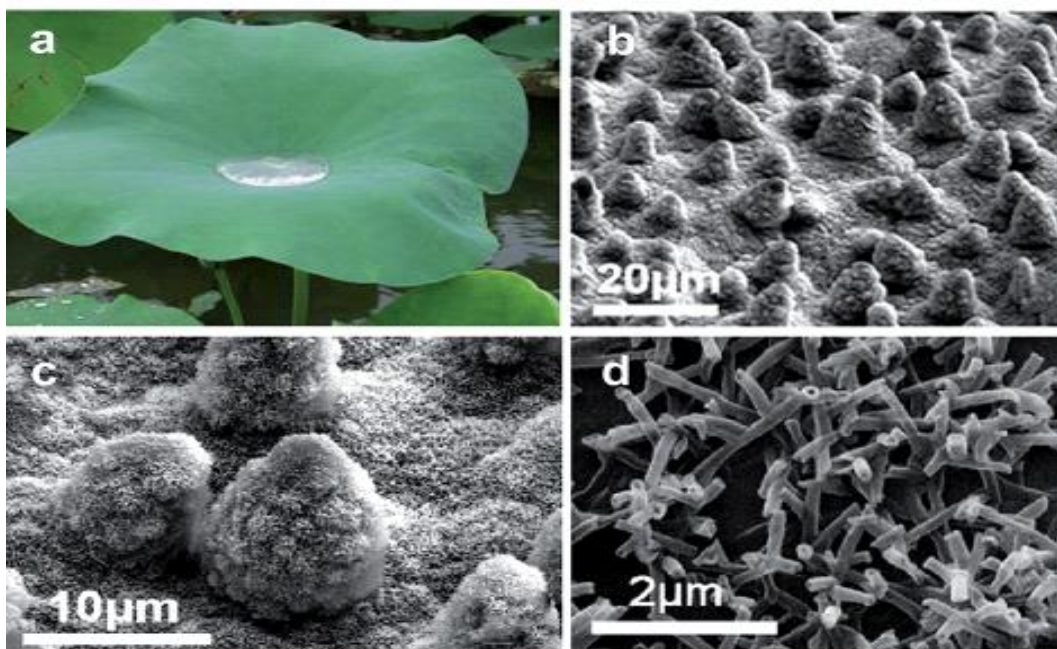
إن الوظيفة الأساسية للمنسوجات التقليدية هي المحافظة على دفء جسم الإنسان إلى جانب العزل الحراري والحماية من العوامل الجوية (المطر). ومع تطور مستويات المعيشة وزيادة عدد سكان العالم، تزايدت بسرعة المتطلبات الجديدة التي يتوقع من المواد النسيجية تلبيتها لمواكبة الاحتياجات المتغيرة. ومن بين هذه المتطلبات، تأتي خاصية الطرد للماء والزيوت، أو ما يعرف بفائق الكره للماء (superhydrophobicity)، في مقدمة الخصائص المرغوبة لدى المستهلكين. وتعد مقاومة الماء والزيوت ضرورية في العديد من الاستخدامات النهائية مثل ملابس العمل، وملابس المطر، الأقمشة الطبية، وأقمشة التنجيد، والستائر، وملابس الرياضات الخارجية (Borkowicz et al., 2017).

لطالما كانت مقاومة الماء والأوساخ من الأهداف الرئيسية للباحثين والمصنعين في مجال الألياف والمنسوجات على مدى قرون. وقد تم تطوير تركيبات تجمع بين مواد جديدة لإنتاج الألياف مع مجموعة متنوعة من المعالجات السطحية، بهدف الوصول إلى أقمشة وظيفية ذاتية التنظيف (Ummah, 2019b).

حاول الباحثون تطبيق مقارنة لظاهرة البلل من الطبيعة من خلال دراستهم لسطح نبات اللوتس وبعض الحشرات التي تظهر كراهية شديدة للماء وذات خصائص تنظيف ذاتية استثنائية (Darmanin & Guittard, 2015) البداية الحقيقية لتحقيق الأسطح ذاتية التنظيف كانت من خلال محاكاة الطبيعة، ولهذا تعرف الأسطح ذاتية التنظيف أيضاً بالأسطح المستوحاة من الطبيعة (Neinhuis (bio-inspired surfaces (Beek et al., 2024) (Beek et al., 1997).

استفيد من ظاهرة كراهية الماء التي تتمتع بها أوراق زهرة اللوتس في تطوير مواد طاردة للماء ذات ثباتية عالية (Durable Water Repellents – DWRs) تحاكي البنية المجهرية الفريدة لسطح أوراق اللوتس، في عام 1974، اكتشف البروفيسور فيلهلم بارثلوث من معهد نيس للتنوع البيولوجي في بون، ألمانيا، أن الخشونة المجهرية والكيمياء السطحية لأوراق بعض النباتات تؤدي إلى بقاء قطرات الماء على شكل كروي على السطح (Borkowicz et al., 2017).

وفي عام 1997، نشر (Barthlott and Neinhuis) مقالاً رائداً بعنوان "نقاء اللوتس المقدس"، أو "الهروب من التلوث في الأسطح البيولوجية" والذي أحدث تحولاً حقيقياً في علم الأسطح. في هذا المقال، شرحا خصائص طرد الماء والتنظيف الذاتي للنباتات، معزّين خاصية الكره الفائقة للماء (superhydrophobicity) إلى وجود نتوءات هرمية مغطاة بطبقة شمعية نانوية على سطح الأوراق كما هو موضح بالشكل (1-5) تعزز من كراهية الماء وتنظيف الذات وأطلق على هذا التأثير اسم "تأثير اللوتس" (Neinhuis & All, 1997) (Vonna, 2023).



شكل (1-5): صور المجهر الإلكتروني الماسح لسطح ورقة نبات اللوتس (Li et al., 2016)

1.3.1 نظريات الترطيب:

درس الباحثون نظريات الترطيب وفق النماذج الثلاث نموذج يونغ، نموذج وينزل ونموذج كاسي _ باكستر وأوضحوا آلية تصنيع سطوح مضادة للبلل عن طريق التركيز على الدمج بين عاملين أساسيين هما خشونة السطح وكيميائية السطح حيث تم شرح آلية تصنيع هذه السطوح وفق استراتيجيات مختلفة (Williams, (Derek Heywood, 2003) (2018).

تم تصنيف مواد DWRs إلى ثلاث فئات رئيسية تعتمد على أساس الفلوروكربون، والسليكون، والهيدروكربون (Holmquist et al., 2016)

تعتبر مواد السيليكون طاردة للماء عند تراكيز منخفضة، لكنها توفر ثباتية متوسطة فقط عند الغسيل والتنظيف الجاف، ولا توفر طرداً للزيت أو الأوساخ. أما الهيدروكربونات، فهي لا توفر طرداً للزيت رغم تشابهها مع الأسطح الطبيعية منخفضة الطاقة مثل أوراق النباتات التي تعتمد على التبلور الشمعي لتحقيق الطرد (Derek Heywood, 2003).

تعد مواد DWR المعتمدة على الفلوروكربون أو المواد الكيميائية الفلورية الأكثر شيوعاً وفعالية، نظراً لانخفاض طاقتها السطحية الحرة (γ) مقارنة بالتوتر السطحي للماء (γ_L)، حيث لكي يكون طرد السائل فعالاً، يجب أن تكون طاقة سطح القماش أقل من طاقة السائل. فالتوتر السطحي للماء يبلغ 73 mN/m ، بينما تتراوح طاقة سطح مركبات الفلوروكربون بين $10-20 \text{ mN/m}$ ، مما يجعلها فعالة جداً في طرد الماء والأوساخ (Mehta, 2020) (Ni & Zhang, 2017).

ومع ذلك، يشتهر في أن مركبات الفلوروكربون التقليدية القائمة على سلاسل كربون-فلور طويلة (C8) تطلق مكونات سامة وثابتة بيولوجياً مثل حمض البيروفلوروكتانويك (PFOA) وسلفونات البيروفلوروكتان (PFOS)، والتي تؤثر سلباً على الهرمونات واستقلاب العمليات الخلوية عند الإنسان. استجابةً لذلك، تم تطوير مركبات

فلوروكربون قصيرة السلسلة C_6 ، تقدم بديلاً أكثر أماناً مع تقليل احتمالية التراكم الحيوي أبلغ أن حمض البيرفلوروهكسانويك (PFHxA)، المنتج الرئيسي لتحلل مركبات C_6 ، يظهر تراكمًا حيويًا أقل بمقدار 40 مرة مقارنة بـ PFOA (Mondal, 2021).

2.3.1 المعالجة النهائية للأقمشة باستخدام الفلوروكربون:

شهدت الأبحاث الحديثة اهتماماً متزايداً في تطوير أقمشة قطنية متعددة الوظائف تجمع بين خاصية كراهية الماء (superhydrophobicity)، التنظيف الذاتي، النشاط المضاد للجراثيم، والحماية الفعالة من الأشعة فوق البنفسجية (UV protection)، باعتبار هذه الخصائص ضرورية لتحسين الأداء الوظيفي للأقمشة.

المركبات الكيميائية المشبعة بالفلور Perfluorochemicals (PFCs) هي المواد الكيميائية الوحيدة القادرة على صد الماء والزيت والسوائل الأخرى المسببة للبقع. الأقمشة المعالجة بمركبات PFC تتمتع بخواص عدم الالتصاق؛ وتستخدم هذه العائلة من المركبات في معظم المعالجات النهائية المقاومة للبقع المتوفرة في السوق اليوم (Sayed & Dabhi, 2014).

إن إضافة طبقة رقيقة جداً من مادة فلورية على السطح تغير بفعالية خصائص المادة المعالجة لتصبح غير قطبية إلى حد كبير بسبب الكهرسلبية العالية للفلور حيث أن السطح ذو الكهرسلبية العالية يملك أقل مساهمة قطبية في طاقة السطح. لذلك، كانت معالجة الأسطح بالفلوروكربونات ذات السلسلة الطويلة C_8 شائعة جداً في صناعة الأقمشة المقاومة للسوائل منذ أواخر خمسينيات القرن الماضي حتى حظر وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) لمركبات C_8 في عام 2015. حالياً، يعتبر استخدام مركبات فلوروكربون أقصر سلسلة C_6 آمناً بيئياً (Williams, 2018).

سعى الباحثون لتطوير نسيج قطني مقاوم للانكماش بجعله كارهاً للماء صنع قماش قطني كاره للماء عن طريق معالجته بمستحلب راتينج الفلوروكربون C_8 بتركيز مختلفة مع محفز بطريقة (pad-dry-cure). غمر

نسيج قطني مبيض 100% بمحاليل من راتنج الفلورو كربون C₈-reisen بتركيز (10-20-30-40-50-60g/l)، بالإضافة إلى المحفز Biocat M بتركيز تتراوح من (2-4-6-8-10-12g/l) على التوالي، عند PH 5 إلى 6 باستخدام حمض الأسيتيك بنسبة تشريب 80% وجففت العينات المعالجة عند درجة حرارة 150 درجة مئوية لمدة دقيقتين، تلاها التثبيت الحراري عند 185 درجة مئوية لمدة دقيقة واحدة. حيث أصبح نسيج القطن كارهاً للماء بزاوية تماس WCA تكون ثابتة تقريباً بين 123° و 127° قبل وبعد 10 دورات غسيل.

أنتجت أقمشة قطنية مقاومة للانكماش جعلها كارهة للماء باستخدام بوليمر الفلورو كربون. حققت نتائج الانكماش المرغوبة عند التركيز الأقل (10 إلى 20 غ/ل) من الفلورو كربون حيث تمنع المادة الطاردة الماء الموجودة في القماش القطني المعالج تغلغل الماء في مناطقه غير المتبلورة وبالتالي يقاوم الانكماش يمكن تحقيق تقليل في الانكماش بنسبة 50% أو أكثر (في اتجاهي السداء واللحمة) مقارنة بالقماش غير المعالج (A. K. Jain et al., 2019).

قيمت البدائل الكيميائية الطاردة للماء للمركبات المفلورة طويلة السلسلة الضارة بالبيئة لمساعدة صناعة النسيج في العثور على بدائل فعالة محلها. درست أقمشة البوليستر (PES) والبولي أميد (PA) المعالجة بمواد طاردة للماء من الفلورو كربون طويل السلسلة L-SFP (C₈ مرجعي)، الفلورو كربون قصير السلسلة S-SFP (C₆-C₄)، مركبات السيليكون (Si's)، والهيدروكربونات (HCS) شمع برفين

أظهرت L-SFP (C₈) أفضل أداء في الطرد المائي والزيتي مع ثباتية عالية على الغسيل، نتيجة بلورة مجموعات CF₃ ذات التوتر السطحي (γsg=6 mN/m) وتوجيه مثالي للسلاسل الطويلة (n=8). حققت S-SFPs (C₆-C₄) طرداً مائياً أولياً مقارباً لـ C₈ بغض النظر عن الركيزة (PES/PA) بفضل كفاءة كافية لطرده الماء حيث (γH₂O=72.5 mN/m) رغم عدم بلورة السلاسل القصيرة (n≤6)، لكن الثباتية والطرده

الزيتي بعد الغسيل ينقص مع تقصير سلسلة البيرفلوروالكيل بسبب فقدان التوجه البلوري وتعرض مجموعات CF_2 - ذات التوتر السطحي ($\gamma_{\text{sg}}=18 \text{ mN/m}$) للماء والزيت، ولكن التثبيت الحراري بدرجة حرارة مرتفعة نسبياً 100 درجة مئوية لمدة 10 دقائق يعيد توجيه المجموعات.

أما DWR غير المغلورة ($\text{Si's} + \text{HCs}$) فأظهرت نتائج متناقضة في الطرد المائي والثباتية لأن التوتر السطحي ($\gamma_{\text{CH}_3}=22 \text{ mN/m}$) أقل من التوتر السطحي للماء لكنه أكبر من التوتر السطحي للزيوت ($\gamma<32 \text{ mN/m}$)، ولم تتمكن أي من البدائل غير المغلورة من توفير مقاومة زيتية بسبب توتر السطح الحرج المرتفع لمجموعات CH_3 الطرفية (Schellenberger et al., 2018).

قام الباحثون بدراسة حديثة لتطوير أقمشة قطنية محاكة من نوع السنجل جورسيه باستخدام مادة الديندريمر ($\text{C}_6\text{-FC-dendrimer resin}$) عبر طريقة (Pad-Dry-Cure) بهدف منح الأقمشة مجموعة من الخصائص الوظيفية المتقدمة. شملت هذه الخواص مقاومة الماء، والتنظيف الذاتي، وفصل الزيت عن الماء، والمقاومة للأحماض، والخواص المضادة للجراثيم، والحماية من الأشعة فوق البنفسجية، بالإضافة إلى مقاومة اللهب، مع الحفاظ في الوقت ذاته على مستويات مقبولة من الراحة لمرتدي هذه الأقمشة.

أظهرت النتائج أن معالجة الأقمشة القطنية بتركيز عالية من FC-dendrimer (90-100) غ/ل أدت إلى تحقيق مقاومة ممتازة للماء وقدرة فعالة على فصل الزيت عن الماء، إلا أن هذه التراكيز أثرت سلباً على خصائص الراحة مثل التهوية والنعومة ومرونة النسيج. في المقابل، أظهرت الأقمشة المعالجة بتركيز متوسطة (60-70-80) غ/ل توازناً أفضل بين الأداء الوظيفي والراحة، حيث أبدت بمستويات مقاومة جيدة للماء وفصل الزيت عن الماء، إلى جانب فعالية عالية في مقاومة الجراثيم ومقاومة اللهب، مع الحفاظ على نفاذية هواء وامتصاص رطوبة وقوة شد مقبولة.

تعود هذه النتائج إلى البنية الجزيئية الفريدة للدندريمر، حيث تساهم تفرعاته النانوية في تكوين طبقة سطحية تخفض طاقة السطح للألياف القطنية، مما يعزز من خاصية كره الماء ويمنح القماش قدرات تنظيف ذاتي ومقاومة للأوساخ. كما أن هذه المعالجة تحاكي تأثير اللوتس الطبيعي، وتوفر حماية إضافية ضد اللهب من خلال آلية إطلاق غازات تقلل من تركيز الأكسجين حول الألياف عند التعرض للحرارة.

خلصت الدراسة إلى أن التركيز الأمثل لمادة FC-dendrimer هو 70 غ/ل، حيث يحقق هذا التركيز توازناً بين تعدد الوظائف وراحة المستخدم، ويوفر قماشاً قطنياً متعدد الاستخدامات مناسباً للملابس الواقية والتطبيقات الطبية والبيئية مع الحفاظ على جودة القماش. توصي الدراسة بمواصلة البحث في تأثير الغسيل المتكرر على ثباتية الخصائص الوظيفية للأقمشة المعالجة بهذه التقنية (Mondal, 2021).

عمل الباحثون على تقييم أثر تركيز المواد الكيميائية (خاصة تلك القائمة على الفلوروكربون) ودرجة حرارة المعالجة على خصائص مقاومة الماء، نفاذية الهواء، ومتانة الأقمشة القطنية المنسوجة والمحاكاة. استخدم قماش قطني مبيض من نوعين، قماش محاك سنغل جيرسي وقماش منسوج سادة. اشتملت الدراسة على ثلاثة أنواع من المواد الطاردة: (Nuva TT مشتت لمركب فلوري)، (Rucostar EEE6 راتنج فلورو كربون سداسي دندريمرات متفرعة) و (Lurotex Protector RP ECO راتنج فلورو كربون سداسي معزز ايزوسيانات). استخدمت طريقة (Pad-Dry-Cure) بدرجات حرارة (140-160-180) درجة مئوية وتراكيز كيميائية (50-30-10) غ/ل.

أظهرت العينات مقاومة ماء أعلى عند المعالجة الحرارية عند 180 درجة مئوية مقارنة بالعينات التي عولجت حرارياً عند 140 درجة مئوية و 160 درجة مئوية ويعود السبب إلى أن درجة الحرارة العالية مناسبة لعملية المعالجة الحرارية، وهي الشرط الرئيسي لإظهار مقاومة بلل جيدة، حيث يحدث خلال المعالجة الحرارية

تفاعلات تشابك (crosslinking) بين المواد المقاومة للماء وجزيئات الألياف . أظهرت العينات المحاكاة نتائج أفضل مقارنة بالعينات المنسوجة، وذلك لأن كثافة النسيج تلعب دوراً في تحسين مقاومة البلل.

زيادة التركيز الكيميائي من 10 إلى 30 غ/ل حسنت من مقاومة الماء، حيث وصلت بعض العينات إلى 100% مقاومة حتى عند 160 درجة مئوية مع ثباتية عالية بعد 5 و 15 دورة غسيل للعينات المعالجة عند درجات حرارة أعلى، كما انخفضت نفاذية الهواء للعينات المعالجة عند 140 درجة مئوية مع زيادة تركيز المواد الكيميائية بسبب زيادة طبقة التغطية وتناقص الفراغات بين الألياف.

أكدت نتائج الاختبار أهمية ضبط تركيز المادة الكيميائية للحفاظ على توازن بين مقاومة الماء وتهوية القماش. لوحظ انخفاض طفيف في مقاومة التمزق وقوة الشد مع زيادة التركيز الكيميائي، مع بقاء النتائج ضمن الحدود المقبولة. زادت مقاومة الاحتكاك مع ارتفاع تركيز المادة الكيميائية نتيجة لتكوين سطح ناعم جداً بفضل الفلوروكربون.

تؤكد الاستنتاجات فعالية استخدام مواد طاردة تعتمد على الفلوروكربون وخاصة بتقنية C₆ الخالية من مركبات PFOA و PFOS لإكساب الأقمشة القطنية خصائص مقاومة للماء مع الحفاظ على الراحة والأداء الميكانيكي المقبول. لم تتطرق الدراسة إلى المعالجة بمركبات من الفلوروكربون ومادة نانوية (Ghosh et al., 2020).

طبقت تقنية سهلة ومنخفضة التكلفة لتحضير أقمشة متعددة الوظائف، حيث عولجت الأقمشة القطنية بأكسيد الزنك النانوي بتركيز (1-2-3) % وزن عبر عمليات الغمر، العصر، التجفيف، والمعالجة الحرارية (Dip-Pad-Dry-Cure)، تلتها تغطية بطبقة من محلول الفلوروكربون بتركيز 40 غ/ل بنفس التقنية بهدف تعزيز خاصية الطرد المائي وتحسين متانة التغطية.

حققت الألياف القطنية ترابطاً جيداً مع ZnO النانوي، ويعزى ذلك بشكل رئيسي إلى وجود مجموعات الهيدروكسيل ($-OH$) على سطح الألياف، مما يعزز الترابط بين المادة النانوية والقماش.

في اختبار الحماية من الأشعة فوق البنفسجية، لوحظ ارتفاع ملحوظ في معامل الحماية (UPF) للأقمشة المعالجة بـ ZnO، نتيجة للقدرة الممتازة لهذه الجسيمات على امتصاص الأشعة فوق البنفسجية مقارنة بالأقمشة غير المعالجة. أما من حيث تحسين خاصية كراهية الماء، فقد أدت التغطية بالفلوروكربون وحده إلى إحداث زاوية تماس ماء ثابتة تقارب 130° وعند دمج هذه الطبقة مع الأقمشة المعالجة بـ ZnO النانوية بالتراكيز (1-2-3)% وزن، ارتفعت زوايا التماس إلى 139.5° ، 143.1° ، و 145.7° على التوالي مع زيادة تركيز المادة النانوية، مصحوبة بتناقص ملحوظ في زاوية الانزلاق (roll off angle) يعود هذا التحسن إلى تكوين سطح ذي بنية ميكروية نانوية.

فيما يتعلق بالتنظيف الذاتي للقماش المعالج، أظهر الاختبار الفيزيائي قدرة قطرات الماء المتدرجة على إذابة وإزالة البقع الصبغية بسرعة وكفاءة. أما الاختبار الكيميائي، فقد أظهر نشاطاً تحفيزياً فعالاً تحت تأثير الأشعة فوق البنفسجية، مما أدى إلى تحلل مواد البقع الصبغية، مما يبرز خاصية التنظيف الذاتي الكيميائي ZnO.

تخلص الدراسة إلى أن دمج جسيمات أكسيد الزنك النانوية مع طبقة فلوروكربون يمكن من إنتاج أقمشة قطنية متعددة الوظائف تتمتع بخواص طرد مائي، حماية من الأشعة فوق البنفسجية، وتنظيف ذاتي، مع الاستفادة من طريقة تطبيق عملية واقتصادية

ومع ذلك، لم يقيم الباحثون بتقييم ثبات الأداء الوظيفي بعد عدة دورات غسيل، كما أن تطبيق المادة النانوية يليه المادة البوليميرية قد يؤدي إلى فقدان المادة البوليميرية مع تكرار الغسيل، مما يسبب تراجعاً في خاصية

الطرد المائي. علاوة على ذلك، لم تتناول الدراسة الخواص المضادة للجراثيم للعينات المعالجة كما تم في البحث المدروس (Y. Wang et al., 2022).

استخدم الباحثون أكسيد الزنك النانوي لتحسين الخصائص المضادة للجراثيم لأقمشة الباتيك وهو قماش تقليدي إندونيسي تم الاعتراف به كتراث ثقافي غير مادي من قبل اليونسكو لأكثر من عقد من الزمن بفعالية عالية تم تصنيع المادة النانوية عبر تقنية الترسيب والأمواج فوق الصوتية (precipitation-sonication) باستخدام كلوريد الزنك ($ZnCl_2$) كمادة أولية، حيث بلغ متوسط بعد الجسيمات نحو 54.76 نانومتر بنسبة نقاوة عالية بلغت 99.77% مما يعزز من فعاليتها.

طُبِقَ شمع الباتيك على عينات القماش القطني المدروس وفق النمط المطلوب ثم صبغ بصبغة الانديجو ثم أُزيل الشمع وغسل القماش وحمل بجزيئات أكسيد الزنك النانوية بطريقة (غمر-تجفيف-معالجة حرارية) حملت عينات القماش القطنية البيضاء المدروسة غير مصبوغة بجزيئات أكسيد الزنك النانوية ثم تم تطبيق الباتيك عليها وصباغتها. حملت عينات القماش البيضاء بأكسيد الزنك النانوي ولم تتم صباغتها. أظهرت دراسات تطبيق ZnO نانو على الأقمشة أن تسلسل التطبيق يلعب دوراً حاسماً في تحقيق أفضل فعالية مضادة للجراثيم. أبدت عينات القماش المعالجة بأكسيد الزنك النانوي قبل المعالجة بالشمع والصباغة نشاطاً تثبيطياً للجراثيم أعلى من العينات المحملة بأكسيد الزنك النانوي بعد معالجتها بالشمع وصباغتها بشكل طفيف بسبب عملية الصباغة وإزالة الشمع التي قد تسبب مغادرة بعض جزيئات أكسيد الزنك النانوية للقماش.

أظهرت أقمشة الباتيك المحملة بأكسيد الزنك النانوي قوة لون وثباتية لونية أعلى من أقمشة الباتيك غير المحملة بأكسيد الزنك النانوي حيث زادت جزيئات ZnO من جاذبية الصباغ للقماش.

من جهة أخرى، يلاحظ زيادة القدرة اللونية مقاسة بقيمة (K/S) في حالة تطبيق جزيئات ZnO بعد الصباغة، وبالتالي تعزيز ثبات اللون، بينما انخفضت قدرة اللون عند تطبيق ZnO قبل الصباغة نتيجة تفاعل الجزيئات

مع مجموعات الهيدروكسيل بالألياف مما يحد من ارتباط الصبغات التفاعلية. ومع ذلك، لم يؤثر تطبيق ZnO النانوي على ثبات اللون خلال الغسيل، حيث حافظت جميع العينات على تقييم جيد من 4-5 على المقياس الرمادي حسب معايير ثبات اللون.

بالإضافة إلى ذلك، كان لجزيئات ZnO تأثير ملحوظ على تحسين الخواص الميكانيكية للأقمشة، حيث زادت قيمة قوة الشد وانخفضت الاستطالة عند الانقطاع، مع أفضل تأثير للحالة التي تم فيها تطبيق ZnO بعد صنع الباتيك، مما يشير إلى زيادة متانة الألياف.

تبرز هذه الدراسات دور جزيئات أكسيد الزنك النانوية في تطوير أقمشة قطنية تجمع بين مضادات الجراثيم، الحفاظ على خواص الصباغة، وتحسين القوة الميكانيكية. ولكن لم تتطرق الدراسة لإمكانية اكتساب القماش خواص ذاتية التنظيف (Eskani et al., 2022)

ركز الباحثون في دراستهم المنشورة في مجلة Industrial Textiles على تطوير طريقة مبسطة وفعالة للمعالجة النهائية للأقمشة القطنية لإكسابها خصائص مضادة للجراثيم باستخدام محلول من الفضة النانوية الغروية. طبقت جزيئات الفضة باستخدام طريقتين، الأولى هي تقنية "pad-dry" التقليدية، والثانية هي التطبيق المشترك مع مركبات كيميائية مثل عوامل مقاومة التجعد (Cellofix ME و Fixapret ECO) والمواد الطاردة للماء (Rucostar EEE).

أظهرت الدراسة أن التركيز الأمثل لجزيئات الفضة النانوية يعتمد على نوع الجراثيم؛ حيث تحقق فاعلية عالية ضد الجراثيم موجبة الغرام (*S. aureus*) عند تركيز يتراوح بين 100-150ppm، بينما يعتبر تركيز 300ppm مثالياً للقضاء على الجراثيم سالبة الغرام (*E. coli* و *P. Aeruginosa*) كما ثبت أن التطبيق المشترك مع عوامل التثبيت الراتنجية يحسن من مقاومة الغسيل والاحتكاك مقارنة بطريقة "pad-dry" وحدها،

إذ تعمل هذه العوامل على ربط سلاسل السليلوز وإنشاء شبكة متينة داخل الألياف تحجز الجزيئات وتقلل من فقدانها.

علاوة على ذلك، لم تؤثر هذه المعالجات النهائية المشتركة سلباً على خواص القماش الفيزيائية مثل مقاومة التجعد وزاوية الرجوعية، فضلاً عن عدم التعارض مع خصائص الطرد المائي، مما يجعل هذه الطريقة مناسبة لتطبيقات الأقمشة الطبية والصناعية التي تتطلب توازناً بين الفعالية المضادة للجراثيم والثباتية. لم يظهر البحث نوع المادة الطاردة للماء ولم يركز على الخواص ذاتية التنظيف أو كراهية القماش للماء (Khoddami et al., 2012).

ركزت معظم الدراسات المرجعية على استخدام المعالجات النهائية بمركبات نانوية لمنح الأقمشة خصائص ذاتية التنظيف ومضادة للجراثيم. تبين أن طرق المعالجة التقليدية تعتمد إما على استخدام مواد بوليمرية تليها المواد النانوية، أو العكس. بينما في بحثنا الحالي، تم التركيز بشكل خاص على تصنيع مركب بوليمري نانوي متكامل، حيث تم تحضير المواد النانوية محلياً وأمثلة تركيز المادة البوليمرية، ومن ثم الحصول على مركب بوليمري نانوي فعال. هذا المركب تم استخدامه في معالجة الأقمشة القطنية لتطبيقات طبية، مع دراسة تفصيلية لخصائصه المضادة للجراثيم وذاتية التنظيف وثباتية مواد المعالجة على الغسيل لعدة دورات غسيل مما يبرز طابع الابتكار والتطوير في البحث الحالي مقارنة بالدراسات السابقة.

يوضح الجدول (1-1) مقارنة بين بعض الدراسات المرجعية المذكورة في البحث والمتقاربة مع دراستنا الحالية.

جدول (1-1): مقارنة بين بعض الدراسات المرجعية المذكورة والمتقاربة مع دراستنا الحالية

الفعالية المضادة للجراثيم وزاوية التماس بعد الغسيل	الفعالية المضادة للجراثيم وزاوية التماس قبل الغسيل	الطريقة المستخدمة في تحضير الجسيمات النانوية	تركيز الجسيمات النانوية	المواد المستخدمة لطرد الماء	أنواع الجسيمات النانوية المستخدمة	اسم المؤلف وعام النشر
E.coli 90.6% s.aureus89.5 %	E.coli 97.8% s.aureus94.8 %	طريقة خضراء 62 nm	300ppm	لا يوجد	Ag-NPs	(Rajput et al., 2023)
نسبة التثبيت الجرثومي بعد الغسيل E.coli 53.5% S.aureus58.6 %	نسبة التثبيت الجرثومي عند تراكيز 300ppm 50 غ/ل للفلوروكربون E.coli 56.9% S.aureus63.2 %	لم يذكر تصنيع للمادة النانوية ولم يذكر قطر الحبيبة	تركيز Ag-NPS 300ppm تركيز الفلوروكربون 30-50 غ/ل	Fluoro-chemical لم يتم تحديد نوع المادة الفلورية	Ag-NPs	(Khodami et al., 2012).
E.coli لا يوجد s.aureus86%	E.coli 86% s.aureus90%	Sol-gel 40-100nm	2%	لا يوجد	Zno-NPs	(Tania et al., 2022)
بعد 10 دورات غسيل WCA(135.3°-136°-138°) على التوالي وفق تركيز Zno	لم يتناول البحث خصائص مضادة للجراثيم WCA (139.5°-143.1°-145.1°) على التوالي وفق تركيز Zno	لم يذكر تصنيع للمادة النانوية 150nm	تركيز Zn-NPs (1-2-3%) تركيز C ₆ F ₆ 40 غ/ل	C ₆ F ₆	Zno-NPs	(Y. Wang et al., 2022)

2. الفصل الثاني: الدراسة النظرية

1.2 تمهيد:

يهدف الفصل الحالي إلى استعراض المفاهيم العلمية الأساسية المتعلقة بخصائص الأقمشة ذاتية التنظيف والمضادة للجراثيم، بالإضافة إلى دراسة المواد النانوية المستخدمة في تحسين هذه الخصائص وآليات عملها. كما يتناول الإطار النظري الدراسات السابقة التي تناولت استخدام الفضة النانوية، وأكسيد الزنك النانوي، وبوليمرات الفلوروكربون في معالجة الأقمشة، مع التركيز على الفجوات البحثية التي تسعى هذه الدراسة إلى معالجتها.

تستخدم الأقمشة الوظيفية في مجالات متنوعة تشمل الملابس الواقية، الملابس العسكرية، الطب والرعاية الصحية، الملابس الرياضية، وصناعة السيارات. لذلك، تعتبر الأقمشة الذكية هي أقمشة الجيل القادم.

تعد الخصائص الوظيفية للأقمشة القطنية، مثل مقاومة الماء والزيت، والقدرة على التنظيف الذاتي، والخواص المضادة للجراثيم، من العوامل الحيوية التي تسهم في تحسين جودة وفعالية المنتجات النسيجية، خاصة في التطبيقات الطبية والصناعية والبيئية. مع التقدم التكنولوجي وتغير المتطلبات، أصبح الطلب على المواد الذكية والمنسوجات الوظيفية والذكية يتزايد على مستوى العالم. بالإضافة إلى وظيفتها الأساسية، تحتوي الأقمشة الوظيفية على خصائص مدمجة تلبي متطلبات الاستخدام النهائي، ويمكن التحكم فيها وضبطها وفقاً للاستخدام المقصود (Ummah, 2019a).

تعود التطورات في مجال الأقمشة الوظيفية إلى التقدم في المواد والتقنيات المتعلقة بالألياف، والأقمشة، والمواد الكيميائية والإضافات مثل البوليمرات، والمواد النانوية الوظيفية، ومواد التشطيب، والمواد اللاصقة، بالإضافة إلى عمليات التصنيع. ومن بين هذه المواد النانوية، برز استخدام الفضة النانوية وأكسيد الزنك النانوي، إلى جانب البوليمرات المتخصصة مثل بوليمر الفلوروكربون سداسي الفلور (C_6F_6)، كوسائل فعالة لتعزيز خصائص مقاومة الماء والزيت، والتنظيف الذاتي، والمضادة للجراثيم.

تعدّ الأقمشة القطنية ذات أهمية كبيرة في العديد من الصناعات النسيجية نظراً لخصائصها الطبيعية المميزة، ولا سيما الراحة، والقدرة العالية على امتصاص الرطوبة، وقابليتها الجيدة للتهوية. ومع ذلك، فإن توسيع استخدام القطن في التطبيقات غير التقليدية أو ذات الأداء العالي ما يزال محدوداً؛ حيث تظهر الألياف القطنية قابلية ملحوظة للتجعد والانتساخ، كما أنها مادة محبة للماء لا تمتلك بطبيعتها خصائص مضادة للميكروبات، ولا توفر مقاومة كافية لامتصاص السوائل والزيوت، إضافة إلى قابليتها العالية للاشتعال. لذلك، فإن هذه الخصائص في صورتها التقليدية تجعل الأقمشة القطنية أقل ملاءمة للعديد من التطبيقات الطبية والصناعية والبيئية المتقدمة، الأمر الذي يفرض الحاجة إلى تطوير معالجات سطحية ومعالجة نهائية وظيفية مبتكرة لتحسين أدائها ومواءمتها لمتطلبات الأقمشة التقنية الحديثة (Manbachi et al., 2016) ..

من خلال هذا الإطار، سيتم بناء قاعدة معرفية تمهد الطريق لتطوير أقمشة متعددة الوظائف تجمع بين الفعالية والراحة.

2.2 الأقمشة الوظيفية:

تعرف الأقمشة الوظيفية بأنها الأقمشة التي تضاف إليها خصائص خاصة تتجاوز الوظائف التقليدية للأقمشة العادية، بهدف تلبية متطلبات استخدام محددة في مجالات متنوعة مثل الملابس الطبية، الرياضية، الواقية، والمنسوجات المنزلية (Kiekens et al., 2014).

مع التطور المتسارع في تكنولوجيا النانو، أصبح من الممكن تطوير منسوجات متعددة الوظائف وذكية وعالية الأداء، حيث تتيح إضافة المواد النانوية مثل الفضة النانوية وأكسيد الزنك النانوي وبوليمرات الفلوروكربون تحسين الخصائص الميكانيكية والوظيفية للأقمشة، بما في ذلك مقاومة الجراثيم، وذاتية التنظيف للأقمشة المعالجة.

من أهم هذه الخصائص الخاصة المضادة للميكروبات (Antimicrobial) التي تمنع نمو الجراثيم والفطريات على سطح الأقمشة، ومقاومة الأشعة فوق البنفسجية (UV-resistant) التي توفر حماية فعالة من تأثيرات الأشعة الضارة، ومقاومة الاشتعال (Fire-retardant) التي تقلل من قابلية الأقمشة للاحتراق وتزيد من مستوى الأمان. كما تشمل هذه الخصائص أيضاً القدرة على طرد الزيت والماء (Oil/water-repellent)، مما يمنح القماش مقاومة عالية للسوائل ويقلل من احتمالية تلطخه، ومقاومة البقع (Stain-repellent) التي تحافظ على نظافة ومظهر القماش لفترة أطول. بالإضافة إلى ذلك، تساهم مقاومة التجعد (Wrinkle-resistant) في الحفاظ على مظهر الأقمشة وسهولة العناية بها، بينما تعمل الخاصية المضادة للروائح (Anti-odor) على التخلص من الروائح غير المرغوب فيها الناتجة عن التعرق أو الاستخدام الطويل. كما تعتبر مقاومة الكهرباء الساكنة (Antistatic) مهمة في تقليل تراكم الشحنات الكهربائية على سطح الأقمشة، أما الخاصية فائقة الامتصاص (Superabsorbent) فتتمكن القماش من امتصاص كميات كبيرة من السوائل بسرعة وفعالية، مما يعزز من استخدامه في التطبيقات الطبية والرياضية. إن إكساب هذه الخصائص للأقمشة يفتح آفاقاً واسعة لتطوير منسوجات وظيفية ومتعددة الاستخدامات تلبي متطلبات الحياة العصرية والتطبيقات الصناعية والطبية المتقدمة التي تتطلب أداءً عالياً وميزات إضافية غير موجودة في الأقمشة التقليدية. كما أن الاهتمام المتزايد بالأقمشة الوظيفية يعكس الطلب المتنامي على منتجات نسيجية تجمع بين الراحة، الحماية، والاستدامة في مختلف القطاعات الصناعية والطبية (Bapan Adak, 2014)(Kiekens et al., 2014). 2023).

وتكمن أهمية هذا الموضوع في أن تطبيقات النانو في صناعة النسيج لا تقتصر فقط على تحسين الأداء، بل تمتد لتشمل حماية الصحة العامة من خلال تقليل انتقال العدوى والجراثيم عبر الأقمشة، بالإضافة إلى تعزيز الاستدامة البيئية من خلال إنتاج أقمشة تدوم لفترات أطول (Hassan et al., 2023). كما أن تطوير

أقمشة قطنية ذات خصائص وظيفية متقدمة يفتح المجال لاستخدامها في الملابس الطبية، والملابس الواقية، والمفروشات الذكية، مما يواكب متطلبات السوق المتزايدة نحو منتجات عالية الجودة ومتعددة الاستخدامات.

3.2 تقنية النانو وتطبيقاتها في الأقمشة الوظيفية:

1.3.2 تعريف تقنية النانو:

مصطلح "نانو" مشتق من الكلمة اليونانية التي تعني "القرمز"، ويشير إلى مقياس صغير جداً من المادة، النطاق الحجمي الذي يحظى بأكبر قدر من الاهتمام عادة يتراوح بين 100 نانومتر وصولاً إلى المستوى الذري (حوالي 0.2 نانومتر)، حيث تظهر المواد في هذا النطاق خصائص جديدة أو محسنة مقارنة بنفس المواد في الأحجام الأكبر. هناك سببان رئيسيان لهذا التغير في السلوك: أولهما زيادة مساحة السطح النسبية، مما يؤدي إلى زيادة النشاط الكيميائي، وثانيهما سيطرة التأثيرات الكمومية، التي تغير من الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة (The Royal Society et al., 2004).

عرفت تقنية النانو في مقال الجمعية الملكية والأكاديمية الملكية للهندسة البريطانيتين (Dowling et al., 2008) (Kathirvelu et al., 2004) بأنها تصميم، توصيف، إنتاج وتطبيق الهياكل، الأجهزة والأنظمة من خلال التحكم في الشكل والبعد على مقياس النانومتر، قدمت فكرة تقنية النانو لأول مرة من قبل ريتشارد فاينمان في عام 1959، من خلال محاضراته بعنوان "هناك متسع كبير في الأسفل" التي ألقاها في مؤتمر الجمعية الفيزيائية الأمريكية، في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (Eberhard & Wcislo, 2012) حيث وصف فاينمان عملية يتمكن فيها العلماء من التأثير والتحكم على الذرات الفردية والجزيئات. لم يستخدم مصطلح "تقنية النانو" حتى عام 1974، عندما أطلقه نوريو تانيغوتشي، الباحث في جامعة طوكيو باليابان، ليشير إلى القدرة على هندسة المواد بدقة على مستوى النانومتر.

2.3.2 تطبيقات تقنية النانو في الأقمشة الوظيفية:

جذبت الخصائص الفريدة والجديدة لتقنية النانو اهتمام العلماء والباحثين في مجال الصناعات النسيجية حيث شهدت صناعة النسيج تحولاً نوعياً مع ظهور تقنية النانو، التي أصبحت من أهم المجالات الحديثة التي تفتح آفاقاً واسعة لتطوير أقمشة ذات وظائف متقدمة تلبي الاحتياجات المتزايدة للمستهلكين، حيث أدى تطبيق تقنية النانو في صناعة النسيج إلى زيادة كبيرة في متانة الأقمشة، وتحسين مستوى الراحة والخصائص الصحية، بالإضافة إلى تقليل تكلفة الإنتاج. وتتميز تقنية النانو بقدرتها الفريدة على تعديل خصائص المواد على المستوى الذري والجزيئي، مما يسمح بإضافة وظائف جديدة للأقمشة لم تكن ممكنة من قبل باستخدام الطرق التقليدية (Kathirvelu et al., 2008).

ولم يقتصر هذا التطور السريع في استخدام تقنية النانو في النسيج على تحسين المتانة والراحة، بل شمل أيضاً تعزيز الخصائص الصحية، وخفض تكاليف الإنتاج، وتحقيق معايير أعلى في الاستدامة البيئية وذلك من خلال دمج الجزيئات النانوية مع الألياف أو تطبيقها على سطح الأقمشة، أصبح بالإمكان إنتاج أقمشة وظيفية تلبي متطلبات مجالات متنوعة مثل الملابس الواقية، والملابس الطبية، والملابس الرياضية، وغيرها من الاستخدامات المتخصصة.

3.3.2 تصنيف المعالجة النهائية النانوية للمنسوجات:

يمكن تصنيف المعالجة النهائية النانوية للمنسوجات بناء على عدة معايير، تشمل:

1. نوع المادة النانوية المستخدمة:

تصنف المواد النانوية إلى جسيمات عضوية وجسيمات غير عضوية، حيث يمكن استخدامها منفردة أو مجتمعة مع بعضها البعض كمواد نانوية مركبة لتوفير خصائص متعددة الوظائف. تصنف الجسيمات النانوية غير العضوية أيضاً إلى معادن مثل الفضة، والذهب، والنحاس، والنيكل، وأكاسيد المعادن مثل ثاني أكسيد

التيتانيوم، وأكسيد الزنك، وأكسيد الحديد، وأكسيد النحاس. ومؤخراً، بدأ الاهتمام أيضاً بأشباه الفلزات (Alshammari et al., 2023).

2. طرق تطبيق المادة النانوية:

تطبق المادة النانوية على القماش بطريقة مختلفة منها التغطية السطحية حيث يتم تغطية وجه القماش بالمادة النانوية، والغمر حيث يغمر القماش في محلول يحتوي على المادة النانوية ويجفف، الرش حيث يرش سطح القماش بالمادة النانوية، التضمين وفيها تدمج المادة النانوية داخل ألياف النسيج أثناء عملية التصنيع (Ummah, 2019b).

3. الخصائص الوظيفية المكتسبة:

من الخصائص الوظيفية المكتسبة للمعالجة النهائية بتقنية النانو:

المعالجة النهائية النانوية المضاد للميكروبات.

المعالجة النهائية النانوية ذاتية التنظيف.

المعالجة النهائية النانوية المقاومة للماء.

المعالجة النهائية النانوية المقاومة للأشعة فوق البنفسجية.

المعالجة النهائية النانوية المقاومة للتجعد.

المعالجة النهائية النانوية المحسنة للموصلية الكهربائية.

4. آلية المعالجة النهائية النانوية للأقمشة:

تعتمد آلية المعالجة النهائية النانوية للأقمشة القطنية على إدخال جزيئات نانوية إلى بنية القماش بطرق فيزيائية أو كيميائية، ما يؤدي إلى تغيير في الخواص السطحية والوظيفية للأقمشة دون التأثير السلبي على ملمسها أو مرونتها. تتيح هذه التقنية إنتاج أقمشة قطنية عالية الأداء ومتعددة الوظائف تناسب التطبيقات الطبية، والملابس الذكية، وألبسة الحماية (Montazer & Harifi, 2018).

5. ثباتية واستقرار المعالجة النهائية النانوية:

المعالجة النهائية النانوية توفر ثباتاً واستقراراً عالياً للخصائص المكتسبة على الأقمشة، حتى بعد الاستخدام والغسيل المتكرر. هذا يستوجب اختيار أبعاد الجسيمات المناسب، توزيعها بشكل جيد، واستخدام مواد رابطة فعالة (Jain et al., 2022) (Ojstršek & Fakin, 2019).

قدمت التطورات الأخيرة في تقانة النانو رؤى جديدة حول العوامل المضادة للميكروبات، وأدت إلى تطوير مواد نانوية وظيفية تتمتع بخصائص فيزيائية وكيميائية فريدة حيث تم دمج الجسيمات النانوية المضادة للميكروبات بشكل فعال في الأقمشة.

4.2 الأقمشة المضادة للجراثيم:

اكتسبت الأقمشة المضادة للجراثيم أهمية كبيرة في صناعة النسيج، خاصةً مع تزايد الوعي الصحي العام والحاجة المتزايدة إلى منتجات نسيجية تحمي المستخدمين من العدوى الميكروبية. يمكن أن تنمو الكائنات الدقيقة مثل الجراثيم والفطريات على الأقمشة خصوصاً تلك المصنوعة من ألياف طبيعية ومحورة، مثل القطن والحرير حيث يمكن أن يؤدي التوافق المثالي مع الرطوبة والخصائص الطبيعية لهذه الأقمشة إلى توفر بيئة مناسبة لنمو الكائنات الدقيقة مما يجعلها عرضة للتلوث خاصة في الملابس الطبية، وملابس الأطفال، والملابس الرياضية، والملابس الداخلية (Y. Gao & Cranston, 2008).

1.4.2 المواد النانوية المستخدمة في الأقمشة المضادة للجراثيم:

تؤدي العدوى التي تسببها بجراثيم ممرضة مثل الإشريكية القولونية (*E. coli*) والمكورات العنقودية الذهبية (*S. aureus*) إلى تدهور خصائص الأقمشة، مثل تناقص القوة، وظهور الروائح الكريهة، وتشويه المظهر، مما يعرض مرتديها لمخاطر صحية (Derek Heywood, 2003).

استجابةً لهذه التحديات ومع تزايد الوعي الصحي، اتجهت الأبحاث مؤخرًا إلى تطوير أقمشة متعددة الوظائف بتقنيات متقدمة، وكان لتقانة النانو دور محوري في هذا المجال؛ حيث تستخدم جزيئات نانوية معدنية مثل الفضة (*Ag*)، وأكسيد الزنك (*ZnO*)، والنحاس (*Cu*)، وأكسيد التيتانيوم (*TiO2*) لإكساب الأقمشة خصائص مضادة للجراثيم تعمل هذه الجزيئات على تثبيط نمو الجراثيم من خلال عدة آليات، منها إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلي التي تهاجم جدران الخلايا الجرثومية، والتفاعل مع البروتينات والإنزيمات داخلها، مما يؤدي إلى تثبيط نموها وتكاثرها (Montazer & Harifi, 2018) (Gokarneshan N., 2015).

تعد جزيئات الفضة النانوية من أكثر المواد النانوية فاعلية في القضاء على الجراثيم، حيث تشير التقارير أن الفضة تظهر قدرة كبيرة على تثبيط ما يقارب 650 نوع من الجراثيم المختلفة، وتستخدم الأقمشة المعالجة بجزيئات الفضة النانوية في تصنيع الجوارب والأقمشة الطبية والرياضية والعسكرية. وفي المنتجات الصحية مثل ضمادات الحروق والجروح الناتجة عن الحروق ومواقع التبرع بالجلد (Tan, 2009) (Ren et al., 2009) (Sin, Bee, Ratnam, et al., 2019).

تسهم جزيئات أكسيد الزنك النانوية في تعزيز الوظائف المتعددة للأقمشة، بما في ذلك زيادة مقاومتها للأشعة فوق البنفسجية، وامتلاكها لخاصية التنظيف الذاتي، بالإضافة إلى توفير أداء مضاد للجراثيم مستقر وطويل الأمد. وتعتبر جزيئات أكسيد الزنك النانوية من العوامل المضادة للميكروبات الفعالة، حيث أظهرت نشاطاً قوياً ضد مجموعة واسعة من العوامل الممرضة مثل الجراثيم والفطريات والفيروسات. يرجع ذلك إلى آليات

متعددة تشمل توليد أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، وتعطيل أغشية الكائنات الدقيقة، بالإضافة إلى التداخل مع مكونات الخلايا الداخلية. كما يتيح الحجم النانوي الصغير ونسبة المساحة السطحية العالية إلى الحجم لجسيمات ZnO-NPs التفاعل بكفاءة مع الخلايا الميكروبية، مما يعزز تأثيرها القاتل للجراثيم حتى عند التراكيز المنخفضة (Ashour & Abd-Elhalim, 2022) (Babayevska et al., 2022).

كما يتمتع أكسيد الزنك بتأثيرات الأكسدة الضوئية والتحفيز الضوئي (الفوتوكاتاليز) على المركبات الكيميائية والبيولوجية (Sirelkhatim et al., 2015).

بالإضافة إلى الخصائص المضادة للميكروبات، تلعب خاصية الطرد للماء (الهيدروفوبية) دوراً مهماً في منع امتصاص السوائل والحد من تجمع الميكروبات على أسطح الأقمشة.

يعتبر أكسيد التيتانيوم (TiO_2) من أبرز المواد النانوية المستخدمة في تحسين الخواص الوظيفية للأقمشة، وذلك بفضل خصائصه الفيزيائية والكيميائية الفريدة التي تجعله مادة مثالية لإكساب الأقمشة ميزات مضادة للجراثيم، وحماية فعالة من الأشعة فوق البنفسجية، بالإضافة إلى خاصية التنظيف الذاتي الكيميائي. تعتمد فعالية TiO_2 بشكل رئيسي على ظاهرة التحفيز الضوئي (Photocatalysis)، حيث عند تعرضه لإشعاع ضوئي يحمل طاقة مساوية أو أعلى من فجوة الطاقة الخاصة به، تنتقل الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، ما يؤدي إلى تكوين أزواج الإلكترونات السالبة (e^-) والثغوب الكهربائية الموجبة (h^+) على سطح المحفز. تتفاعل الإلكترونات الحرة مع جزيئات الأكسجين الموجودة على السطح لتكوين أيونات أكسيد (O_2^-)، بينما تتفاعل الثغوب الكهربائية مع جزيئات الماء لتولد جذور الهيدروكسيل ($\text{OH}^\cdot$) ذات الفعالية الكيميائية العالية. تعد هذه الأنواع من الجذور الحرة (Reactive Oxygen Species – ROS) مواداً كيميائية غير مستقرة، حيث تتفاعل مع المركبات العضوية الملوثة على سطح المحفز، مؤدية إلى تحللها إلى

ثاني أكسيد الكربون (CO_2) والماء (H_2O) عبر سلسلة تفاعلات تعرف باسم "تفاعل الأكسدة-الإرجاع" (Elmaaty, 2018) (Tan, Sin, Bee, Ratnam, et al., 2019).

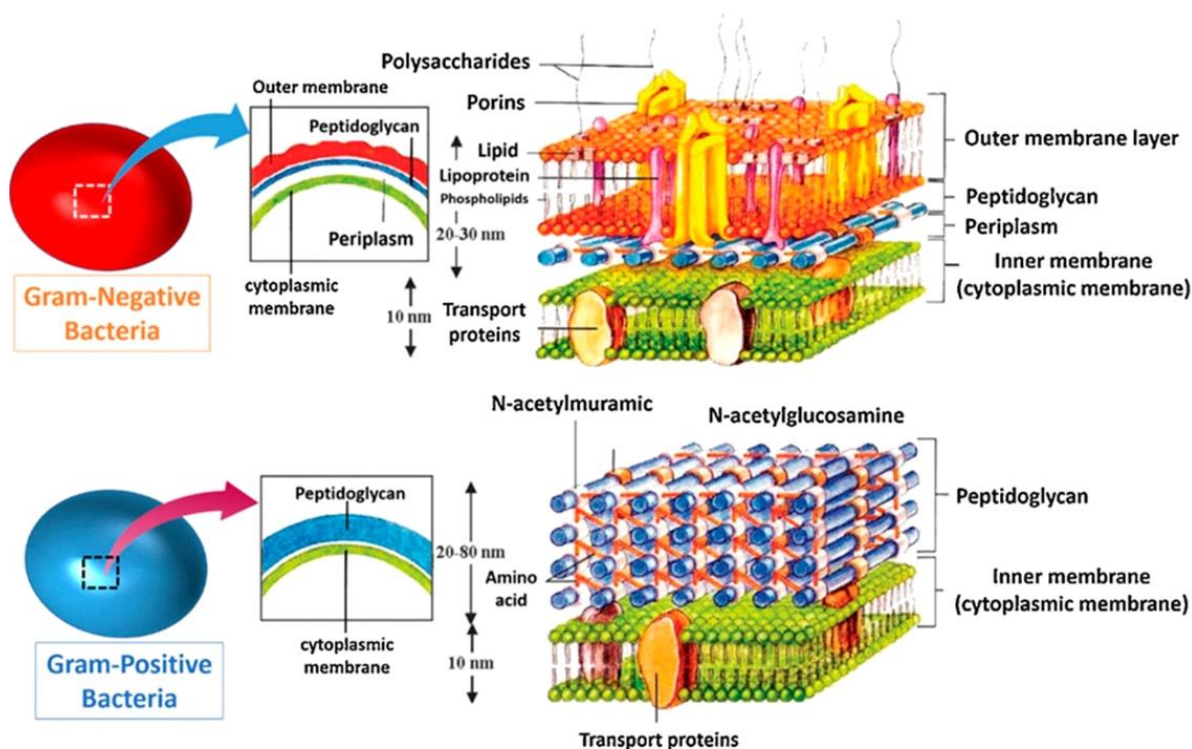
بالإضافة إلى ذلك، فإن إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية تحت تأثير الأشعة فوق البنفسجية يسهم بفاعلية في تدمير الكائنات الدقيقة المتنوعة، بما في ذلك الجراثيم والفطريات والفيروسات، مما يعزز من الخصائص المضادة للميكروبات للأقمشة المعالجة بـ TiO_2 (Jongprateep et al., 2021).

2.4.2 الجراثيم الشائعة في الأقمشة:

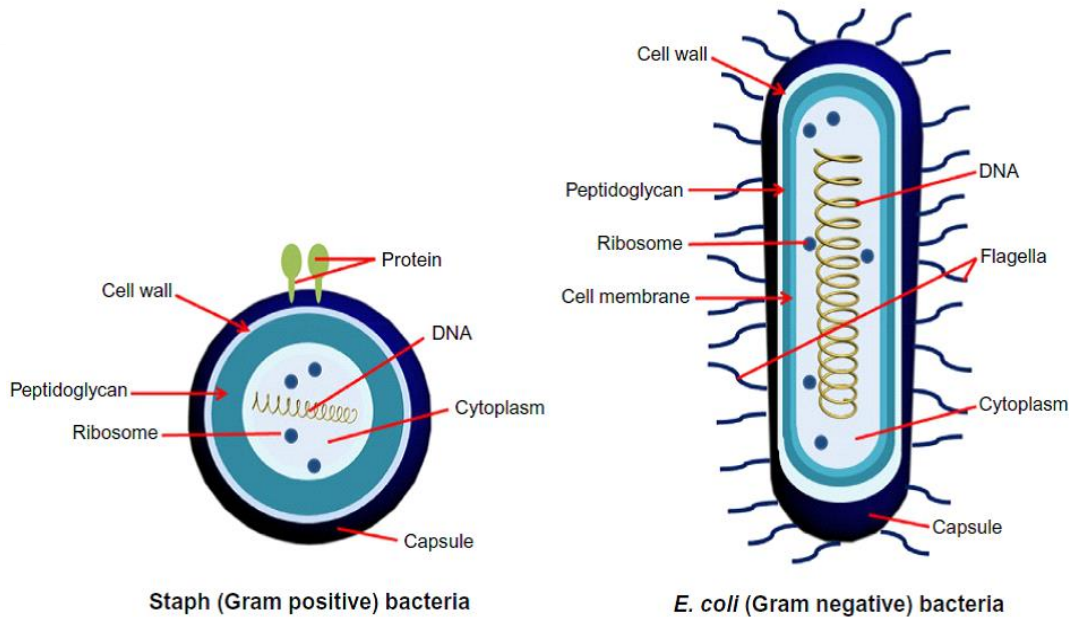
تؤثر الجراثيم والفطريات بشكل كبير على خواص الأقمشة، وخاصة الأقمشة المصنوعة من الألياف الطبيعية مثل القطن، مما يشكل خطراً صحياً على المستخدمين. تتميز الجراثيم بوجود جدار خلوي صلب وصلب يحدد شكلها ويدعم بنيتها، و داخل هذا الجدار الغشاء البلازمي الذي يشكل حاجزاً بين محتويات الخلية والبيئة الخارجية. تحتوي الخلية على السيتوبلازم الذي يضم الريبوسومات (لتركيب البروتينات)، والنيوكليود (المادة الوراثية المركزة)، والبلازميدات (جزيئات دائرية صغيرة من الحمض النووي) (Montazer & Harifi, 2018).

قام العالم هانس كريستيان غرام بتقسيم الجراثيم إلى جراثيم إيجابية الغرام وسالبة الغرام، اعتماداً على اختلاف تركيب جدارها الخلوي. الجراثيم إيجابية الغرام تحتفظ بصبغة الكريستال البنفسجية بسبب وجود طبقة سميكة ومتعددة من الببتيدوجليكان في جدارها. أما الجراثيم سالبة الغرام فلا تحتفظ بهذه الصبغة بسبب وجود جدار رقيقة من الببتيدوجليكان يقع بين غشاءين خلويين دقيقين، حيث يسمح المذيب العضوي بغسل الصبغة، فتظهر هذه الخلايا باللون الأحمر أو الوردي بفضل صبغة التلوين الثانية التي تستخدم (Montazer & Harifi, 2018) (Gillen, 2022).

تقنية تلوين غرام ليست فقط أداة تصنيفية بل تستعمل لتوجيه العلاج الدوائي، حيث تختلف حساسية أنواع الجراثيم للمضادات الحيوية بناءً على كونها إيجابية أو سالبة الغرام. ويوضح الشكل (1-2) مقارنة الجدار بين الجدار الخلوي للخلية موجبة الغرام والجدار الخلوي للخلية سالبة الغرام (Ogunsona et al., 2020).



شكل (1-2): مقارنة بين الجدار الخلوي للخلية الجرثومية موجبة الغرام والجدار الخلوي للخلية الجرثومية سالبة الغرام (Yilmaz et al., 2023)



شكل (2-2): تمثيل تخطيطي لبنية الخلية لكل من المكورات العنقودية الذهبية (*S. aureus*) والإشريكية القولونية (*E. coli*) (Montazer & Harifi, 2018).

من أشهر جراثيم الأقمشة إيجابية الغرام المكورات العنقودية الذهبية (*Staphylococcus aureus*) الشكل (2-2) وهي جراثيم كروية الشكل يتراوح قطرها بين 0.5 و 1.5 ميكرومتر، وترتبط في عناقيد تشبه عناقيد العنب. تتميز بوجود جدار خلوي سميك من الببتيدوغليكان، وتفرز إنزيمي الكاتالاز والكوايولاز، ما يساعدها على مقاومة الإجهاد التأكسدي وتجلط بلازما الدم، مما يميزها عن أنواع أخرى من المكورات العنقودية. هذه الجراثيم غير متحركة وتنتقل إلى الأسواط، وتنمو في درجات حرارة تتراوح بين 7 و 46 درجة مئوية مع أفضل نمو عند 37 درجة مئوية. تعيش بشكل طبيعي على جلد الإنسان والأغشية المخاطية، لا سيما في التجويف الأنفي، مما يجعل الإنسان حاملاً طبيعياً لها. تمتلك المكورات العنقودية الذهبية مجموعة من العوامل الضارة مثل السموم والبروتينات اللاصقة التي تساهم في التصاقها بالأنسجة المضيفة والأجهزة الطبية، وتمتلك القدرة على تكوين الأغشية الحيوية (البيو فيلم)، مما يزيد مقاومتها للعلاج ويسهل استمرار العدوى

المزمنة. تسبب هذه الجراثيم أمراضاً متنوعة تشمل التهابات الجلد والأنسجة الرخوة، التهابات الدم، التهابات العظام والمفاصل، التسمم الغذائي، ومتلازمة الصدمة السمية (Tong et al., 2015) (Lowy, 1998).

من بين الجراثيم سالبة الغرام، تعتبر الإشريكية القولونية (*Escherichia coli*) موضحة بالشكل (2-2) نموذجاً شائعاً ومطرقاً بشكل واسع في مجال جراثيم الأقمشة نظراً لقدرتها على مقاومة بعض الظروف البيئية. هذه الجراثيم عصوية الشكل، يصل طولها إلى ما بين 1 و 3 ميكرومتر وعرضها بين 0.4 و 0.7 ميكرومتر، وتتميز بجدار خلوي رقيق يحتوي على طبقة أو طبقتين من الببتيدوغليكان. تعيش هذه الجراثيم بشكل طبيعي في أمعاء البشر، حيث تشكل جزءاً من الفلورا المعوية التي تساهم في الحفاظ على صحة الجهاز الهضمي. تنتقل بعض سلالاتها الممرضة عن طريق الطعام أو الماء الملوث، مسببةً أمراضاً معوية مثل الإسهال، بينما تسبب سلالات أخرى التهابات خارج الأمعاء كالتهابات المسالك البولية والرئة.

تتحرك الإشريكية القولونية بواسطة أسواط مرتبة بشكل محيطي، وتنمو بسرعة فائقة تحت الظروف الملائمة، حيث يمكنها التكاثر خلال 20 دقيقة في الظروف الملائمة، النمو الأمثل لها يكون عند درجة حرارة 37 درجة مئوية تتميز أيضاً بقدرتها على النمو في بيئات هوائية ولا هوائية، مما يمنحها مرونة عالية للعيش في أماكن مختلفة (Basavaraju & Gunashree, 2023).

3.4.2 استخدام الفضة النانوية في الأقمشة المضادة للجراثيم:

تعد تطبيقات الفضة النانوية في المجال الطبي من أكثر مجالات البحث جذبا للاهتمام، نظراً لخصائصها الفريدة المرتبطة بصغر أبعادها على المقياس النانوي وما يرافقه من زيادة كبيرة في المساحة السطحية، إضافة إلى نشاطها المضاد لطيف واسع من الميكروبات.

تعود الفعالية المضادة للجراثيم للفضة النانوية بشكل رئيسي إلى قدرتها على إطلاق أيونات الفضة (Ag^+) التي تتمتع بخواص تعطل فعالة للخلايا الجرثومية حتى في حالة وجود حواجز جزئية مثل الأغشية الخلوية. قد تتفاعل هذه الأيونات بشكل مباشر مع مكونات الخلية الجرثومية مثل البروتينات والأغشية، مسببةً أضراراً

كبيرة تؤدي إلى تثبيط نمو الجراثيم وموتها (Zhao & Mei, 2020). تتميز أيونات الفضة بالالتصاق الانتقائي بجدار الخلية والغشاء السيتوبلازمي، بفضل الجذب الكهروستاتيكي والتفضيل للارتباط ببروتينات الخلية، مما يؤدي إلى زيادة نفاذية الغشاء وتعطيل الغلاف الجرثومي. إضافة إلى ذلك، يسهم إطلاق أيونات الفضة النانوية في توليد أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) التي تسبب الإجهاد التأكسدي داخل الخلايا، مما يثبط تخليق البروتينات والحمض النووي (DNA) ويسهم في وقف نمو الكائنات الدقيقة (Adeyemi et al., 2020) كما يمكن للفضة النانوية نفسها أن تخترق خلايا الجراثيم مسببة تدميراً مباشراً للمكونات الداخلية مثل الحمض النووي (Hochvaldová et al., 2024). تستجيب الجراثيم المختلفة لهذه الجسيمات بشكل متباين، إذ تبدي الجراثيم سالبة الغرام مثل *Escherichia coli* مقاومة أكبر بسبب وجود غشاء خارجي غني بالليبوسكاريدات (LPS) يعزز من مقاومتها لتعزيز ثبات الفضة النانوية والحفاظ على نشاطها المضاد، يمكن تثبيتها على مركبات نانوية متقدمة كالمركبات المكونة من الجرافين الفلوري، مما يمنع تجمع الجسيمات ويحافظ على فعاليتها حتى بعد دورات غسيل متكررة وظروف بيئية صعبة (Hochvaldová et al., 2024). بالتالي فإن آلية عمل الفضة النانوية كمضاد للجراثيم تشمل عدة خطوات رئيسية كما هو موضح بالشكل (3-2):

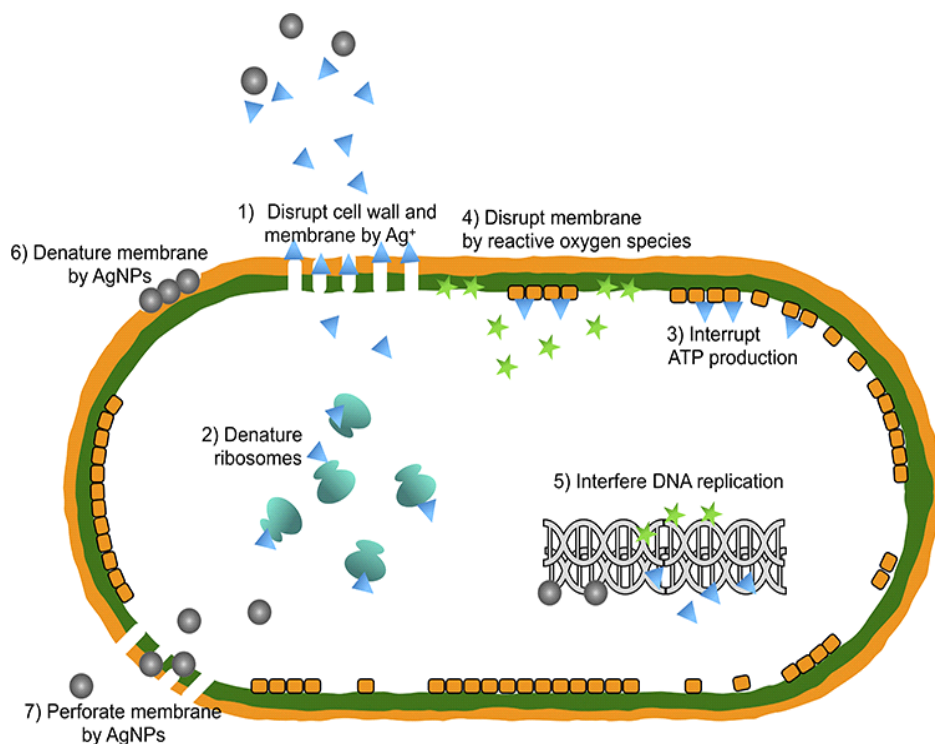
- تعطيل جدار الخلية والغشاء السيتوبلازمي: أيونات الفضة (Ag^+) التي تطلقها جسيمات الفضة النانوية تلتصق بجدار الخلية وتمر عبره، مسببة تلفاً في الغشاء وزيادة نفاذيته.
- تعطيل الريبوسومات: حيث تؤدي أيونات الفضة إلى تنكس وتعطيل لتخليق البروتين.
- إيقاف إنتاج أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP): يحدث ذلك بسبب تعطيل إنزيمات التنفس المرتبطة بالغشاء السيتوبلازمي.

➤ تلف الغشاء نتيجة لأنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) : التي تنتج من اضطراب سلسلة نقل الإلكترونات.

➤ تعطيل نسخ الحمض النووي (DNA) : حيث ترتبط أيونات الفضة وأنواع الأكسجين التفاعلية بالحمض النووي وتمنع تضاعفه وتكاثر الخلايا.

➤ إحداث تنكس Denaturation في غشاء الخلية : حيث تتجمع جسيمات الفضة في فجوات جدار الخلية مسببة تخريب الغشاء.

➤ اختراق الغشاء السيتوبلازمي : حيث تعبر الفضة النانوية الغشاء مباشرة، مما يؤدي إلى تسرب العضيات من الخلية وموتها.



شكل (2-3): آلية عمل الفضة النانوية كمضاد للجراثيم (Zhao & Mei, 2020)

إن آليات النشاط المضاد للميكروبات لأيونات الفضة (Ag^+) وجسيمات الفضة النانوية (Ag NPs) متشابهة

إلى حد كبير، حيث أن (Ag^+) و (Ag NPs) يمكنهما المشاركة في تفاعلات بين الجزيئات مع غشاء الخلية

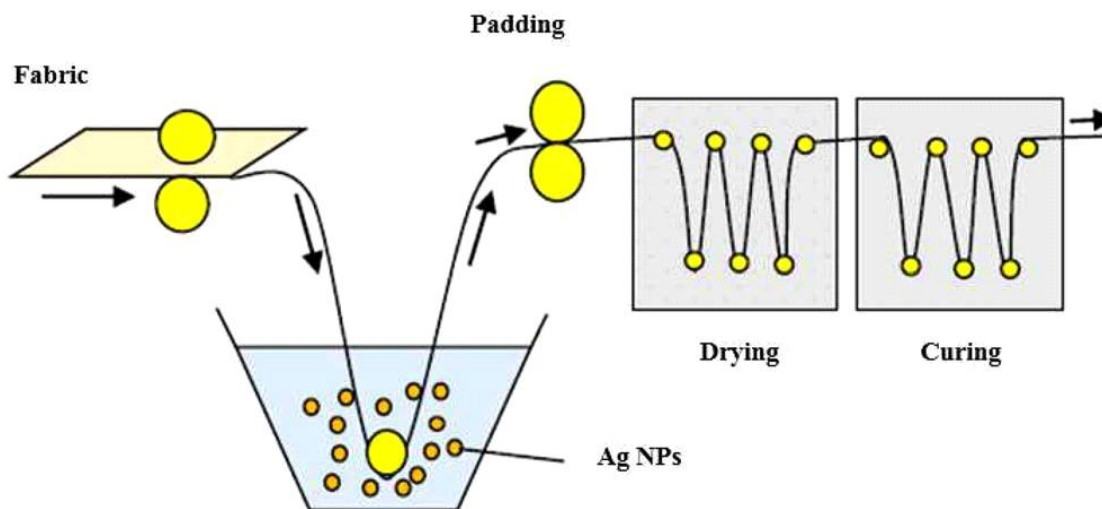
الجرثومية. إضافةً إلى ذلك، إن جسيمات الفضة التي يقل بعدها عن 10 نانومتر قادرة على اختراق خلايا الكائنات الدقيقة، حيث ترتبط بمجموعات الثيول في الإنزيمات والأحماض النووية مما يؤدي إلى تعطيل العمليات الخلوية الأساسية (Marambio-Jones & Hoek, 2010).

تشير الدراسات الحديثة إلى أن النشاط المضاد للجراثيم للفضة النانوية يتناسب طردياً مع مساحة سطحها فالجسيمات ذات الأبعاد الأصغر مساحة سطحها أكبر نسبياً، وهو ما يعزز من قدرتها على التفاعل مع الخلايا الميكروبية وتحرير أيونات الفضة (Ag^+) التي تلعب دوراً فعالاً في القضاء على الجراثيم. كلما صغرت أبعاد الجسيمات، زاد معدل إطلاق الأيونات وارتفع الإنتاج الموضعي لأنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، مما يسبب إجهاداً تأكسدياً كبيراً على الجراثيم ويفسد هيكلها الخلوية، كما يساعد في اختراق أغشية الخلايا بفعالية أكبر.

كما أن تلامس الأقمشة المباشر مع الجلد، تصبح الأنسجة أيضاً ملوثة بالكائنات الدقيقة حتى بعد فترة قصيرة من ارتداء الجسم لها. الجراثيم ذات الصلة بالقماش هي في الأساس تلك الموجودة على الجلد، بالإضافة إلى تلك الموجودة في الوجه. توفر الظروف الملائمة السائدة على الجلد وفي الأنسجة الضيقة مثل الرطوبة والدفع والمواد الغذائية (العرق، البول) بيئة تمكن الجراثيم من زيادة أعدادها بسرعة كبيرة (Raut et al., 2010).

استخدمت ألياف القطن على نطاق واسع في أقمشة الرعاية الصحية نظراً لخصائصها المميزة في امتصاص الماء والتهوية والراحة، مع ذلك يمكن أن تتكاثر الجراثيم فيه بسهولة ضمن ظروف مناسبة مسببة تغيراً في لون والرائحة وتراجعاً في القوة الميكانيكية، مما يعزز خطر العدوى المرتبطة بالرعاية الصحية. لذلك، يصبح من الضروري استكشاف تقنيات مبتكرة لتعزيز الخصائص المضادة للميكروبات للأقمشة القطنية لجعلها أكثر ملاءمة للتطبيقات الصحية (Hebeish et al., 2011).

هناك العديد من الطرق لإدخال جزيئات الفضة النانوية على ألياف القطن (Bacciarelli-Ulacha et al., 2014) منها الترسيب المباشر (Chen et al., 2023)، والتغطية بالغمر (Ke Thanh & Phuong, 2009)، وطريقة الطبقة تلو الطبقة (Naveas et al., 2023)، وطريقة التخليق بالموقع (Phong, 2009)، (Montazer et al., 2012) (M. Khan et al., 2024)، (Montes-Hernandez et al., 2021) وغيرها. حيث تعد تقنية "التغطية بالغمر-التجفيف-المعالجة الحرارية (Pad-Dry-Cure)" طريقة شائعة لاستخدامها في دمج المواد النانوية في الأقمشة الشكل (2-4) (Tan, Sin, Bee, Ratnam, et al., 2019) تتضمن هذه العملية غمر القماش بمحلول يحتوي على الفضة النانوية، تليها مرحلة تجفيف ثم معالجة حرارية تحت ظروف محددة. تتضمن هذه التقنية توزيعاً موحداً ودائماً للمادة النانوية في القماش، مما يعزز خصائصه المضادة للجراثيم وخصائصه الهيكلية دون التأثير على صفاته الأساسية مثل النعومة والتهوية.



شكل (2-4): خطوات معالجة القماش بجسيمات الفضة النانوية بطريقة) غمر_تجفيف_معالجة حرارية

(Tan, Sin, Bee, Ratnam, et al., 2019)

لاتسبب الأقمشة الطبية المعالجة بالفضة النانوية إلى السمية الخلوية، ولا تسبب تهيج الجلد (Lee & Jeong, 2005)، ولا تسبب حالة (الأرجيريا) تلون الجلد بالفضة (Juenger et al., 2006). بالإضافة إلى ذلك، ليس لها تأثيرات ضارة على التوازن البيئي للميكروفلورا الصحية في جلد الإنسان (Fluhr et al., 2010). كما وجد أن استخدام ضمادات الجروح المحتوية على الفضة النانوية يسرع من التئام الجروح ويمنع الالتهابات بعد العمليات الجراحية.

4.4.2 استخدام أكسيد الزنك النانوي في الأقمشة المضادة للجراثيم :

يثير أكسيد الزنك (ZnO-NPs) اهتماماً كبيراً بسبب خصائصه الفريدة المضادة للجراثيم وقدرته على تثبيط مجموعة واسعة من مسببات الأمراض، بما في ذلك الجراثيم والفيروسات والفطريات. تتيح الأبعاد الصغيرة والمساحة السطحية الكبيرة لـ ZnO التفاعل بفعالية مع أغشية الميكروبات، مما يعطل وظائفها ويؤدي إلى موت الخلايا. علاوة على ذلك، فإن ZnO النانوي غير سام ومتوافق حيوياً، مما يجعله خياراً مثالياً لتطبيقات الأقمشة الطبية. يمكن استخدامها لتحسين خصائص سطح الأقمشة، مثل تحسين الحماية من الأشعة فوق البنفسجية، والنشاط المضاد للجراثيم، والقدرة على التنظيف الذاتي (Belay et al., 2020b).

يصنف أكسيد الزنك النانوي من أكثر المواد الواعدة ويمكن استخدامه في التطبيقات المضادة للفطريات والجراثيم والتطبيقات الطبية الحيوية الأخرى نظراً لثباتها الفيزيائي والكيميائي العالي وخصائصها السطحية الجديدة. تعتبر جسيمات ZnO النانوية الأكثر أماناً كما اعترفت بذلك إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA) (Karthikeyan et al., 2021) USA).

يمكن تحضير جسيمات ZnO النانوية باستخدام عدة تقنيات متنوعة تشمل التحضير فوق الحراري (Kovács et al., 2022)، وتقنية السول-جل (Vignesh et al., 2022)، والتحضير المائي الحراري (Anaya-Zavaleta et al., 2025)، وتقنيات المستحلب الدقيق (Reningtyas et al., 2025).

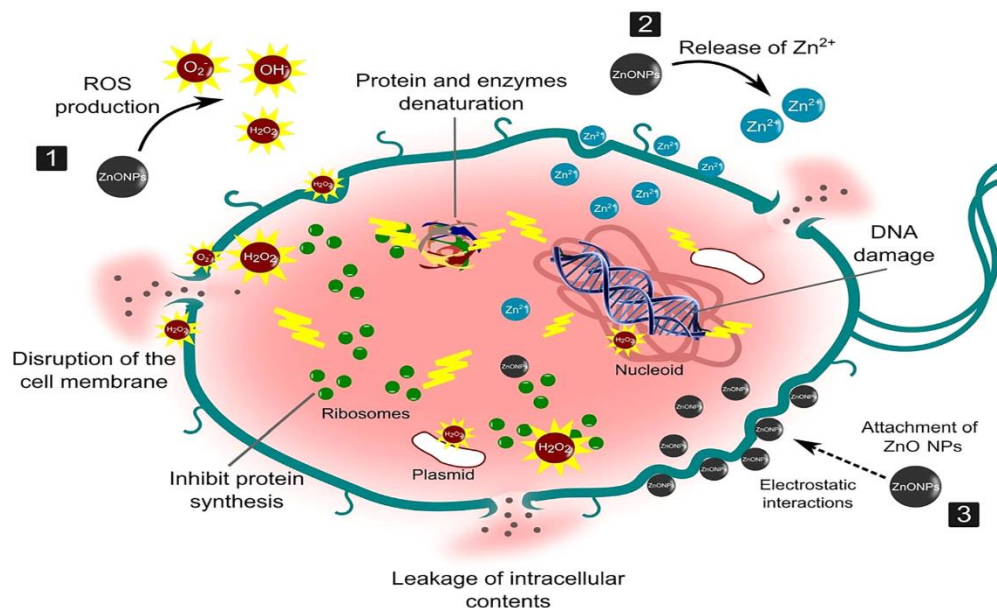
(2021)، بالإضافة إلى الطرق الحيوية باستخدام مستخلصات النباتات، والفطريات، والميكروبات (Abdelbaky et al., 2023)؛ (Salih et al., 2021)؛ (Zeghoud et al., 2022) يطبق أكسيد الزنك النانوي على الأقمشة من خلال طرق متعددة مثل الطباعة والرش والتغطية. تستخدم هذه الطرق لترسيب أكسيد الزنك النانوي على سطح القماش بهدف إكسابه خصائص متعددة مثل الحماية من الأشعة فوق البنفسجية والخواص المضادة للجراثيم (Belay et al., 2020b) تعزز طرق التطبيق هذه من ثبات الجسيمات على القماش وتساهم في تحسين ديمومة الأقمشة وفعاليتها للحماية والاستخدامات الطبية والصناعية.

أكسيد الزنك هو واحد من خمسة مركبات من الزنك مدرجة حالياً كمادة معترف بها عموماً على أنها آمنة من قبل إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (21CFR182.8991) (de Romaña et al., 2002). تسجل تقارير متعددة نشاطاً ملحوظاً مضاداً للجراثيم لأكسيد الزنك، والذي يعزى إلى خصائصه الفريدة.

إن جسيمات ZnO تميل إلى التكتل في الماء بسبب قطبية الماء العالية ما يؤدي إلى ترسيبها. لذلك، يتم دمج ZnO مع عدد من عوامل التغطية (capping agents) أثناء تصنيع المركبات النانوية المستخدمة لتغطية الأقمشة (G. Zhang et al., 2013) مثل مركبات الملتاميد، السلفات الهكساميثيل ترايثيلين تيترا أمين، الكيتوزان (C. Wang et al., 2016)، الأكاسيا، بوليفينيل بيروليدين (PVP) (Selvam & Sundrarajan, 2012)، السيليكا، صمغ التراجكانث (Ghayempour & Montazer, 2017) السليلوز، بوليمرات ثنائية الأليل ثنائي ميثيل الأمونيوم و بولي أكرليك أسيد (Çakır et al., 2012). تستخدم هذه المواد لتعزيز ثبات المادة النانوية على الأقمشة وزيادة مقاومتها للغسيل والاحتكاك، مما يحسن من خصائص القماش المضادة للجراثيم والحماية من الأشعة فوق البنفسجية ويجعلها مناسبة للاستخدامات الطبية والصناعية.

هناك عدة آليات مقترحة لعمل جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) كمضادات للجراثيم (Sirelkhatim et al., 2015) (Ishwarya et al., 2024) وهي تشمل كما هو موضح بالشكل (5-2):

- الاتصال الفيزيائي المباشر مع جدران الخلايا وتدمير سلامة غشاء الخلية.
- تفكك جسيمات ZnO وإطلاق أيونات Zn^{2+} التي تعيق النقل الخلوي النشط وتؤثر على أيض الأحماض الأمينية وتعطل أنظمة الإنزيمات.
- إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) مثل الأنيون الفائق التأكسد (O_2^-)، بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، وأيون الهيدروكسيد (OH^-) التي تتسبب في تدمير مكونات الخلية مثل الدهون، الحمض النووي، والبروتينات، مما يؤدي إلى موت الخلية.
- في حالة عدم وجود الضوء، تعتمد السمية بشكل أكبر على التصاق ZnO بالجدار الخلوي وزيادة إطلاق أيونات Zn^{2+} داخل السيتوبلازم الجرثومي.



شكل (5-2): آلية عمل جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) كمضاد للجراثيم

(Ishwarya et al., 2024)

درس بريماناثان وزملاؤه (Premanathan et al., 2011) سمية جسيمات ZnO النانوية وتأثيرها على تثبيط نمو الخلايا بدائية وحقيقية النواة، باستخدام خلايا سرطان الدم البشرية HL60 وخلايا الدم المحيطية الطبيعية PBMCs لتقييم السمية. كما فحصت الفعالية المضادة للجراثيم ضد جراثيم سالبة الغرام مثل E. coli و P. aeruginosa وجراثيم موجبة الغرام مثل S. aureus. اقترحت الدراسة آليتين رئيسيتين لسمية ZnO: الأولى القيام بتوليد أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، والثانية تحفيز موت الخلايا المبرمج (Apoptosis).

تنتج جسيمات أكسيد المعادن النانوية أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، تتسبب آليات السمية الخلوية مثل زيادة إنتاج ROS التي تتجاوز قدرة نظام الدفاع المضاد للأكسدة داخل الخلايا في دخول الخلايا إلى حالة من الإجهاد التأكسدي، مما يؤدي إلى ضرر مكونات الخلية مثل الدهون والبروتينات والحمض النووي (Lovrić et al., 2005). تؤدي أكسدة الأحماض الدهنية إلى توليد البيروكسيدات الدهنية التي تبدأ تفاعلاً متسلسلاً يعطل أغشية البلازما والعضيات داخل الخلايا، مما يؤدي في النهاية إلى موت الخلية. هناك أدلة متزايدة على أن ROS المرتفعة تعمل كجزيئات إشارية حاسمة في تحفيز موت الخلايا المبرمج (apoptosis) الناتج عن محفزات مختلفة. وقد أجريت دراسات لتحديد إذا ما كانت جسيمات أكسيد الزنك النانوية تحفز السمية الخلوية عبر مسار موت الخلايا المبرمج، حيث تبين أن ZnO يبدأ عملية موت الخلايا عبر تجزئة الحمض النووي (DNA) يعد علامة حيوية كيميائية على حدوث موت الخلايا المبرمج (Apoptosis) (Premanathan et al., 2011).

بالنسبة للتشطيب المضاد للجراثيم، أكسيد الزنك النانوي أفضل من الفضة النانوية من حيث التكلفة والبياض، إلا أن الفضة النانوية تتميز بسطح كبير للغاية مما يزيد من تماسها مع الجراثيم والفطريات ويظهر خاصية تثبيط للجراثيم أكبر من أكسيد الزنك (Ren et al., 2009).

5.2 الأقمشة ذاتية التنظيف:

يعد مفهوم الأقمشة المقاومة لنفاذية الماء من المفاهيم الشاملة التي تقسم إلى فئتين رئيسيتين، تعكسان اختلافاً جوهرياً في البنية والوظيفة.

الأقمشة غير النافذة للماء (water proof):

يعرف الـ water proof بأنه قدرة القماش على ممانعة اختراق الماء بشكل كامل وحسب (Tortora, P. G., & Merkel, 2005) فإن الأقمشة الغير نافذة للماء عادة تنسج بكثافات عالية وتبطن أو تغطي (coated) بالمطاط أو بمركبات كيميائية أخرى أول من نجح في إنتاج قماش غير نافذ للماء باستخدام التبطين بالمطاط كان (Charles macintosh) عام 1823 في غلاسغو في اسكتلندا وحالياً يبطن القماش برقائق ذات ثقوب ميكروسكوبية تسمح لبخار الماء بالخروج كما في حالة التعرق حيث ينتج قماش ممانع للماء قادر على التنفس عادة يستخدم في الألبسة ذات الاستخدامات الخارجية (Tortora, P. G., & Merkel, 2005) (Danel, 2002).

الأقمشة الطاردة للماء (Water Repellent Fabrics):

يعرف طرد الماء (water repellency) أنها درجة مقاومة القماش لبلل سطحه، اختراق الماء، امتصاص الماء أو أي دمج بين العناصر السابقة (Danel, 2002) في حين أن المرجع (Tortora, P. G., & Merkel, 2005) لم يذكر اختراق الماء كأحد أركان طرد الماء إذ عرفها بأنها خاصية الألياف، الخيوط أو الأقمشة الممانعة للبلل ويذكر المرجع (Tortora, P. G., & Merkel, 2005) أن الأقمشة الطاردة للماء عادة ما تعالج لإنتاج درجات مختلفة من الطرد مثل المعالجة بالشمع أو السيليكون وهذه المعالجات لا تغلق مسامات القماش كما تفعل معالجات ممانعة الماء (water proof) .

إن الأقمشة لها قيمة معينة من طرد الماء (water repellent) التي تكون حاصل طبيعة الخامة الأولية على سبيل المثال القماش القطني ليس طارد للماء ولكن بحكم خصائصه قد يمتلك ممانعة معينة لنفوذ الماء وبنفس الطريقة القماش المصنع من البوليستر ولكن بكثافات خيوط منخفضة يمتلك خصائص طرد عالية للماء بحكم أن البوليستر لا يمتص الماء ولكن قد لا يمتلك أي مقاومة تذكر لنفوذ الماء عندما تكون كثافة خيوطه منخفضة.

ازداد عالمياً الاهتمام بتطوير أسطح ومواد فعالة للتنظيف الذاتي مع تزايد الطلب على الأسطح الصحية، المعقمة ذاتياً، والخالية من التلوث، وذلك في ظل انتشار الميكروبات المقاومة للمضادات الحيوية (Xia, 2016) إن قدرة الكائنات الدقيقة على البقاء على الأسطح يجعل من انتقال العدوى قضية مهمة، حيث أظهرت الدراسات أن بعض الجراثيم المعدية يمكن أن تبقى على سطح مواد بوليمرية ونسجية مختلفة لأكثر من 90 يوماً (Weber et al., 2013) الأسطح ذات التنظيف الذاتي لا توفر الحماية ضد الأمراض المعدية فحسب، بل تحمي أيضاً من الروائح، والبقع، والحساسية. يمكن أن تجعل التطورات في تكنولوجيا النانو الأسطح الخالية من الأوساخ أو التي لا تحتاج إلى غسيل واقعاً ينعكس على الحفاظ على البيئة والتنمية المستدامة .

الأقمشة ذاتية التنظيف هي أقمشة مصنوعة أو معالجة بطرق تمكنها من تقليل التراكم الحيوي أو الاتساخ على سطحها، إما عبر تقنيات مشابهة للخصائص التنظيف الذاتي، أو عبر إضافة مواد معالجة تقاوم الالتصاق أو تحلل الأوساخ. الفكرة الأساسية هي تقليل الحاجة إلى التنظيف اليدوي المتكرر وتحسين الأداء الوظيفي والراحة في الاستخدام. هذه الأقمشة عادة ما تكون معالجة بمواد نانوية أو مواد بوليمرية تعطيها هذه الخصائص (Amer, 2024).

تعتمد الأقمشة ذاتية التنظيف على مبدئين رئيسيين:

➤ الخواص فائقة الكره للماء (superhydrophobicity): حيث يتم تعديل السطح النسيجي ليصبح ذا بنية مجهرية خشنة بشكل يجعل التصاق جزيئات الماء والملوثات به ضعيفاً جداً، فتتجمع قطرة الماء على شكل كروي (تقريباً كروي) يتدحرج بسهولة على السطح محملاً معه الأوساخ والجزيئات الملوثة. هذه الظاهرة مستوحاة من تأثير ورق اللوتس الذي يملك شمعاً كارهاً للماء وبنية سطحية تحجز الهواء بين جزيئات قطرات الماء والسطح، مما يقلل من الاحتكاك والتصاق الأوساخ (Y. Wang et al., 2022).

استوحى الباحثون دراستهم لظاهرة البلل من الطبيعة عبر دراسة سطح نبات اللوتس، الذي يعتبر أفضل مثال لسطح كاره جداً للماء، حيث يحتوي على بلورات نانوية من الشمع فوق نتوءات ميكروية على السطح. تتوضع قطرات الماء عند اصطدامها بالورقة في جيوب هوائية حبسية بين هذه النتوءات، مما يحد من القدرة على تكوين تفاعلات كهربائية ساكنة مع السطح، فيأخذ الماء شكلاً شبه كروي ويتدحرج بسهولة بعيداً عن الورقة، وبالتالي ينقل معه جزيئات التلوث مبتعداً عن السطح.

➤ التحفيز الضوئي بواسطة الجسيمات النانوية (photocatalysis): مثل ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 أو أكسيد الزنك ZnO ، حيث تعمل هذه المواد كحفازات عند تعرضها لأشعة فوق بنفسجية UV، فتنتج جذور أوكسجين نشطة (Reactive Oxygen Species) التي تقوم بتحليل وتفكيك الملوثات العضوية كالبنج والجراثيم، بل وتساهم في قتل الجراثيم والفيروسات على سطح القماش. هذه الطريقة تقلل الحاجة للغسيل المتكرر وتعزز من خصائص مضادة للجراثيم وتقليل الالتهابات، كما تحسن مقاومة القماش للرطوبة والتجعد، مما يطيل عمر القماش ويحافظ على جودته (Rahal et al., 2011) (Afzal et al., 2014) (Zhu et al., 2017).

وجد أن ZnO ، بفجوة نطاق واسعة مباشرة (3.37 إلكترون فولت) و طاقة ربط الإتكسيون العالية (60 ميلي إلكترون فولت)، هو بديل مناسب لـ TiO₂ بسبب قدرته المشابهة على التحلل الضوئي. مؤخراً، ركزت العديد من الدراسات على تصنيع أسطح حفازة ضوئياً وكارهة للماء في الوقت ذاته، بمعنى أن السطح لا يطرد الماء فقط، بل يقاوم أيضاً البقع العضوية (Hernández-Alonso et al., 2009) .

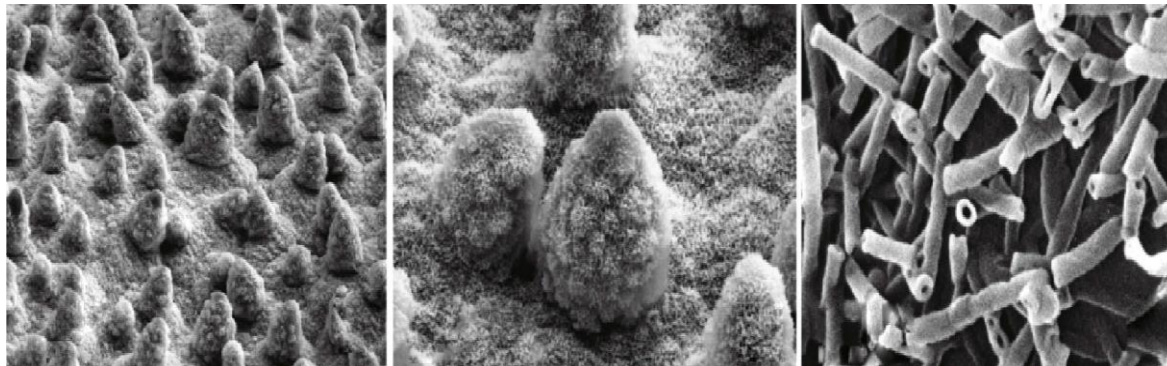
بالتالي يمكن تصنيف تقنيات التنظيف الذاتي بشكل عام إلى نوعين: كارهة للماء (هيدروفوبية) ومحبة للماء (هيدروفيلية) (Ganesh et al., 2011) (Parkin & Palgrave, 2005) النوع الأول يتضمن تغطية القماش بطبقة كارهة للماء ، بحيث تنزلق قطرات الماء حاملة للملوثات وتتدحرج بعيداً.

التقنية الهيدروفيلية لا تعتمد فقط على تدفق الماء لإزالة الملوثات، بل تستغل التحلل التحفيزي الضوئي، مما يسمح للماء المنتشر على السطح بحمل الملوثات العضوية الناتجة عن التحلل الضوئي.

في البحث الحالي سيتم التركيز على الخواص فائقة الكره للماء.

درس الباحثان Barthlott و Neinhuis تأثير نبات اللوتس عام 1997 ، أظهر الباحثان أن الخصائص المميزة لهذا السطح تعود إلى طبقة الشمع التي تتكون من هيدروكربونات ضعيفة الألفة للماء، مما يؤدي إلى سطح منخفض الطاقة مع خشونة ونتوءات مميزة. تظهر الصور المجهرية في الدراسات الشكل (2-6) هذه النتوءات الميكروية مع بلورات الشمع النانوية، والتي تكون سطحاً فائق الكره بزاوية تلامس تزيد عن 150 درجة، مما يجعل لهذا السطح خصائص التنظيف الذاتي واضحاً وعملياً (Neinhuis & All, 1997) تعتبر

هذه الظاهرة نموذجاً طبيعياً وملهماً للباحثين في تطوير مواد وتقنيات تحاكي هذه الخاصية لتوفير وظائف مقاومة للماء والتنظيف الذاتي في تطبيقات متعددة.



شكل (2-6): صور المجهر الإلكتروني SEM لسطح ورقة اللوتس عند قيم تكبير مختلفة (Barthlott et al., 2017)

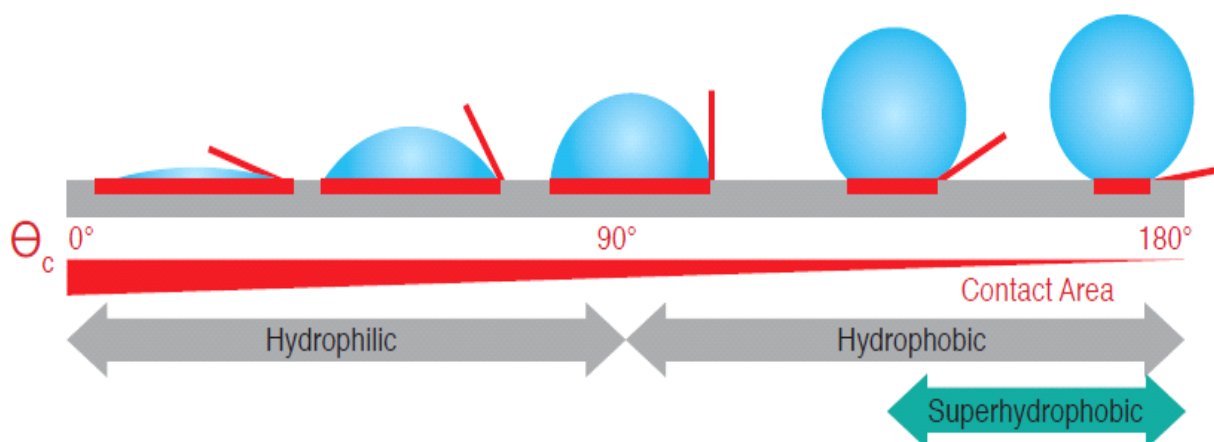
استفيد من ظاهرة كراهية الماء التي تتمتع بها أوراق زهرة اللوتس في تطوير مواد طاردة للماء ذات ثباتية عالية (Durable Water Repellents - DWRs) تحاكي البنية المجهرية الفريدة لسطح أوراق اللوتس.

1.5.2 نظريات الترطيب:

عندما لا تنتشر قطرة الماء على السطح الصلب فإنها ستأخذ شكلاً مستقرًا وستظهر زاوية تسمى زاوية التماس هي حاصل العلاقة بين الصلب والسائل وهذه الزاوية تعمل كمؤشر على تبلل الصلب بالسائل. إن القوى بين السائل والبخار - السائل والصلب - الصلب والبخار كلها تأخذ بعين الاعتبار عند تحديد إذا كان السائل سينتشر على السطح الصلب أو يأخذ شكل قطرة، حيث أن حدوث التوازن بين هذه القوى يحدد زاوية التماس (Derek Heywood, 2003) (Williams.J, 2018)

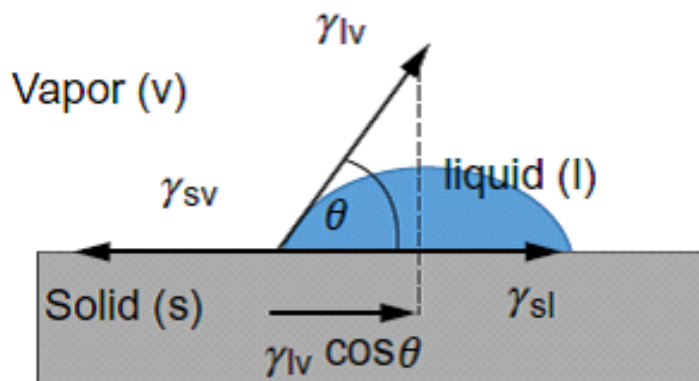
زاوية التماس بين السطح الصلب والسائل (contact angle) :

عندما لا تنتشر قطرة الماء على السطح الصلب فإنها ستأخذ شكلاً مستقرًا وستظهر زاوية تسمى زاوية التماس هي حاصل العلاقة بين الصلب والسائل وهذه الزاوية تعمل كمؤشر على تبلل الصلب بالسائل تقاس قابلية البلل عادة بواسطة زاوية التماس بين قطرة السائل وسطح القماش، حيث تعكس هذه الزاوية درجة التفاعل بين السائل والسطح الشكل (7-2) ؛ فإذا كانت الزاوية أصغر من 90° يعتبر السطح محباً للماء ، وإذا زادت عن 90° يعتبر السطح كارها للماء (Ni & Zhang, 2017) (Bracco & Holst, 2013)



شكل (7-2): زوايا التماس بين قطرة السائل والسطح الصلب في حالة سطح محب للماء و سطح كاره للماء (Borkowicz et al., 2017)

لا توجد طريقة مباشرة لقياس التوتر السطحي للسائل، لذلك يتم قياس الترطيب بناء على تحقيق توازن القوى عند تلاقي ثلاثة محاور وهي: الصلب، والسائل، والبخار. عندما توضع قطرة السائل على السطح الصلب دون أن تنتشر، تأخذ القطرة شكلاً مستقرًا وثابتاً؛ وتحدد زاوية التماس Θ كدلالة على درجة تبلل السطح بالسائل الشكل (8-2). تعكس هذه الزاوية علاقة التوازن بين قوى التماسك والترابط عند تداخل هذه المحاور الثلاثة.



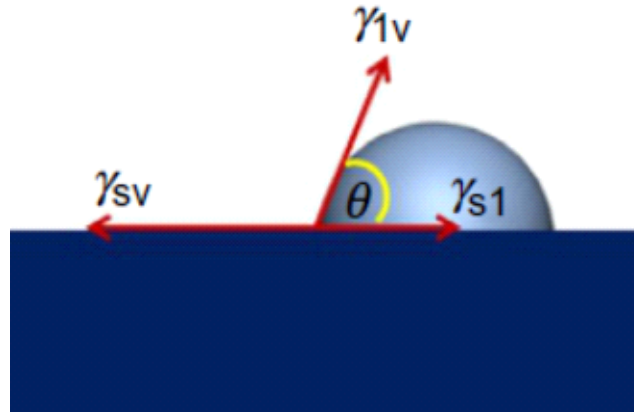
شكل (2-8): زاوية التماس بين السطح الصلب والسائل والقوى المؤثرة على قطرة السائل (Williams.J, 2018)

درس الباحثون نظريات الترطيب وفق النماذج الثلاث، نموذج يونغ، نموذج وينزل ونموذج كاسي _ باكستر وأوضحوا آلية تصنيع سطوح مضادة للبلل عن طريق التركيز على الدمج بين عاملين أساسيين هما خشونة السطح وكيميائية السطح حيث تم شرح آلية تصنيع هذه السطوح وفق استراتيجيات مختلفة.

أولاً: نموذج يونغ young model :

يفترض نموذج يونغ أن السطح أملس (ناعم) وتوضح قابلية الترطيب كعلاقة بين زاوية التماس الثابتة والتوتر السطحي البيني بين صلب -بخار والتوتر السطحي بين سائل -بخار كما في الشكل (2-9). توازن القوى المؤثرة على قطرة السائل المستقرة فوق السطح الصلب تعطى بعلاقة يونغ (Dr. Charles Tomasino, 1979):

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (1)$$



شكل (2-9): توازن القوى عند تلامس قطرة سائلة مع سطح أملس وفق نموذج يونغ (Montazer & Harifi, 2018)

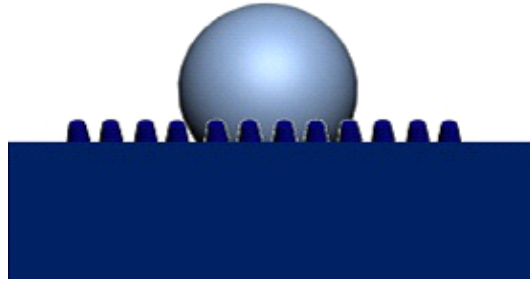
ثانياً: نموذج وينزل Wenzel model :

أفترض وينزل اتصال تام لقطرة السائل مع السطح الصلب الشكل (2-10) (Sudeepthi et al., 2020) وأوضح أن زاوية التماس مع السطح الخشن (θ_w) تتناسب مع زاوية التماس مع السطح المستوي (θ_e) ومعامل خشونة السطح (r) .

$$\cos\theta_w = r \cos\theta_e \quad (2)$$

حيث r : نسبة المساحة الفعلية للسطح الخشن إلى المساحة الهندسية (المساحة الظاهرة) للسطح.

تعكس هذه المعادلة تأثير خشونة السطح على زاوية التماس، حيث تزيد خشونة السطح من زاوية التماس الظاهرة على الأسطح الكارهة للماء مما يزيد من كراهية الماء.



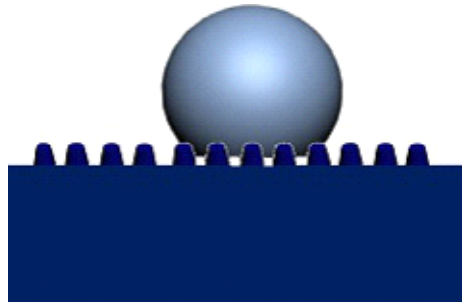
شكل (2-10): توضع قطرة الماء على السطح وفق نموذج وينزل (Montazer & Harifi, 2018)

ثالثاً: نموذج كاسي - باكستر **Cassie - Baxter model** :

في هذا النموذج افترض الباحثان أن السطح غير متجانس حيث أن السائل غير متصل بشكل تام مع السطح الصلب الشكل (2-11) (Sudeepthi et al., 2020) ، حيث يكون في حالة تماس مع جيب الهواء المحصور بين النتوءات السطحية ومع هذه النتوءات أيضاً .

$$\cos \theta_r = f_s(\cos \theta + 1) - 1 \quad (3)$$

f_s : الجزء الصلب من السطح .



شكل (2-11): توضع قطرة الماء على السطح وفق نموذج كاسي باكستر (Montazer & Harifi, 2018)

كلاهما نموذج ونزل وكاسي باكستر أوضحا آلية البلل على الأسطح الخشنة وأثبتا أن خشونة السطح والطاقة السطحية المنخفضة هما عاملان حاسمان على حد سواء لبناء أقصى حدود حالات الترطيب السطحي. وللحصول على سطح كاره جداً للماء من الضروري تصميم أبعاد السطح بحيث تزداد منطقة التماس بين السائل والهواء حيث أن تغيير الطاقة السطحية أو تغيير خشونة السطح أو كليهما يحقق خصائص السطح الكاره جداً للماء.

1.1.5.2 المعالجة النهائية للأقمشة بمواد نانوية لإكسابها خصائص ذاتية التنظيف:

يعد استخدام الجسيمات النانوية، التشطيبات النانوية، والهياكل النانوية مفيد جداً لتعزيز وتطوير خصائص الأداء المتفوقة للأقمشة التقليدية بما في ذلك النشاط المضاد للميكروبات، مقاومة الماء، التنظيف الذاتي، مقاومة الأوساخ، مضاد للكهرباء الساكنة، مضاد للأشعة تحت الحمراء، ومقاومة اللهب.

يمكن إعداد هذه الأقمشة من خلال طريقتين أساسيتين (Stegmaier et al., 2008) :

إدخال خشونة بمقياس النانو على سطح النسيج باستخدام الجسيمات النانوية مثل الفضة، وشعيرات نانوية مثل أنابيب أكسيد الزنك (ZnO) النانوية وأنابيب الكربون النانوية، أو بواسطة طرق تعديل فيزيائية للسطح مثل الليزر أو البلازما، إلى جانب تطبيق مواد ذات طاقة سطحية منخفضة لإكساب السطح خاصية كراهية الماء (Liu et al., 2007) (Dastjerdi et al., 2010).

أو عن طريق معالجة الأقمشة التي تحوي بنية ميكروية أو نانوية بمواد ذات طاقة سطحية منخفضة . على سبيل المثال، تم طلاء قماش البوليستر الميكروفايبر بالسيليكون لإنتاج بوليستر فائق الكره يتمتع بخواص تنظيف ذاتي (L. Gao & McCarthy, 2006) .

طبقت مواد بوليميرية من الفلورو كربون السداسي مع المادة النانوية على عينات القماش المدروسة في البحث الحالي تؤدي إلى تخفيض الطاقة السطحية للقماش لإكسابه خاصية الكراهية للماء.

2.1.5.2 المعالجة النهائية بمركبات الفلوروكربونية :

تعتبر الفلوروكربونات مادة معالجة نهائية طاردة للماء حيث يمكنها تزويد طبقة النسيج بطاقة سطحية منخفضة أقل من أي من معالجات الانهاء الطاردة للماء، لكن لمركبات الفلوروكربون تأثيرات سلبية على الصحة والبيئة (Williams.J, 2018). عادة ما تتوفر التشطيبات الكيميائية الفلورية على شكل مستحلبات مائية وتستخدم على الأقمشة بواسطة طريقة الغمر-التجفيف-المعالجة الحرارية، حيث تكون درجة حرارة التثبيت حوالي 160-170 درجة مئوية لمدة دقيقتين تقريباً. يقيّم أداء خاصية الطرد المائي للأقمشة من خلال قياس زاوية التماس، قابلية البلل، امتصاص الرطوبة، ونفاذية البخار. هذه التشطيبات يشكل طبقة سطحية ذات طاقة سطحية منخفضة جداً، حيث تتجه السلاسل الجانبية الفلورية CF_3 - إلى الخارج، مما يعزز خصائص الكراهية للماء والزيوت بشكل فعال ومستقر لفترة طويلة. كما أن حجمه الجزيئي الصغير وقدرته على الانتشار بسهولة داخل الألياف تساهم في زيادة ثباتية التشطيب دون التأثير على قابلية التنفس أو النعومة للنسيج .

(Audenaert et al., 1999) (Ghosh et al., 2025a)

المواد الكيميائية الفلورية أو المركبات المفلورة هي المواد العضوية التي تحتوي على ذرة واحدة على الأقل من الفلور، مع ذلك في مجال تكنولوجيا الغزل والنسيج يتم تعريف الفلوروكربونات كمركبات عضوية مع ارتفاع نسبة الفلور التي تحل محل الهيدروجين المرتبط بالكربون .

تتميز المواد الفلوروكربونية ببنية تغطي فيها ذرات الفلور النشط ذرات الكربون بصورة منتظمة وبرابطة عالية الثباتية تخفض من معدلات استقطاب المركب وتخفض من طاقته الداخلية فتضعف من ألفته تجاه الكيماويات الأخرى ويصبح طارداً للماء والزيت والأغوال (Sayed & Dabhi, 2014) .

تلعب خاصية كراهية الماء دوراً جوهرياً في منع امتصاص السوائل والحد من انتشار الميكروبات على أسطح الأقمشة. تتأثر قابلية البلل، وهي من الظواهر السطحية الرئيسية، بعاملين رئيسيين :طاقة السطح وطبوغرافيا

السطح. يعتمد تصنيع الأقمشة فائقة الكراهية للماء في الوقت الراهن على عمليات متعددة الخطوات تتطلب استهلاكاً عالياً للطاقة، استخدام معدات باهظة التكاليف، ومواد مكلفة مثل السيلانات، السيليكا، والمواد اللاصقة. غالباً ما تصاحب هذه المواد معالجات معقدة، تطبيق طبقات متعددة، وعوامل رابطة كيميائية قوية، مما يقلل من الجدوى الاقتصادية لهذه العمليات.

لمواجهة هذه التحديات، أصبحت التشطيبات القائمة على الفلوروكربون من أكثر الوسائل انتشاراً لمنح الأقمشة خصائص كارهة للماء والزيت بثنائية عالية، مقارنة بالمواد القائمة على السيليكون والهيدروكربون، والتي توفر مقاومة محدودة للماء، ولا توفر مقاومة للزيت، وتفتقر إلى الثباتية على الغسيل، تقوم الفلوروكربونات بخفض طاقة السطح بشكل كبير، ما يمنح أداء أكثر فاعلية وديمومة في مقاومة الماء والزيت (Mondal, 2021). ولتحقيق مقاومة فعالة للسوائل، يجب أن تكون طاقة سطح النسيج أقل من طاقة سطح السائل؛ حيث يبلغ التوتر السطحي للماء حوالي 73 mN/m، وتتراوح زيوت مختلفة بين 20-35 mN/m. تمتلك المركبات المبنية على الفلوروكربون طاقات سطحية منخفضة تتراوح بين 10-20 mN/m، مما يجعلها فعالة جداً في صد الماء والزيوت (Mondal, 2021) (Rezić & Kiš, 2020) بينما المواد الخالية من الفلور مثل السيليكونات حيث γ_c يتراوح بين 24-30 mN/m لا تقدم مقاومة للزيت. كما توفر الأسطح منخفضة الطاقة مقياساً لمقاومة الأوساخ الجافة من خلال منع جزيئات الأوساخ من الالتصاق القوي بأسطح الألياف، مما يسمح بسهولة إزالتها بالحركة الميكانيكية (Sayed & Dabhi, 2014).

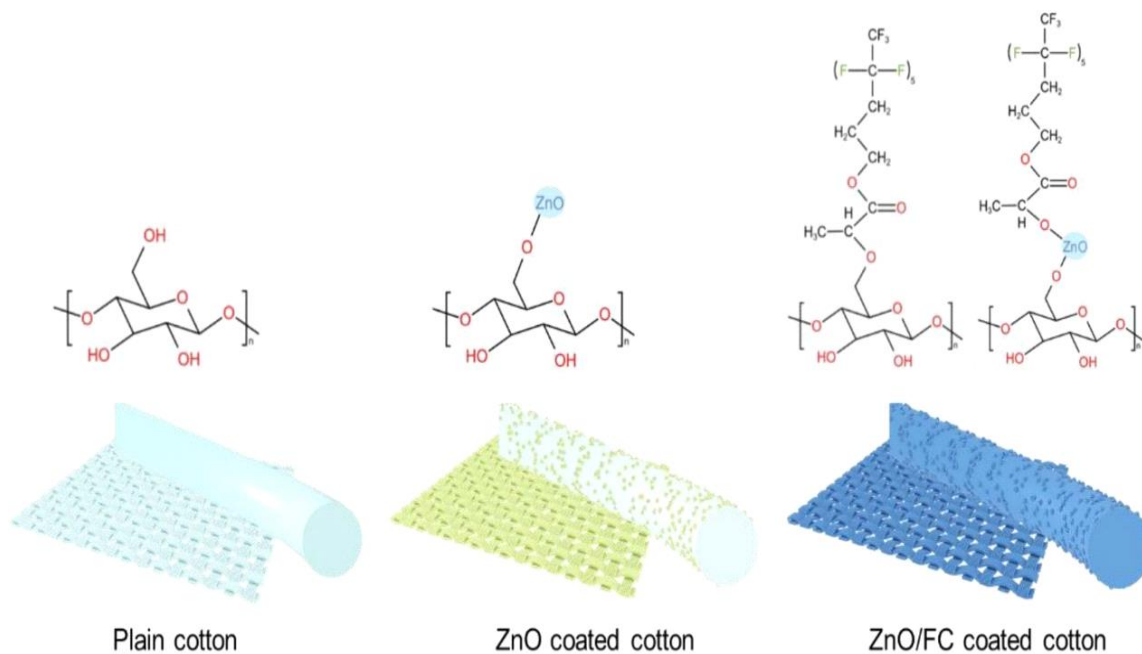
على الرغم مما سبق، أثارت مخاوف بيئية وصحية بشأن الفلوروكربونات التقليدية ذات السلاسل الكربونية الطويلة (C₈)، والتي قد تتحلل إلى مركبات سامة ومستقرة في البيئة مثل PFOA و PFOS استجابة لذلك، تم تطوير الفلوروكربونات قصيرة السلسلة (C₆)، والتي توفر خياراً أكثر أماناً مع تقليل احتمالية التراكم الحيوي، يذكر أن المنتج الرئيسي لتحلل فلوروكربونات C₆، حمض البيرفلوروهيكسانويك (PFHxA)، يمتلك تراكمًا

حيوياً أقل بأربعين مرة مقارنة بـ PFOA ويعتبر صديقاً للبيئة . لكنه أقل فعالية، ما يتطلب كميات أكبر من المادة الكيميائية لتحقيق نفس الأداء . يسعى المصنعون إلى تقليل طول سلسلات بيرفلوروالكربون في منتجاتهم، حيث تم استخدام C4 أيضاً . كلما كانت السلسلة أقصر، تحللت المواد الكيميائية بسرعة أكبر في البيئة، إلا أن ذلك يقلل من أداء الأقمشة في مقاومة الماء والزيت . كيمياء C₆ أقرب كيميائياً لـ C₈ لكنها لا تحتوي على PFOA، وتتحلل بيئياً بشكل أفضل، ولكنها أقل ثباتاً وفعالية في المعالجات المقاومة للماء والزيت (Sayed & Dabhi, 2014).

تعتمد طريقة تطبيق التشطيب الكيميائي الفلوري على نوع المادة النسيجية، مثل الأقمشة المنسوجة، الأقمشة المحاكاة، المخمل، الأقمشة ذات الوبر أو السجاد، وكذلك على ما إذا كان التشطيب الفلوري متغلغلاً داخل بنية الليف لتكوين طبقة تغطي جميع الألياف بشكل موحد، أم أن التطبيق السطحي فقط هو المرغوب فيه . يقدر عادة مقدار المادة الكيميائية الفلورية المودعة على القماش بنسبة 0.15% إلى 0.3% من وزن النسيج . يتم التحكم في هذه النسبة بشكل رئيسي بضبط تركيز التشطيب الكيميائي في حمام التبطين، وليس عن طريق تعديل نسبة الامتصاص الرطب (I. Khan et al., 2023) (Sayed & Dabhi, 2014).

يمكن دمج الجسيمات النانوية في الأقمشة بطرق متنوعة مثل الطباعة، الغمر والتجفيف والمعالجة الحرارية "، الرش والطلاء . تعد تقنية " الغمر - التجفيف - المعالجة الحرارية " من أكثر الطرق استخداماً لمعالجة الأقمشة بمواد نانوية (Ghosh et al., 2025b)، حيث تشمل غمر النسيج بمحلول يحتوي على الفضة النانوية (Ag) وراتنج الفلوروكربون السداسي (C₆F₆) أو محلول يحتوي على أكسيد الزنك النانوي (ZnO) وراتنج الفلوروكربون (C₆F₆) كما في الشكل (2-12) (Y. Wang et al., 2022)، تليها عملية تجفيف والمعالجة الحرارية في ظروف . تضمن هذه الطريقة توزيعاً منتظماً ومتيناً للمادة النانوية على سطح القماش، مما يعزز خصائصه المضادة للجراثيم وبنيته دون التأثير على صفاته الأساسية مثل النعومة وقابلية التنفس . يؤدي دمج

أكسيد الزنك والفلوروكربون C_6 في أقمشة القطن إلى تحسين خصائصها المقاومة للماء والجراثيم، مما يشكل إمكانات واحدة لتحسين معايير النظافة في المستشفيات وتقليل انتقال العدوى المرتبطة بالرعاية الصحية. تساهم هذه الأقمشة المتقدمة في تقليل تواتر الغسيل، إطالة عمر المنسوجات الطبية، والأهم من ذلك، في توفير بيئة أكثر أماناً للمرضى والعاملين في قطاع الرعاية الصحية (Y. Wang et al., 2022).



شكل (2-12): شكل تخطيطي يوضح معالجة قماش قطني سادة بمركب ZnO-FC (Y. Wang et al., 2022).

في هذا السياق، يعد تطوير أقمشة مقاومة للجراثيم وكارهة للماء أمراً بالغ الأهمية للحد من انتشار العدوى داخل مرافق المستشفيات.

يستعرض البحث الحالي تطوير أقمشة مضادة للجراثيم وكارهة للماء باستخدام مركب نانوي $(ZnO-C_6F_6)$ ، $(Ag-C_6F_6)$ تم اختيار راتنج الفلوروكربون (RUCOSTAR EEEO) C_6 ، الخالي من مركبات PFOA و PFOS و APEO، لتحسين خاصية الكراهية للماء بطريقة أكثر أماناً واستدامة. تم اختيار هذه المادة

لسهولتها في التطبيق، توافقها مع تقنية الغمر-التجفيف-المعالجة الحرارية، وخصائصها الممتازة المقاومة للماء، مما يجعلها مناسبة للاستخدام على نطاق صناعي واسع.

الجزء الثاني

3. الفصل الثالث: الأجهزة المستخدمة وطرائق البحث

في الفصل الحالي، تم التركيز على الاستفادة من الخصائص الفريدة للمواد النانوية كالفضة النانوية وأكسيد الزنك النانوي، حيث تم تحضير الفضة النانوية بطريقة خضراء، وتحضير أكسيد الزنك النانوي بطرق كيميائية محكمة، إضافة إلى استخدام راتنج فلوروكربون سداسي لإكساب الأقمشة خواص ذاتية التنظيف ومضادة للجراثيم وتكون ذات ثباتية وفعالية على الأقمشة القطنية المنسوجة. تم تطبيق هذه المركبات على الأقمشة ومن ثم تقييم الأداء الوظيفي عبر مجموعة من الاختبارات الدقيقة التي تغطي الخصائص الذاتية للتنظيف والمضادة للجراثيم، معتمدة على طرق كمية ونوعية. تمثل هذه الدراسة تحديات تقنية عالية تتطلب دقة في التجهيز والتوصيف، واستغرقت عدة سنوات للوصول إلى نتائج موثوقة وقابلة للتطبيق الصناعي.

1.3 المواد والأجهزة والأدوات المستخدمة في البحث:

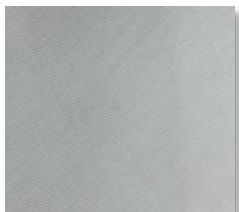
أولاً: المواد الكيميائية المستخدمة في البحث:

جدول (3-1): المواد المستخدمة في البحث

المادة الكيميائية	الشركة الصانعة
نترات الفضة AgNO_3	Sigma-Aldrich
الأمونيا (NH_4OH)	BDH- England
أسيئات الزنك $\text{Zn} (\text{CH}_3\text{COO})_2$	Sigma-Aldrich (Darmstadt, Germany)
الإيثانول	Sigma-Aldrich (Darmstadt, Germany)
وحمض الأكساليك $(\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4)$	Sigma-Aldrich (Darmstadt, Germany)
راتنج الفلورو كربون السداسي- C_6 Fluorocarbon resin	(Rucostar EEE6, Rudolf, Germany)

ثانياً: مواصفات عينات القماش:

جدول (2-3): مواصفات عينات القماش المدروسة لأمثلة تركيز راتنج الفلورو كربون السداسي

البرامترات	العينة A	العينة B	العينة C
نمرة السداء (Ne)	12	7	30/2
نمرة اللحمة (Ne)	12	7	30/2
كثافة السداء (yarn/cm)	30	20	34
كثافة اللحمة (yarn/cm)	16	10	22
وزن المتر مربع (g/m^2)	241	265	246
التركيب النسيجي	مبرد 3/1	مبرد 3/1	مبرد 3/1
صور العينات			

جدول (3-3): مواصفات عينة القماش المستخدمة للاختبارات الجرثومية والقطرة السائلة

المادة الأولية	نمرة السداء (Ne)	نمرة اللحمة (Ne)	كثافة السداء (Yarn/cm)	كثافة الحدف (Yarn/cm)	التركيب النسيجي	وزن المتر مربع g/m^2
قطن 100%	30/2	30/2	34	22	مبرد 3/1	246

ثالثاً: الأجهزة والأدوات المستخدمة في البحث:

- المطيافية الضوئية في المجال المرئي وفوق البنفسجي UV-Vis spectrophotometer طراز Varian (carry5000) لقياس طيف الامتصاصية الضوئية للمزيج المحضر للتأكد من تشكل الفضة النانوية. استخدمت الخلية ذات العرض 1 cm ومدد المزيج بماء خال من الشوارد (قسم الفيزياء - جامعة دمشق).
- مجهر القوة الذرية AFM صنع شركة Nanosurf ، طراز easyscan2 و ح قرت العينة بتمديدها بماء خال من الشوارد وتنقيها على شريحة زجاجية وتركها لتجف (قسم الفيزياء - جامعة دمشق).
- جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) من طراز IR AFFINITY-1S هو جهاز مطور من شركة SHIMADZU. يستخدم الجهاز في التحليل الكيميائي للمواد، يظهر الطيف الناتج عن الروابط الكيميائية والمجموعات الوظيفية الموجودة في الجزيء، يقيس أطوال موجية ضمن مجال من 350 إلى 7800 سم⁻¹ مع دقة تصل إلى (0.5 سم⁻¹) شركة مياميد للصناعات الدوائية.
- جهاز مطيافية الامتصاص الذري (AAS) من شركة Perkin-Elmer طراز 305B هو جهاز تحليلي يستخدم لتحديد تركيز المعلق النانوي (مركز الاختبارات والأبحاث الصناعية).
- المجهر الإلكتروني الماسح بانبعاث الميداني (FE-SEM) طراز Zeiss Sigma 300 المزود بمنظومة التحليل العنصري بمطيافية تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) هو جهاز متكامل يقدم صوراً عالية الدقة مع القدرة على تحديد تركيبة العناصر الكيميائية ونسبها في العينات
- جهاز الانعراج بالأشعة السينية (XRD) X-ray Diffractometer من صنع شركة PHILIPS ، طراز PW3710 ، هو جهاز يستخدم لتوصيف العينات من خلال ظاهرة انحراف الأشعة السينية.
- جهاز الطرد المركزي من شركة Hettich طراز (UNIVERSAL 320) قسم الفيزياء - جامعة دمشق.

- جهاز التنظيف بالأموح فوق الصوتية مع مثبت درجة الحرارة طراز (DSA100-GL-4.0L) قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- مسبار موجات فوق صوتية من شركة (FAPAN) قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- فرن ترميد موديل (FHP-12) من شركة (WISTHERM) الكورية قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- مجففة (Memmert) ألمانية الصنع قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- فرن تجفيف (CARBOLITE) ألماني-بريطاني الصنع قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- خلاط مغناطيسي (VELP SCINTIFICA) إيطالي الصنع قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- جهاز PH-meter (Milwaukee) روماني الصنع قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- جهاز قياس العكارة (McFarland Turbidity Meter) شركة مياميد للصناعات الدوائية.
- ميزان حساس بارتياح 0.1mg (Sartorius) قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- ميزان الكتروني حساس بدقة تصل إلى 0.00001g من نوع (SHIMADZU) قسم الفيزياء -جامعة دمشق.
- جهاز اختبار نفاذية الماء (SDI Atlas (spray test) مركز الاختبارات والبحوث الصناعية.
- جهاز الانسدالية (جهاز ملحق بقسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية -جامعة دمشق)
- غسالة مخبرية نوع ATLAS LAUNDER.OMETER مركز الاختبارات والبحوث الصناعية.
- مايكروسكوب ضوئي نوع 2.5 Micro Capture.

2.3 تحضير المواد النانوية:

1.2.3 الاصطناع الأخضر للفضة النانوية:

حضرت الفضة النانوية بطريقة خضراء باستخدام مستخلص من نبات اليوكالبتوس حيث وقع الاختيار على نبات اليوكالبتوس بسبب قدرته الكبيرة على الإرجاع والإنتشار الكبير لنبات اليوكالبتوس في سوريا وعلى مدار السنة.

أولاً: طريقة تحضير المستخلص المائي:

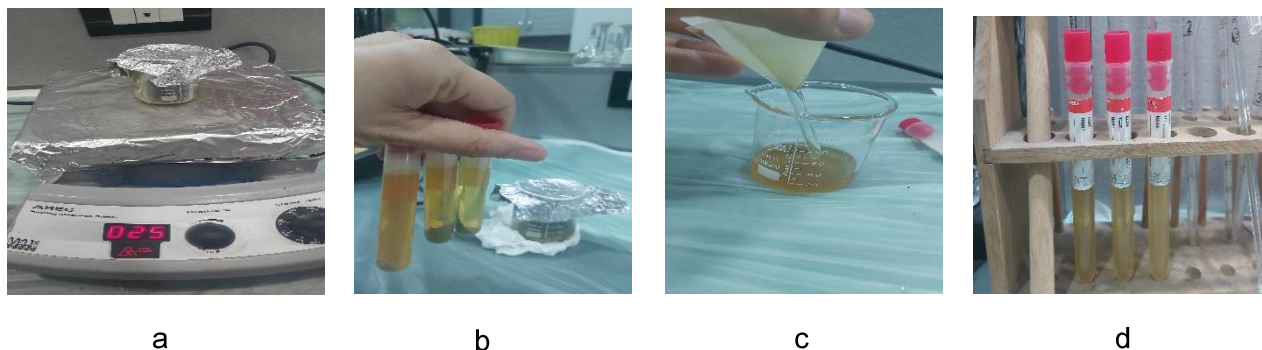
جمعت أوراق اليوكالبتوس من حديقة جامعة دمشق المركزية، غسّلت الأوراق جيداً بالماء والصابون ومن ثم بالماء عدة مرات للتخلص من الأوساخ والغبار والجزيئات العالقة، جففت الأوراق في المجففة عند درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة ساعتين حتى ثبات الوزن. طُحنت الأوراق المجففة بواسطة مطحنة كهربائية ثم وضعت في أكياس مغلقة لحين الاستخدام . الشكل (1-3) أوراق نبات اليوكالبتوس قبل وبعد التجفيف.



شكل (1-3): أوراق نبات اليوكالبتوس قبل التجفيف وبعد التجفيف

تم غلي 30 مل من الماء المقطر الخالي من الشوارد، ثم يضاف إليه 3 غرامات من أوراق اليوكالبتوس مع التحريك الخفيف لترطيب الأوراق الطافية على السطح .يغطى الإناء بورق قصدير مع استمرار الغلي لمدة 10 دقائق. بعد إتمام الغليان، يرفع البيشر عن السخان ويوضع على سطح عازل لمنع التبادل الحراري المباشر

مع الطاولة. يفصل المستخلص باستخدام جهاز الطرد المركزي (المثقلة) بسرعة 9500 دورة في الدقيقة لمدة 5 دقائق، ثم يزال الطافي الناتج ويرشح باستخدام ورق ترشيح (Whatman No.1.) يحفظ المستخلص في عبوة محكمة الإغلاق ويوضع في الثلاجة لاستخدامه لاحقاً في تحضير الفضة النانوية. يوضح الشكل (2-3) خطوات تحضير مستخلص اليوكالبتوس.



شكل (2-3): خطوات تحضير مستخلص اليوكالبتوس a: تسخين مستخلص اليوكالبتوس حتى الغليان b : المستخلص بعد وضعه في المثقلة لمدة 5 دقائق c: ترشيح المستخلص d: وضع المستخلص في أنابيب ويحفظ في الثلاجة.

ثانياً: تحضير الفضة النانوية:

تم تحضير الفضة النانوية بطريقة الاصطناع الحيوي الأخضر، في البداية حضر محلول نترات الفضة كمصدر لأيونات الفضة بتركيز ($M = 2 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$)، وحضر المستخلص النباتي بتركيز يحقق نسبة حجمية بالنسبة إلى محلول نترات الفضة تساوي 2:10 ومن ثم أُضيف المستخلص المائي المحضّر ببطء ومع التحريك على خلاط مغناطيسي تحريكاً مستمراً وبسرعة 600 دورة بالدقيقة وبدون تسخين كما هو موضح بالشكل (3-3) يتحول اللون بعد دقيقتين من الأصفر إلى البني الفاتح ومن ثم بعد خمس دقائق إلى اللون الأسود حيث يدل على تشكل إلى بدء عملية الإرجاع وتشكل جسيمات الفضة النانوية بالطريقة المعتمدة في الدراسة المرجعية (Rajput et al., 2023).



(a)



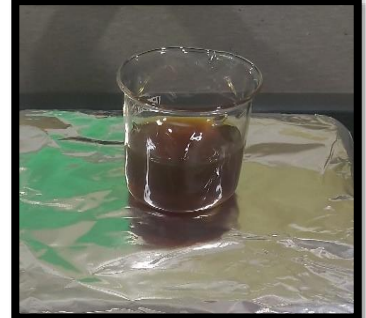
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

شكل (3-3): خطوات تحضير الفضة النانوية الغروية a: نترات الفضة من Sigma-Aldrich b: نترات الفضة والماء المقطر. c: مستخلص اليوكالبتوس d: محلول نترات الفضة بعد اضافة مستخلص اليوكالبتوس. e: محلول نترات الفضة ومستخلص اليوكالبتوس بعد دقيقتين من التحريك المغناطيسي. f: محلول نترات الفضة ومستخلص اليوكالبتوس بعد خمس دقائق من التحريك المغناطيسي

هناك عوامل تلعب دوراً في تحديد خصائص جسيمات الفضة النانوية الناتجة مثل الأبعاد، توزيع الجسيمات، والشكل، وتشمل هذه العوامل نوع المستخلص النباتي المستخدم وتركيزه، تركيز مصدر شوارد الفضة، مدة التفاعل، عامل التغطية، و (PH) للمحلول، في بحثنا تم اعتماد تركيز نترات الفضة وتركيز مستخلص اليوكالبتوس وفقاً للدراسة (Zein et al., 2022) وسيتم أمثلة PH المحلول

ثالثاً: أمثلة (PH) محلول الفضة النانوية:

يلعب الرقم الهيدروجيني (pH) للمحلول دوراً مهماً في تحديد شكل وأبعاد جسيمات الفضة النانوية الناتجة أثناء تحضيرها. تمت دراسة تأثير PH المحلول من خلال إضافة الأمونيا (NH_4OH) خلال عملية التشكيل. توضح الدراسات أن التغيرات في درجة الحموضة تؤثر على سرعة اختزال أيونات الفضة، وعلى استقرار الجسيمات، ومع زيادة PH المحلول (بين 9 و 10) يزداد استقرار الجسيمات والحصول عليها بأبعاد صغيرة، وتكوين جسيمات ذات شكل كروي موحد ومتجانس. أما عند انخفاض pH إلى القيم الحامضية تميل الجسيمات إلى التكتل وزيادة في أبعادها (Riaz et al., 2020)(زين.رغد. et al., 2022).

بالتالي، يعد ضبط pH الوسط أثناء التخليق أحد العوامل الأساسية التي تسهم في التحكم الدقيق بأبعاد وشكل الجسيمات النانوية، وبالتالي في خصائصها الفيزيائية والكيميائية وفعاليتها الحيوية.

تم إضافة المستخلص المحضر إلى محلول نترات الفضة بنسبة 10:2 دون إضافة أية مواد أخرى، وكانت قيمة (PH) للمحلول النهائي 4.2 .

تم إضافة المستخلص المحضر إلى محلول نترات الفضة بنسبة 10:2 ، ومن ثم تم إضافة الأمونيا (NH_4OH) لتعديل الرقم الهيدروجيني للمحلول. تساهم إضافة الأمونيا في زيادة قلوية الوسط، مما يؤثر على سرعة التفاعل والتحكم في نمو جسيمات الفضة النانوية وحجمها وشكلها.

تم تحضير محلول الامونيا بتركيز 0.1 وذلك باستخدام قانون التمديد $C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$ حيث C_1 تركيز V_1 وحجم المحلول الأصلي و C_2 ، V_2 تركيز وحجم المحلول الممدد.

يوضح الجدول (3-4) تغيرات PH المحلول من خلال تغير حجم الامونيا المضافة حيث:

A1: في هذه التجربة، تم إضافة المستخلص المحضر إلى محلول نترات الفضة بنسبة 10:2 ، ومن ثم تم

إضافة الأمونيا (NH₄OH) بحجم 400µl ليصبح (PH) المحلول النهائي 5 .

A2: في هذه التجربة، تم إضافة المستخلص المحضر إلى محلول نترات الفضة بنسبة 10:2 ، ومن ثم تم

إضافة الأمونيا (NH₄OH) بحجم 500µl ليصبح (pH) المحلول النهائي 7 .

A3: في هذه التجربة، تم إضافة المستخلص المحضر إلى محلول نترات الفضة بنسبة 10:2 ، ومن ثم قمنا

بإضافة الأمونيا (NH₄OH) بحجم 600µl ليصبح (pH) المحلول النهائي 9 .

A4: في هذه التجربة، تم إضافة المستخلص المحضر إلى محلول نترات الفضة بنسبة 10:2 ، ومن ثم تم

إضافة الأمونيا (NH₄OH) بحجم 700µl ليصبح (pH) المحلول النهائي 10 .

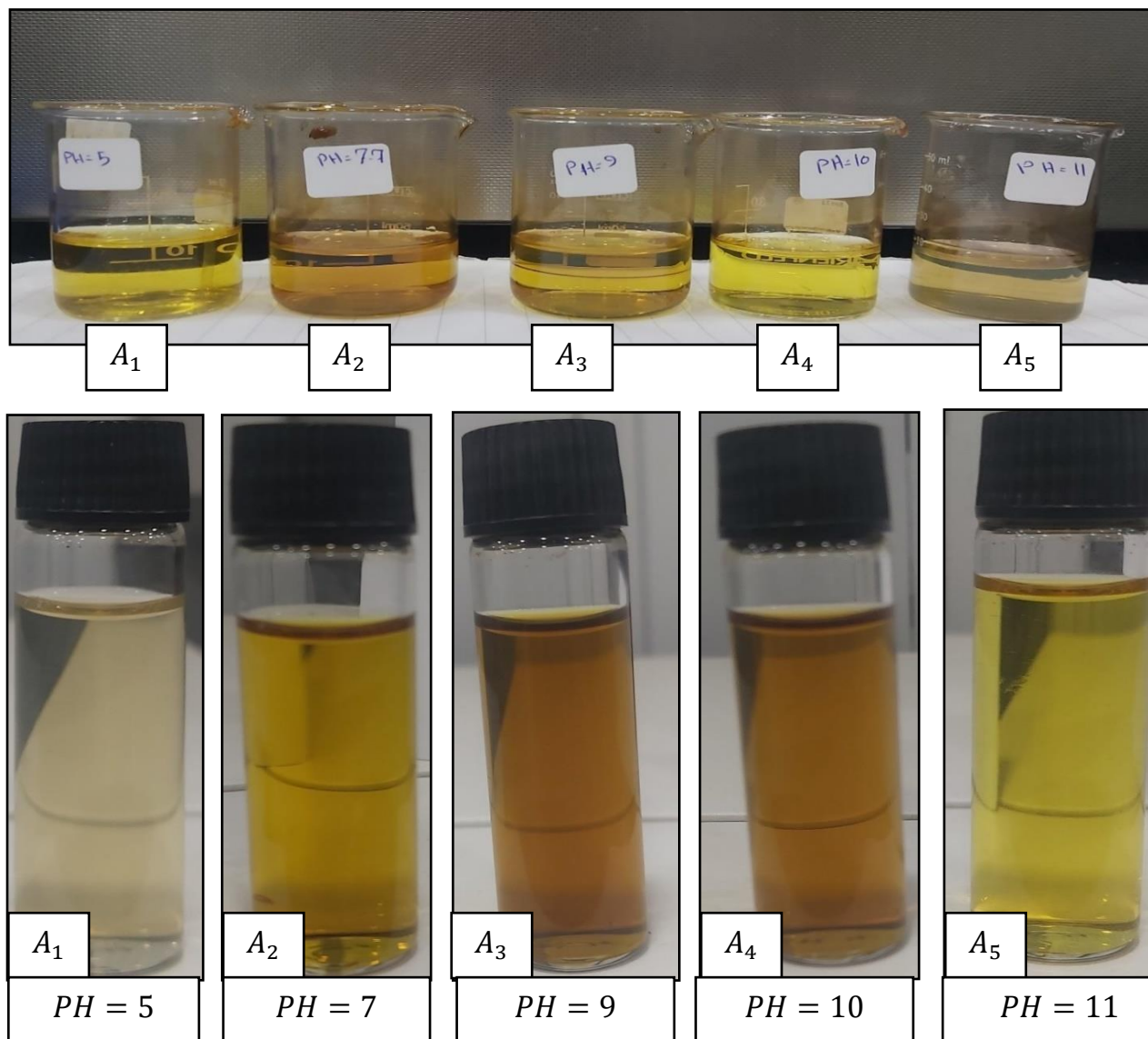
A5: في هذه التجربة، تم إضافة المستخلص المحضر إلى محلول نترات الفضة بنسبة 10:2 ، ومن ثم تم

إضافة الأمونيا (NH₄OH) بحجم 800µl ليصبح (pH) المحلول النهائي 11 .

ويوضح الشكل (3-4) تغير لون محلول الفضة الغروية بتغير PH المحلول.

جدول (3-4): تغيرات PH المحلول بتغير تركيز حجم الامونيا المضافة.

رمز التجربة	حجم الأمونيا المضافة µl	PH المحلول النهائي
A1	400	5
A2	500	7
A3	600	9
A4	700	10
A5	800	11



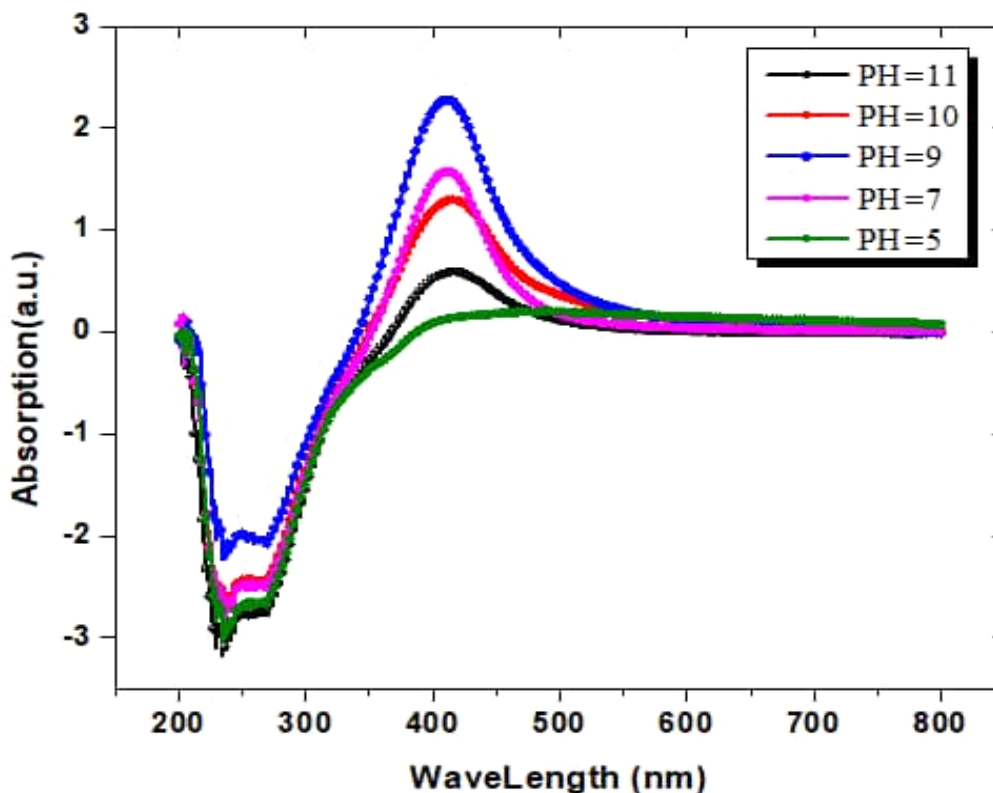
شكل (3-4): صورة للعينات المحضرة عند PH مختلف PH=5 : A1 ، PH=7 : A2 ، PH=9 : A3 ، PH=10 : A4 ، PH=11 : A5 وذلك بعد تمديد العينات بالماء المقطر بنسبة 3mL:120μl

لتوضيح تأثير تغير pH المحلول، تمت بدراسة طيف الامتصاصية الضوئية في المجال المرئي وفوق البنفسجي

للينة على جهاز التحليل الطيفي في مجال الأشعة المرئية وفوق البنفسجية Spectrometer UV-VIS

حيث كانت نسبة التمديد $3 \text{ mL} : 40 \mu\text{L}$ (ماء مقطر : المحلول المحضر). تظهر منحنيات الامتصاص في الشكل (3-5) وجود قمة مميزة عند الطول الموجي 400 نانومتر وهي قمة مميزة للفضة. ظهرت أعلى شدة لقمة التفاعل البلازموني السطحي (SPR) عند العينة A1 ذات $\text{pH}=9$ والتي تظهر باللون الأزرق على المخطط، مما يدل على استمرار عملية الارجاع وزيادة نسبة الجسيمات النانوية المتشكلة مع الزمن بسبب وجود المواد العضوية في العينة (لأن العينة لم تغسل بعد).

أما العينة A1 ذات $\text{pH}=5$ فقد ظهرت قمة SPR بشدة منخفضة مقارنة بباقي العينات، وكانت القمة أعرض، مما يعبر عن تشكل جسيمات بأبعاد مختلفة وعدم تجانسها ضمن المحلول. توضح هذه النتائج أن تغير قيمة pH المحلول تؤثر بشكل مباشر على تجانس وأبعاد الجسيمات النانوية.



شكل (3-5): طيف الامتصاصية الضوئية في المجال المرئي وفوق البنفسجي لعينة الفضة النانوية المحضرة عند قيم مختلفة من pH حيث نسبة التمديد $3 \text{ mL} : 40 \mu\text{L}$ (ماء مقطر : المحلول المحضر).

رابعاً: غسيل الفضة النانوية وتنقيتها:

يتم غسيل الفضة النانوية وتنقيتها بعد مرور 24 ساعة من تحضيرها، حيث يتم إزالة المواد العضوية المتبقية الناتجة عن المستخلص النباتي المستخدم، بالإضافة إلى التخلص من الشوارد الزائدة لأيونات الفضة التي لم تخضع للاختزال. تتم عملية فصل الجسيمات النانوية بواسطة جهاز الطرد المركزي عند سرعة دوران 9500 دورة بالدقيقة لمدة 9 دقائق حيث تزال الرشاحة الطافية. بعد ذلك، يعاد تعليق الراسب باستخدام حمام الموجات فوق الصوتية لفترة قصيرة، بهدف تفكيك التكتلات وإزالة المواد العضوية الملتصقة بالجسيمات. تكرر عملية الغسل أربع مرات باستخدام ماء مقطر (خال من الشوارد)، يليها غسل مرة واحدة باستخدام الإيثانول لضمان التخلص التام من أي بقايا مواد قد تؤثر على نقاء الجسيمات النانوية المحضرة. يمكن الحصول على الفضة النانوية بشكلين إما معلق غروي أو بودرة، في البحث الحالي تستخدم الفضة النانوية كمعلق غروي حيث تحفظ العينات في مكان مظلم. يوضح الشكل (3-6) الجهاز الطرد المركزي المستخدم للحصول على رشاحة طافية.



شكل (3-6): جهاز الطرد المركزي (المثقلة)

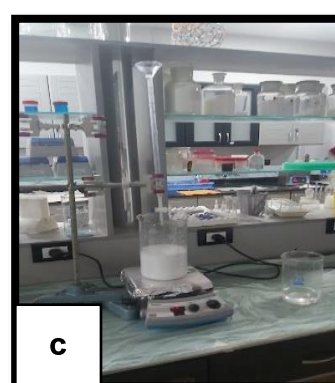
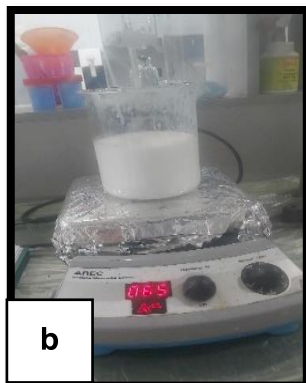
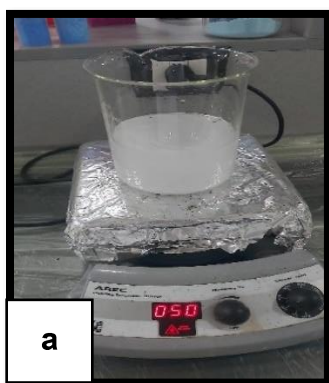
2.2.3 تحضير أكسيد الزنك النانوي:

تم تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO-NPs) باستخدام طريقة السول-جل في مختبر النانو بكلية العلوم - جامعة دمشق.

تم تحضير المحلول الأول من أسيتات الزنك (40g) والايثانول (450) ml حرك المزيج عند درجة حرارة 60 درجة مئوية لمدة نصف ساعة حتى تمام الانحلال.

تم تحضير المحلول الثاني من حمض الاكسيليك (33g) والايثانول (150) ml حرك المزيج عند درجة حرارة 50 درجة مئوية لمدة نصف ساعة.

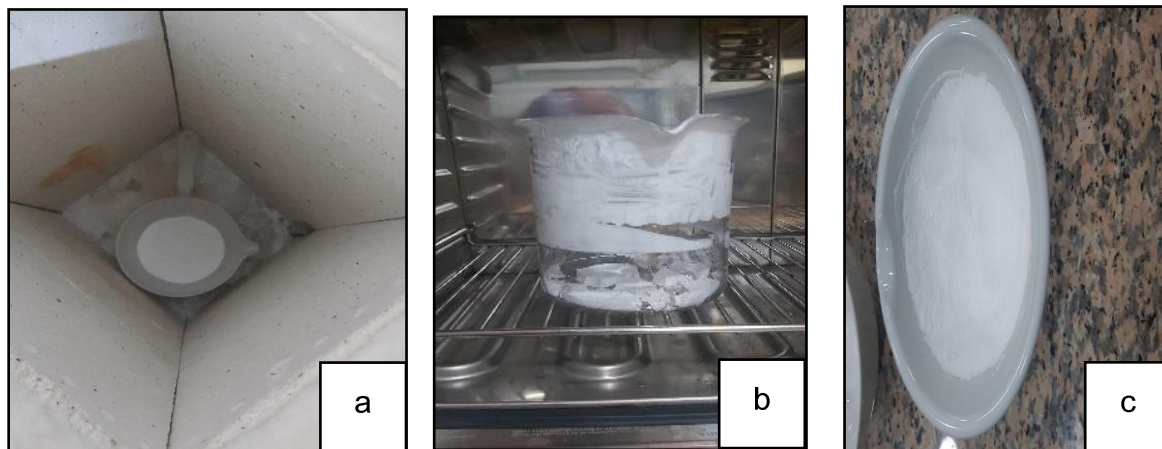
تمت اضافة المحلول الثاني إلى المحلول الأول ببطء باستخدام سحاحة وحرك بدرجة حرارة 50 درجة مئوية لمدة ساعتين حتى يتكون الهلام (gel) كما هو موضح بالشكل (3-7).



شكل (3-7): تحضير أكسيد الزنك النانوي a: محلول أسيتات الزنك والايثانول b : محلول حمض الاكسيليك والايثانول c: إضافة المحلول b إلى المحلول a بواسطة سحاحة بالتقريب البطيء

وضع المحلول في المجففة عند درجة حرارة 70 درجة مئوية لمدة 24 ساعة ثم نقل إلى الفرن عند درجة حرارة 600 درجة مئوية لمدة 4 ساعات. تم طحن المنتج النهائي جيداً باستخدام مطحنة كرات وتخزينه في

حافظات بلاستيكية متخصصة مقاومة للرطوبة حتى يتم استخدامه لاحقاً. ويوضح الشكل (3-8) العينة بعد التجفيف والتكليس في الفرن والطحن.



شكل (3-8): تحضير مسحوق أكسيد الزنك النانوي a: عينة أكسيد الزنك النانوي بعد التجفيف لمدة 24 ساعة b: العينة في الفرن لمدة 4 ساعات c: عينة أكسيد الزنك النانوي بعد الطحن في مطحنة الكرات. حضرت تراكيز مختلفة من معلق أكسيد الزنك الغروي عن طريق إضافة الماء منزوع الأيونات إلى مسحوق أكسيد الزنك النانوي المحضر. عرض المحلول للأمواج فوق الصوتية لضمان انتشار المادة النانوية ضمن المحلول.

3.3 توصيف المواد النانوية:

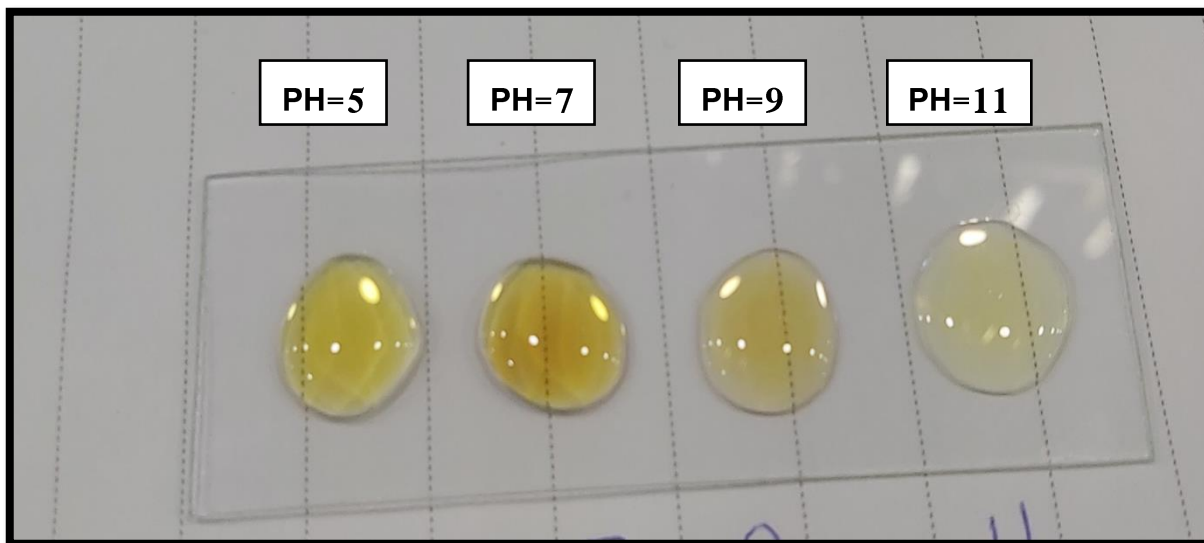
1.3.3 توصيف الفضة النانوية:

تم توصيف جسيمات الفضة النانوية باستخدام (مجهر القوة الذرية AFM والمجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثي FE-SEM، وتركيز المادة المحضرة بواسطة مطيافية الامتصاص الذري AAS).

1.1.3.3 توصيف الفضة النانوية باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM):

لتوصيف عينات الفضة النانوية الغروية المحضرة بواسطة AFM تم تحضير الشرائح الزجاجية حيث نظفت هذه الشرائح في الميثانول لمدة 5 دقائق في جهاز Ultrasonic، ثم كررت العملية في الماء المنزوع

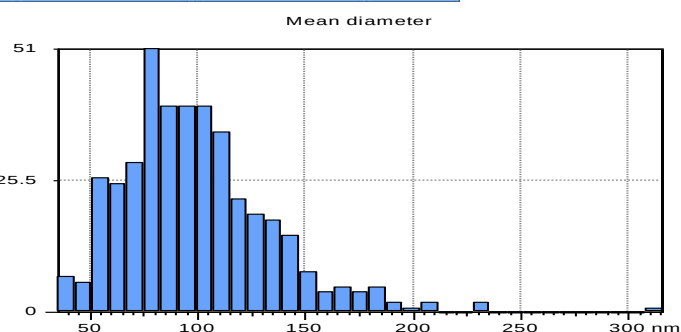
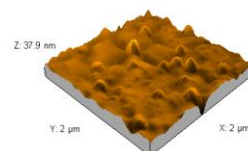
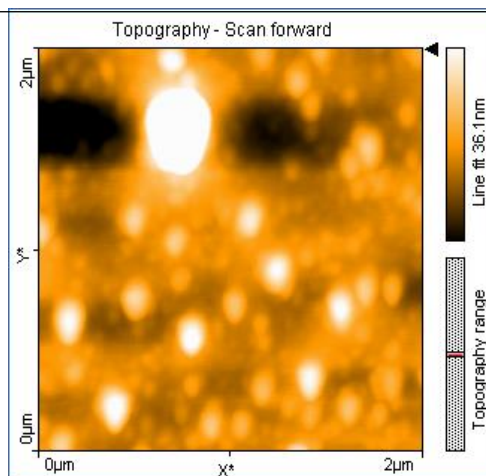
الشوارد (DI Water) أيضاً لمدة خمس دقائق في Ultrasonic ، وفي الأخير جففت لمدة نصف ساعة في فرن التجفيف. وضعت بعض قطرات بتركيز مختلفة على شرائح زجاجية كما في الشكل (3-9) ثم جففت هذه الشرائح في الهواء.



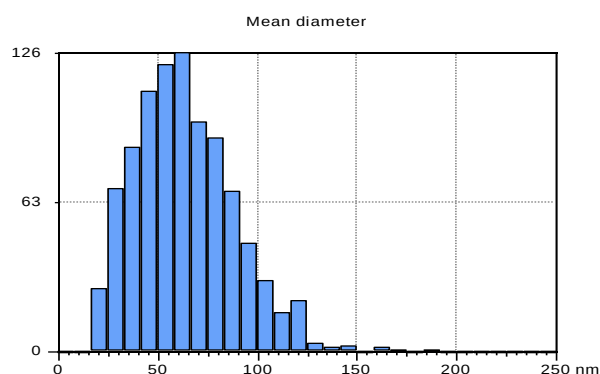
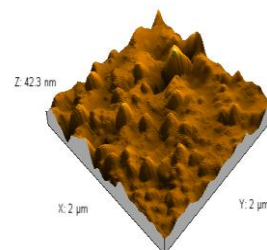
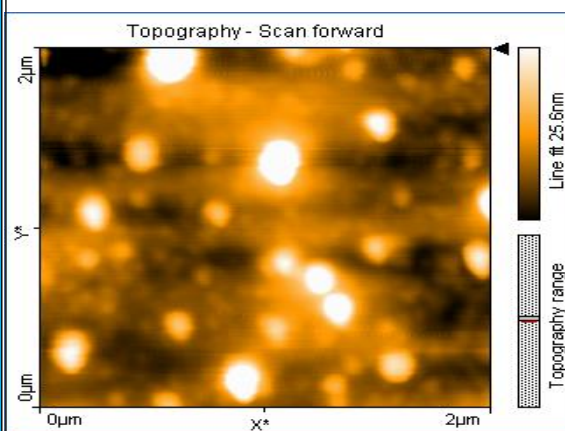
شكل (3-9) : شريحة زجاجية تم تحضيرها وتتوضع عليها عينات فضة نانوية غروية مختلفة بقيم الـ PH

أُستخدم النمط الديناميكي أو نمط عدم الاتصال في مجهر القوة الذرية، تكون القوة المتبادلة بين المجس وسطح العينة محكومة بشكل رئيسي بقوة فاندرفالس (van der Waals) التي تسيطر ضمن مسافات تتراوح بين 1 إلى 10 نانومتر فوق سطح العينة . تم الحصول على صور ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد بمقاس $(2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m})$ لعينات فضة نانوية غروية محضرة بقيم مختلفة لدرجة الحموضة (PH) ، كما هو موضح في الشكل (3-10) .

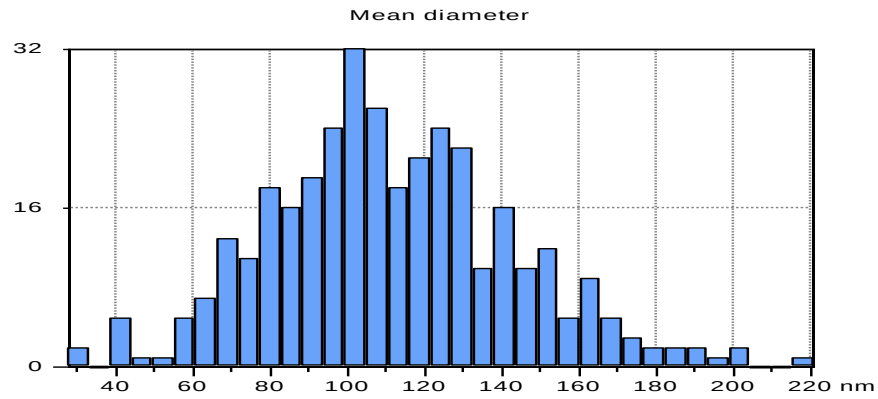
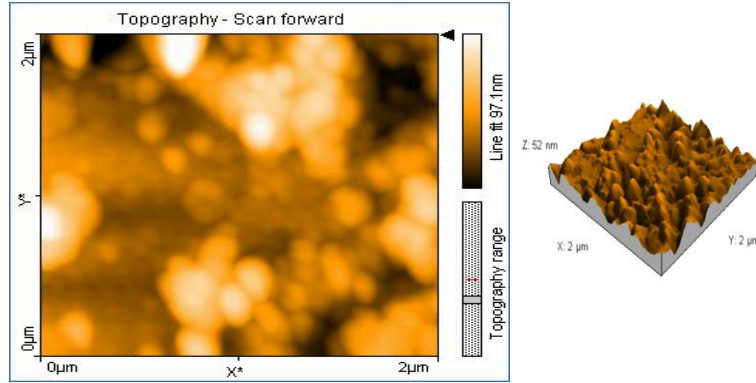
PH=7



PH=9



PH=11



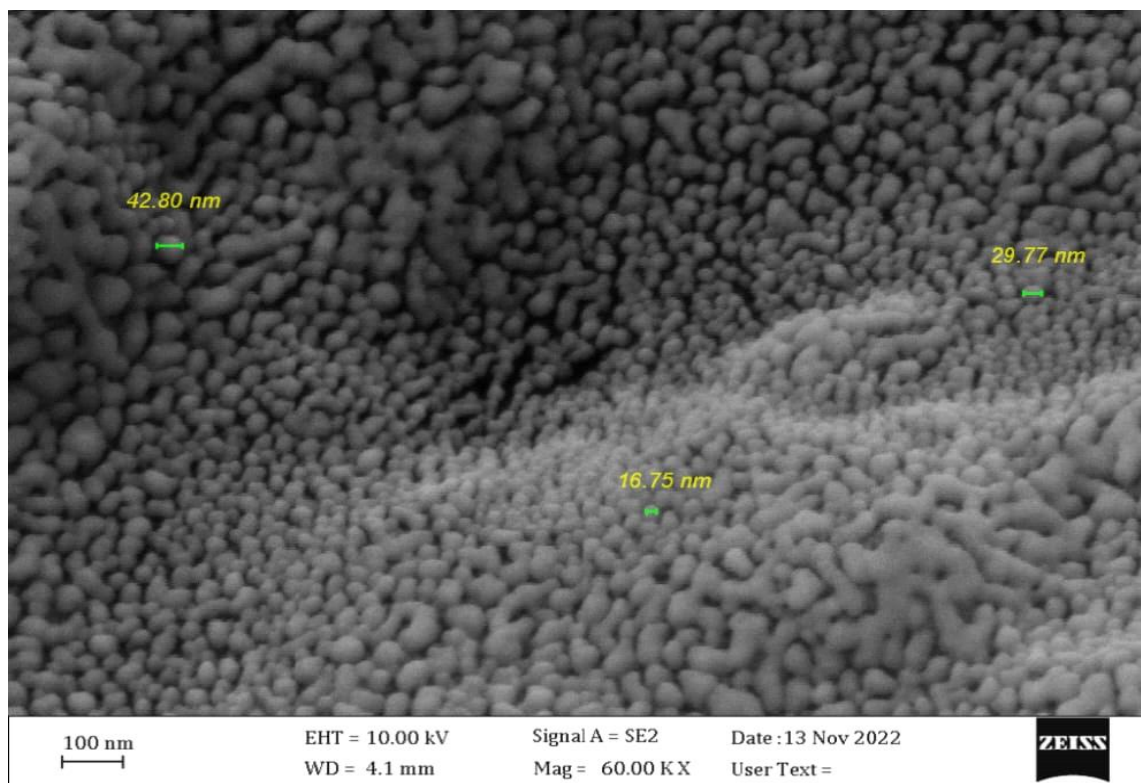
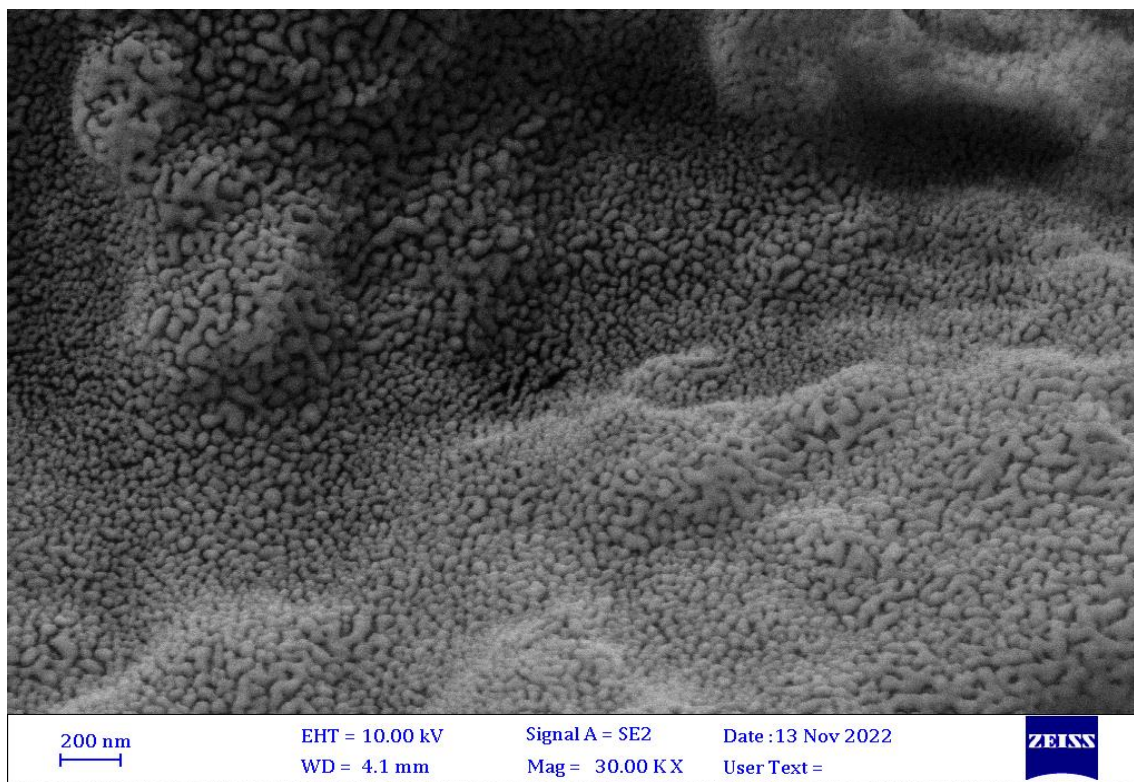
شكل (10-3): صور المجهر الإلكتروني الماسح والتي توضح شكل وأبعاد جسيمات الفضة النانوية

تبين الصور وجود حبيبات كروية الشكل بكثافة العالية وأبعاد نانوية متجانسة حيث تراوحت هذه الأبعاد (60-100nm) ويوضح التوزيع الاحصائي لأقطار حبيبات الفضة النانوية المحضرة أن أفضل توزيع متجانس من حيث الشكل والأبعاد كان عند (pH = 9).

ويوضح الشكل (10-3) منحنيات التوزيع الاحصائي لأقطار حبيبات الجسيمات النانوية المحضرة عند قيم PH مختلفة حيث يصل متوسط الأقطار عند PH=9 إلى 60 نانومتر تقريباً .

توصيف القضة النانوية بالمجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحقلي (FE-SEM):

لتوضيح أبعاد جسيمات القضة النانوية الغروية المحضرة وتوزع أبعادها تم أخذ صور بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحقلي (FE-SEM) بنسب تكبير مختلفة (60kx) (30kx) حيث يتضح أن الشكل كروي والحبيبات متجانسة تماماً وبمتوسط قطر 30 نانومتر كما هو موضح بالشكل (3-11) تتوافق الأبعاد الصغيرة والمتجانسة لجسيمات القضة النانوية المقاسة باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (FE-SEM) مع النتائج التي تم الحصول عليها من خلال قياس ذروة رنين البلازمون السطحي (SPR) الضيقة في طيف الامتصاصية الضوئية في المجال المرئي وفوق البنفسجي والموضح بالشكل (3-5).



شكل (3-11): صور المجهر الإلكتروني الماسح والتي توضح شكل وأبعاد جسيمات الفضة النانوية

2.1.3.3 توصيف الفضة النانوية باستخدام مطيافية الامتصاص الذري AAS :

تم حساب تركيز الفضة النانوية الغروية بطريقتين الطريقة الأولى: باستخدام مطيافية الامتصاص الذري حيث تم قياس تركيز عنصر الفضة في عينة الفضة النانوية الغروية المحضرة باستخدام جهاز AAS ، ومقارنته مع النتيجة الوزنية حيث تبين أن تركيز الفضة النانوية في المعلق $1600 \frac{mg}{L}$ وذلك بهدف تحديد التراكيز المثلى عند الدراسة الحيوية. يوضح الشكل (3-12) عينة الفضة النانوية الغروية المحضرة للقياس.



شكل (3-12): عينة الفضة النانوية الغروية بعد تخفيفها بمعدل 1000 مرة قبل القياس.

الطريقة الثانية: طريقة الشرائح الوزنية وذلك بهدف المقارنة مع الطريقة الأولى. عن طريق ترسيب بضعة قطرات من الفضة النانوية الغروية المحضرة بواسطة ميكروبيب على شريحة زجاجية نظيفة، وفق الإجراءات التالية:

1. تجفيف الشريحة

2. وزن الشريحة قبل وبعد التحميل

يتم قياس وزن الشريحة بدقة عالية قبل التحميل، ثم بعد الترسيب والتجفيف. الفرق بين الوزنين يمثل كمية الفضة النانوية المترسبة من الحجم المعلوم للمحلول.

3. حساب التركيز

يستخدم الفرق الوزني لحساب تركيز الفضة النانوية في المحلول الأصلي وفق الصيغة التالية:

$$\text{تركيز الفضة النانوية} \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{\text{الفرق الوزني}}{\text{حجم المحلول}} \times \text{المأخوذ } L$$

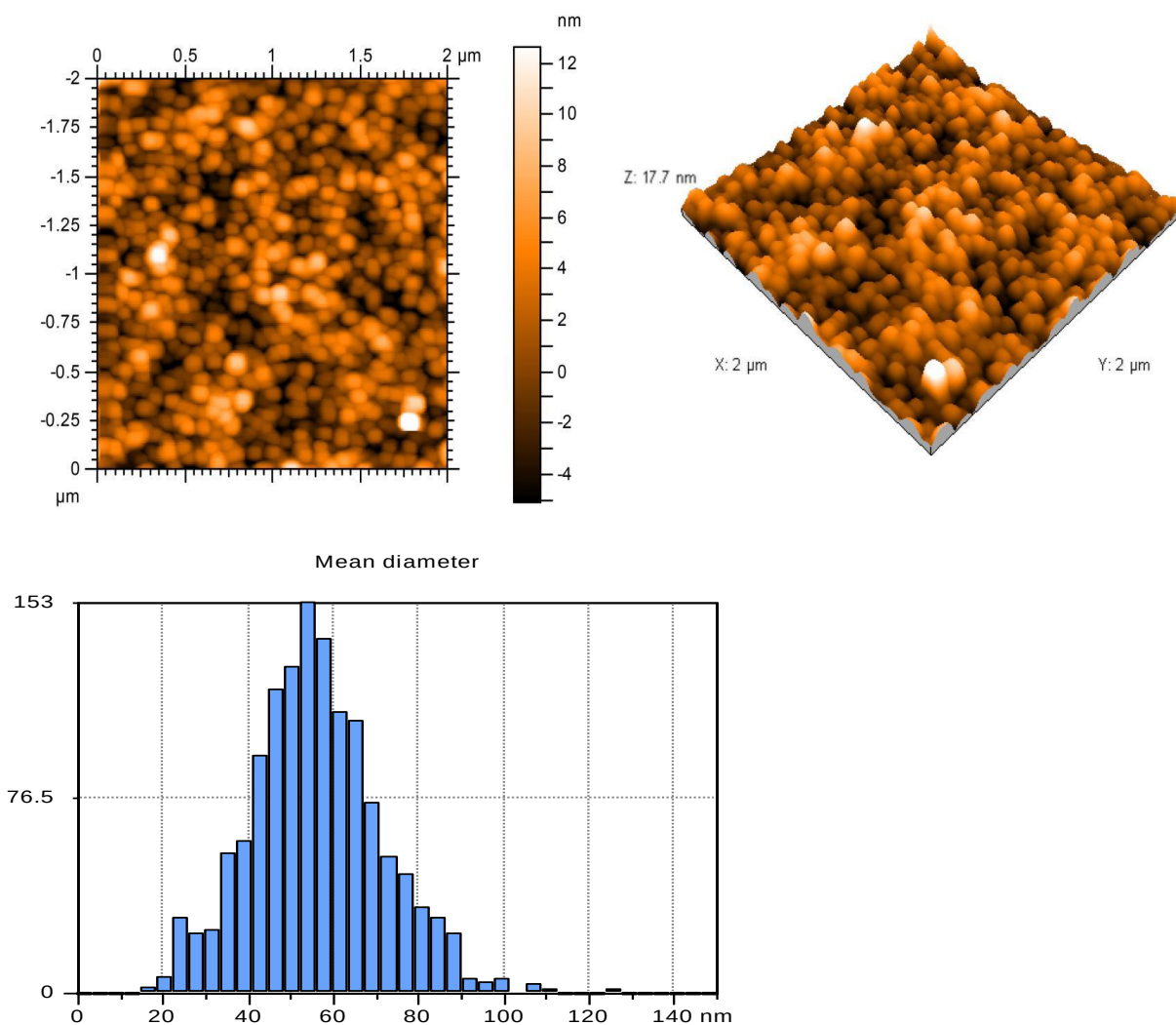
أظهرت الحسابات نتائج مقاربة مع نتائج اختبار AAS.

2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي:

وصفت طبوغرافيا السطح لأكسيد الزنك النانوي باستخدام مجهر القوة الذرية AFM والمجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحقلي FE-SEM والروابط الكيميائية بواسطة مطيافية الأشعة تحت الحمراء FTIR، والتركيب البلوري بواسطة انعراج الأشعة السينية XRD والتحليل العنصري بواسطة مطيافية تشتت طاقة الأشعة السينية EDX .

1.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي باستخدام مجهر القوة الذرية (AFM) :

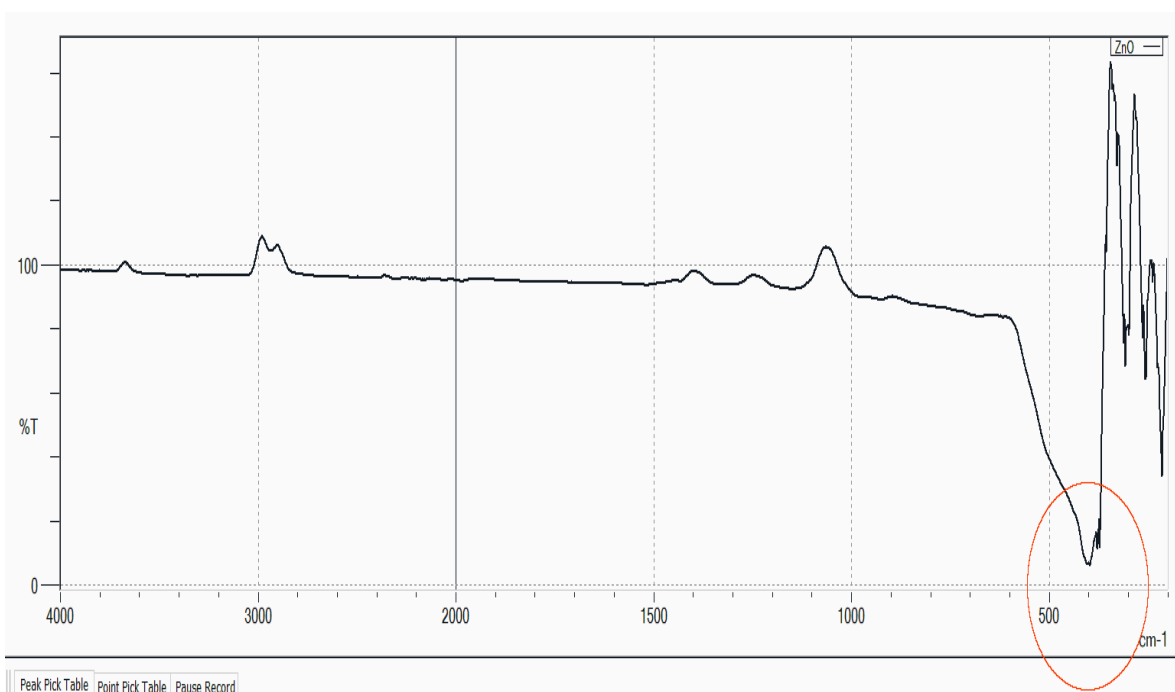
يظهر الشكل (3-13) صور مجهر القوة الذرية (AFM) ثنائية وثلاثية الأبعاد ($2\mu m \times 2\mu m$) وتوزع الأبعاد لجسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضرة والتي تأخذ شكلاً كروياً ومتجانساً في الأبعاد، حيث بلغت الكثافة (8.18×10^{10} grains/cm²) وبمتوسط قطر 54nm .



شكل (3-13): صور مجهر القوة الذرية (AFM) ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد، وتوزيع حجم جسيمات أكسيد الزنك النانوية التي تم تصنيعها باستخدام طريقة السول-جيل

2.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي باستخدام تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR):

تم تحليل جسيمات أكسيد الزنك النانوي باستخدام FTIR حيث يظهر الشكل (3-14) تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء لمسحوق أكسيد الزنك النانوية المصنعة والتي لدنت عند درجة حرارة 600 درجة مئوية لمدة 4 ساعات بهدف إزالة الرطوبة من العينة وذلك في مجال ترددات من 200cm^{-1} إلى 4000cm^{-1} ويتضح من الطيف وجود قمة امتصاص واسعة عند العدد الموجي 400 cm^{-1} والتي تنسب إلى اهتزاز التمدد لرابطة Zn-O والتي تتوافق مع الدراسات المرجعية السابقة (Shamhari et al., 2018) وتشير القمة عند 1400 cm^{-1} إلى وجود $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ المرتبط بأوضاع انحناء CH_3 المشابهة للنتيجة التيتم الحصول عليها من المرجع (Shamhari et al., 2018).



شكل (3-14): طيف FTIR لعينة أكسيد الزنك النانوي

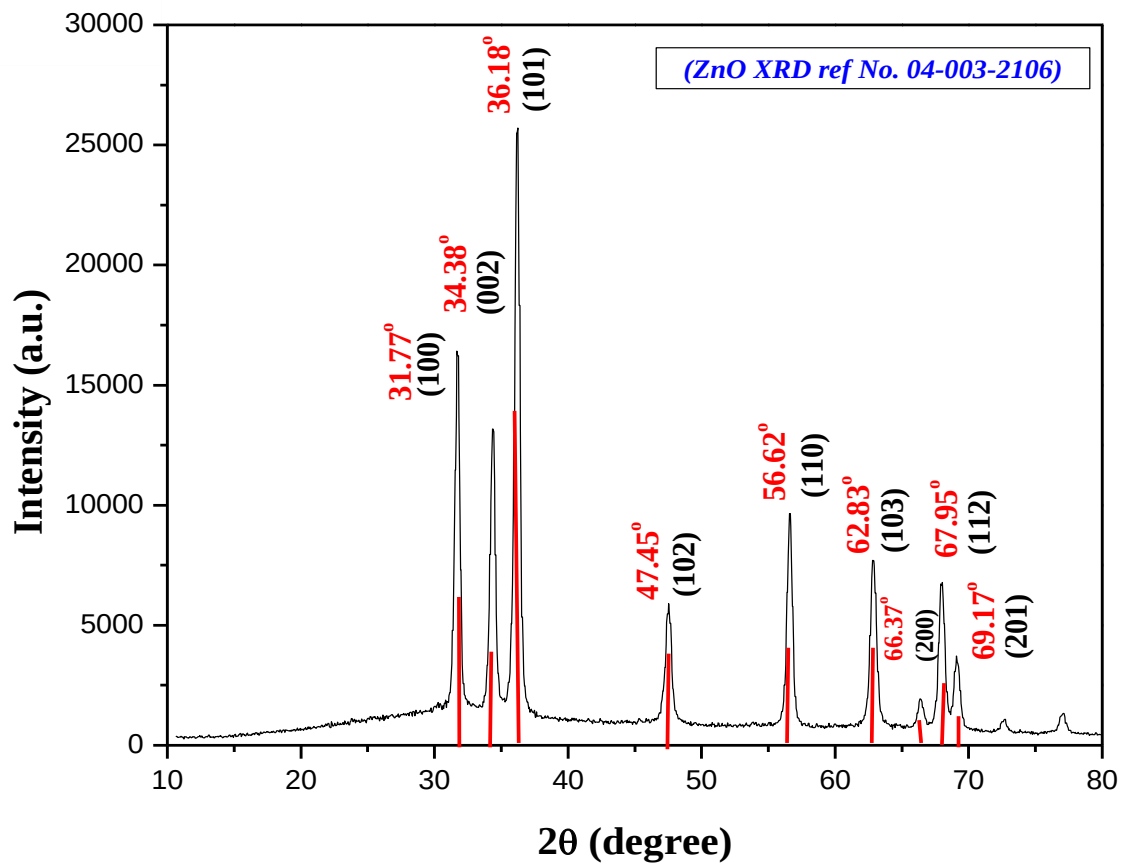
3.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي باستخدام تحليل الانعراج بالأشعة السينية (XRD):

تم إجراء تحليل انعراج الأشعة السينية (X-ray diffraction patterns) لتأكيد الطابع البلوري لجسيمات أكسيد الزنك النانوية. تم تسجيل الطيف في مجال من 10° إلى 80° كما هو موضح في الشكل (3-15). لوحظت ظهور تسع قمم بارزة عند الزوايا 31.77° ، 34.38° ، 36.18° ، 47.45° ، 56.62° ، 62.83° ، 66.37° ، 67.95° و 69.17° ، والتي تتوافق مع مستويات بلورية (100)، (002)، (101)، (102)، (110)، (103)، (200)، (112)، و (201) على التوالي. تشير النتائج إلى أن الجسيمات النانوية لأكسيد الزنك متبلورة وذات طابع تبلو بطور (wurtzite) سداسي الشكل، وهو ما يتوافق مع بطاقة JCPDS برقم 04-003-2106 (Choi et al., 2022) (Wu et al., 2016)

تم حساب متوسط أبعاد البلورات لجسيمات ZnO (D) باستخدام معادلة شيرير (Mendes et al., 2022):

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4)$$

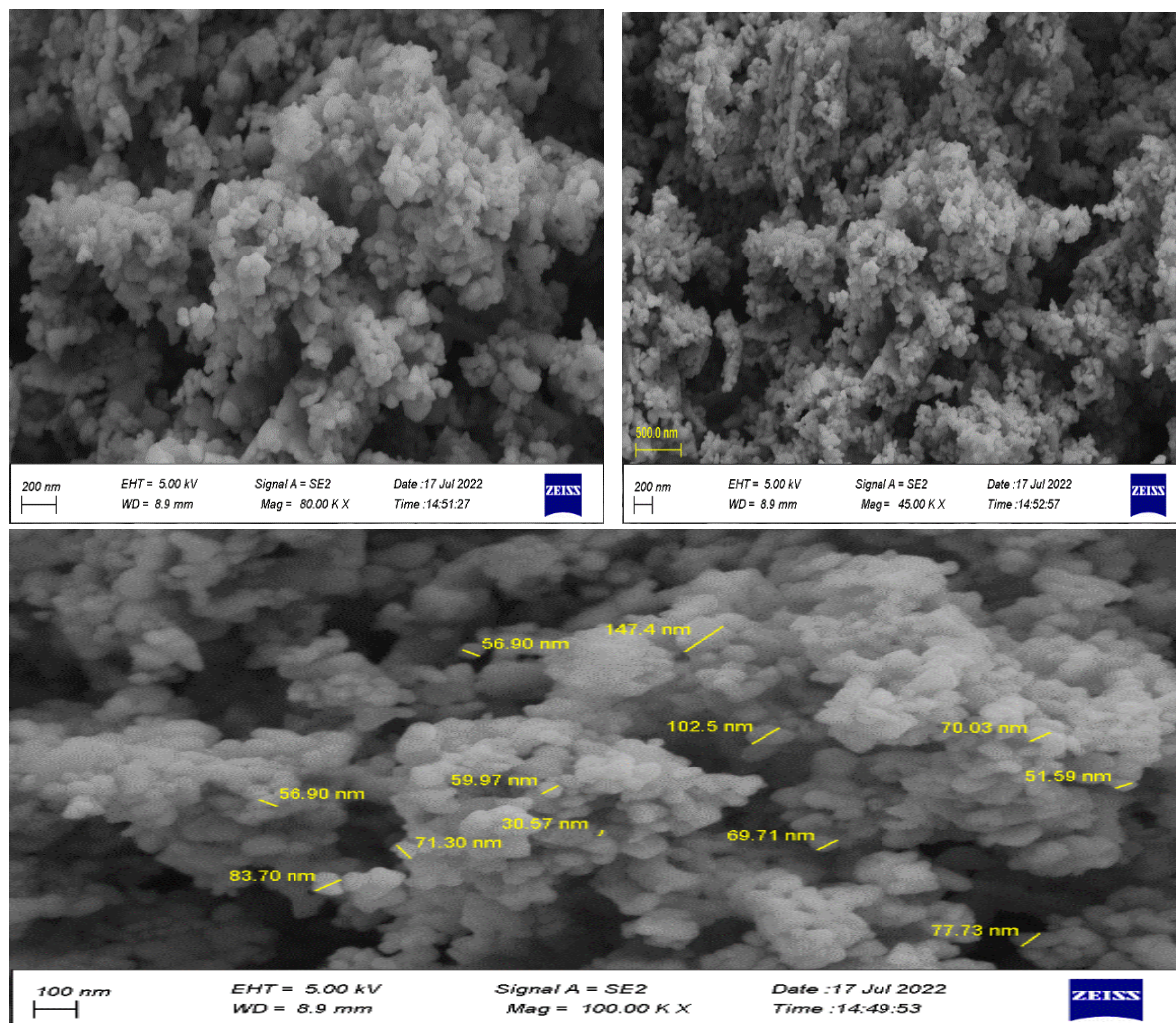
حيث K هو ثابت شيرير = 0.9، λ هو طول موجة إشعاع Cu K α (1.54) انغستروم، θ هو زاوية انعراج براغ، و β هو منتصف عرض شدة قمة. وجد أن متوسط أبعاد البلورات للجسيمات النانوية المصنعة من ZnO بلغت 37 نانومتر.



شكل (3-15): طيف انعراج الأشعة السينية لجسيمات أكسيد الزنك (ZnO) النانوية مع رقم الكرت المرجعي الموافق

4.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي بالمجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي (FE-SEM) :

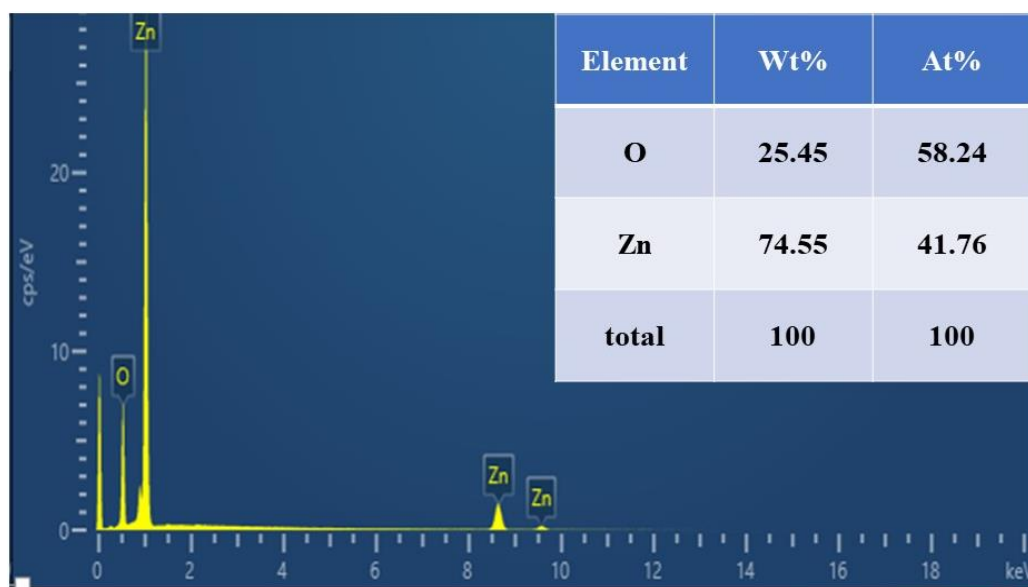
تم إجراء تحليل المجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي (FE-SEM) لتحديد شكل وأبعاد هذه الجسيمات كما هو موضح موضحة في الشكل (3-16) حيث ظهرت جسيمات أكسيد الزنك النانوي بشكل كروي متجانس عند قيم تكبير مختلف (45kx-80kx-100kx) وبمتوسط قطر 70.6 nm بعد استبعاد الحبيبات الكبيرة من القياس حيث لوحظ أن المختبر أغفل الحبيبات الصغيرة من القياس .



شكل (3-16): صور المجهر الإلكتروني الماسح FE-SEM والتي توضح حبيبات أكسيد الزنك النانوي بقيم تكبير مختلفة (45kx-80kx-100kx)

5.2.3.3 توصيف أكسيد الزنك النانوي باستخدام تحليل مطيافية تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX):

تم استخدام تحليل العنصري بمطيافية تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) لتحديد التركيب العنصري والنسب الستيكومترية لجسيمات أكسيد الزنك النانوية التي تم تحضيرها بواسطة طريقة السول-جيل. يوضح الطيف المعروض في الشكل (3-17) وجود قمم خاصة لكل من الزنك والأكسجين بنسب وزنية 74.55% و 25.45% للأكسجين على التوالي، مما يؤكد النجاح بتحضير المادة بنقاوة عالية. عزز نتائج تحليل EDX النتائج الأخرى مثل انعراج الأشعة السينية (XRD) والمجهر الإلكتروني الماسح ذو الانبعاث الحثلي (FE-SEM)



شكل (3-17): التركيب العنصري بواسطة مطيافية تشتت الأشعة السينية (EDX) لجسيمات النانوية لأكسيد الزنك النانوية التي تم تحضيرها باستخدام طريقة السول-جيل مع جدول لنسب تلك العناصر. أظهرت قياسات الـ XRD أصغر قيم لقطر جسيمات أكسيد الزنك النانوي وتعتبر قياسات جهاز التحليل الطيفي حيود الأشعة السينية (XRD) دقيقة في حساب حجم البلورات لأن التحليل مبني على نمط حيود الأشعة الذي يعكس الترتيب الذري داخل الجسيمات. هذه القياسات أقل تأثراً بتجمع الجسيمات أو حالة السطح. بينما

AFM و SEM يعتمدان على تصوير سطحي، وقد تتأثر القياسات بتجمع الجسيمات، خشونة السطح، تحضير العينة، والظروف البيئية، مما قد يزيد الأبعاد الظاهرة.

4.3 تحضير وتوصيف راتنج الفلورو كربون السداسي C6-Fluorocarbon resin :

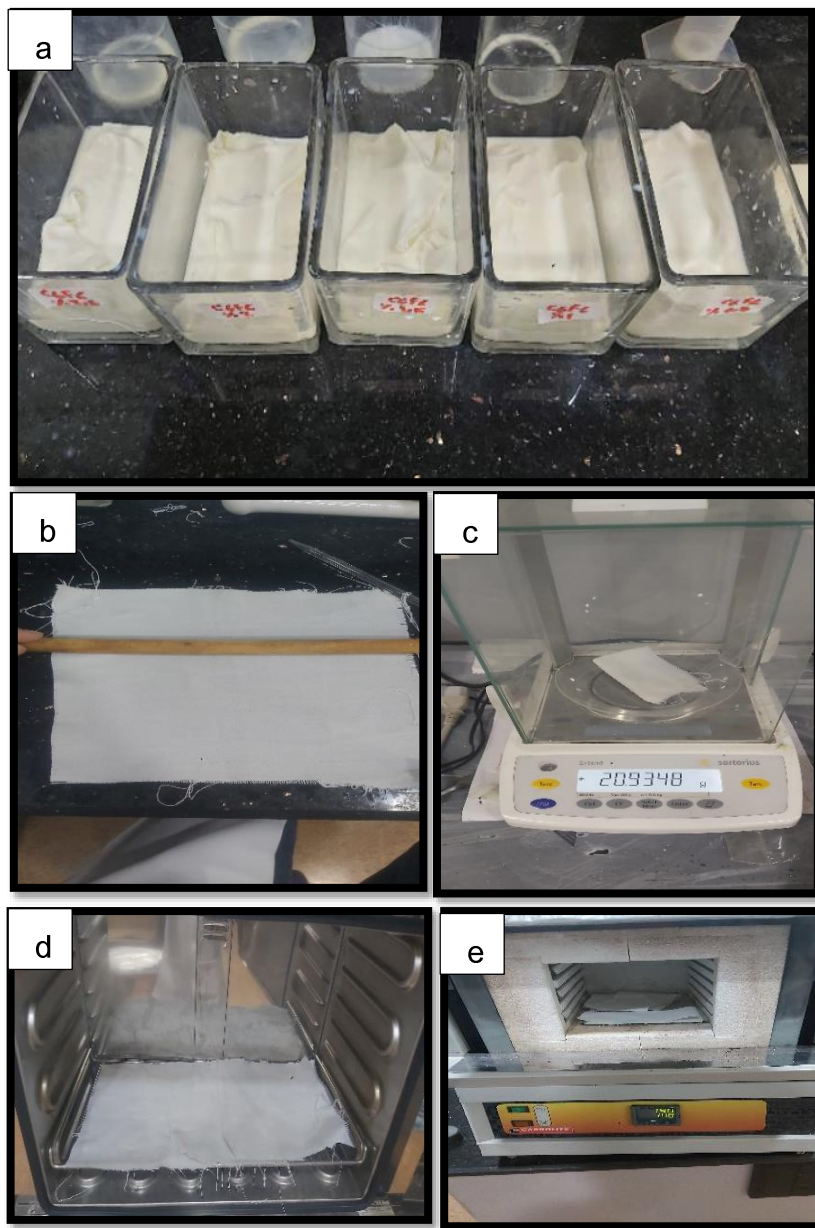
المادة المستخدمة في الدراسة كمادة طاردة للماء هي الفلورو كربون C_6 مادة راتنج تحتوي على بوليميرات متفرعة هيكلية الشكل تحيط بها مادة هيدروكربونية بحيث تشكل مصفوفة، خالية من الكاتيونيك وحمض البيرفلوروكتانويك (PFOA) وحمض السلفونيك البيرفلوروكتاني (PFOS) والكيل فينول إيثوكسيلا (APEO) وتستخدم كعامل محسن بيئياً طارد للماء والزيت والتربة للأقمشة بجميع أنواع الألياف .

1.4.3 أمثلة تركيز راتنج الفلورو كربون السداسي:

تم أمثلة تركيز راتنج الفلورو كربون السداسي بمعالجة ثلاث عينات لأقمشة قطنية موصفة بالجدول (2-3) بطريقة (غمر - تجفيف - معالجة حرارية) لتحسين مقاومتها للماء وذلك باستخدام مركب فلورو كربون السداسي C6-Fluorocarbon resin (FC) كسائل معالجة نهائية وبتراكيز مختلفة (5-10-15-20-25) غ/ل تم تحليل عينات القماش باستخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء FTIR واختبار انسدادية القماش ونفاذية الماء إضافةً إلى قياس زاوية التماس.

1.1.4.3 تحضير وتوصيف عينات القماش المدروسة:

حضرت عينات القماش القطني المبيضة بواسطة طريقة (غمر - تجفيف - معالجة حرارية) حيث تم تحضير خمسة عشر عينة بأبعاد $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ وحملت المادة الطاردة للماء على القماش بالتراكيز (20-25-15-10-5) غ/ل وطُبق عصر ميكانيكي بواسطة قضيب خشبي بنسبة تشريب 80% ومن ثم جففت العينات في المجففة بدرجة حرارة 80 درجة مئوية لمدة 20 دقيقة ثم تم تثبيتها حرارياً في الفرن بدرجة حرارة 140 درجة مئوية لمدة 5 دقائق. ويظهر الشكل (3-18) طريقة تحضير عينات القماش المدروسة.



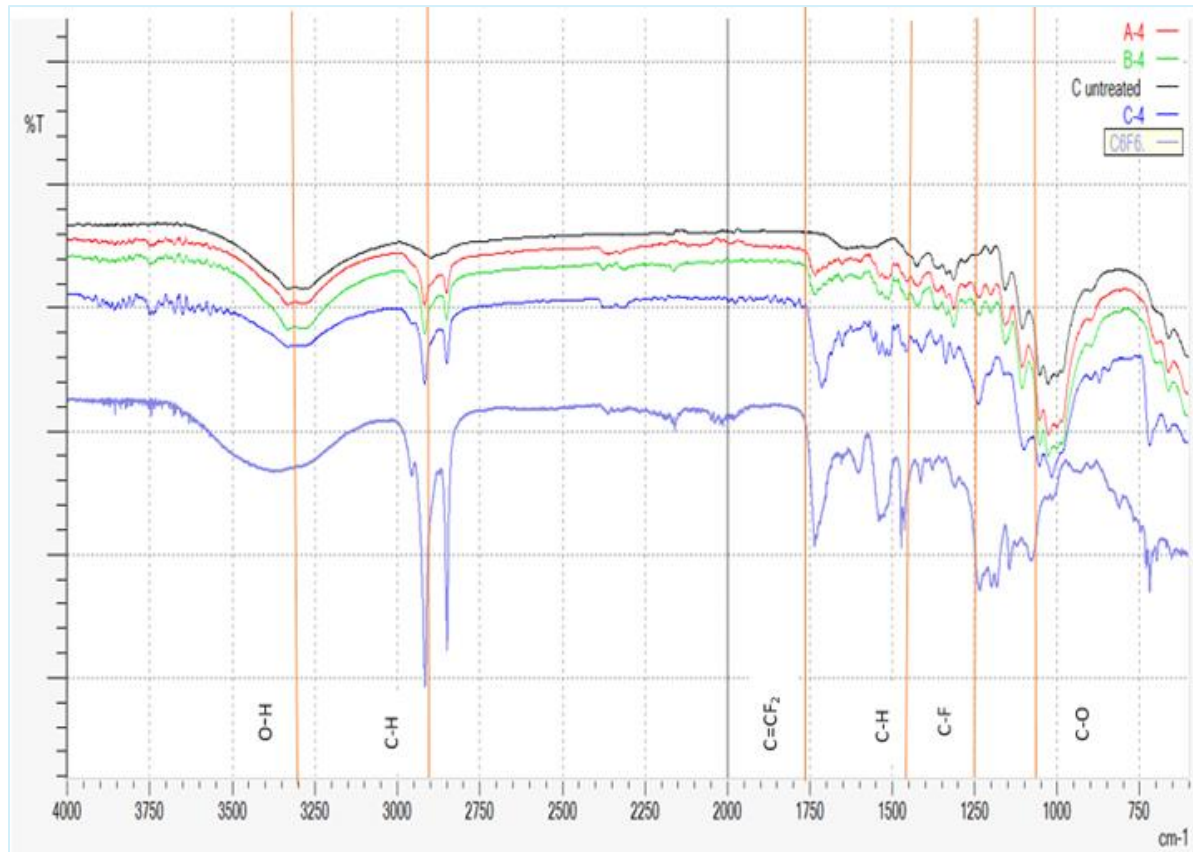
شكل (3-18): طريقة تحضير عينات القماش: (a) غمر العينات بتركيزات مختلفة من الفلوروكربون عند التراكيز (5-10-15-20-25g/L) ، (b) عصر العينات (c) وزن العينات لحساب نسب التشريب (d) تجفيف العينات (f) معالجة حرارية في الفرن.

2.1.4.3 الاختبارات العملية للعينات المعالجة:

توصيف عينات القماش المعالجة:

تم توصيف عينات القماش المعالجة بالفلوروكربون C_6F_6 باستخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء FTIR يظهر الشكل (3-19) أطياف FTIR للقطن المبيض غير المعالج ذروة واسعة عند 3300cm^{-1} قد يشير هذا إلى اهتزاز تمدد OH مجموعات هيدروكسيل السليلوز في المنطقة ($3100-3600\text{cm}^{-1}$) كما تظهر أطياف النسيج القطني غير المعالج أيضاً قمماً مميزة نموذجية عند 1450cm^{-1} و 2900cm^{-1} ، والتي قد تكون عبارة عن أشرطة ثني وتمدد C-H على التوالي .ظهر المجال بين $1500-800\text{cm}^{-1}$ بسبب وجود اهتزازات C-H ، O-H ، و C-O والتي تمثل بصمة السليلوز ، بالنسبة لعينات القماش C4 ، B4 ، A4 المعالجة بـ FC-resin ظهرت ذروة امتصاص عند 1235cm^{-1} ترتبط بمجموعات CF_3, CF, CF_2 والتي تدل على وجود المركبات الفلورية على سطح القماش. كذلك تمثل الذروة عند 1750cm^{-1} الروابط الثنائية غير المشبعة $C=CF_2$ ويعتقد أن هذه النتوءات تشير إلى تكوين روابط cross-linked تم تحويل الطول الموجي 3331cm^{-1} من نسيج القطن المبيض إلى أرقام موجية عالية قليلاً من الأقمشة القطنية المعالجة بـ FC- resin ، مما يشير إلى تكوين رابطة هيدروجينية بين الجزيئات .أظهرت جميع العينات تحول عند الذروة البالغة 2900cm^{-1} من نسيج القطن المبيض إلى ذروتين في الأقمشة المعالجة بـ FC- resin تماثل الذروتين في مركب C_6F_6 . تم أيضاً ظهور ذروة عند 1750cm^{-1} بعد معالجة عينات القطن الثلاث بـ FC- resin. تثبت هذه التغييرات أن FC resin تم ربطه بنجاح بنسيج القطن. يوضح الشكل (3-19) FTIR للينة A المعالجة بـ C_6F_6 عند التركيز 20g/l باللون الأحمر ، وللينة B المعالجة بـ C_6F_6 عند التركيز 20g/l باللون الأخضر ، وللينة C المعالجة بـ C_6F_6 عند التركيز 20g/l باللون الأزرق ، ولينة

القطن غير المعالج باللون الأسود ولعينة FC resin ولعين FC resin باللون السماوي (He & Liu, 2021).



شكل (3-19): أطياف FTIR للعينات قطن غير معالج، عينات القطن المعالج A,B,C عند

التركيز 20g/L ولمادة المعالجة الطاردة للماء C_6F_6

تمَّ حساب وزن المتر المربع لجميع العينات المدروسة ومقارنتها مع العينة المرجعية (غير المعالجة) كما في الجدول (3-5). حيث تم تجفيف العينات حتى ثبات الحجم ووزنها باستخدام ميزان الكتروني دقيق.

قُدِّر وزن المتر المربع بـ $غ/م^2$ للعينات المدروسة (A-B-C) المعالجة بتركيزات مختلفة لكل عينة (5-10)

(25-20-15) وفق المواصفة القياسية (33.2002) ASTM- D 3776-96 حيث يتم وزن العينة قبل

المعالجة بـ C_6F_6 وبعد المعالجة.

بمقارنة وزن المتر المربع للقماش المعالج مع القماش غير المعالج وجدَّ أنَّ وزن المتر المربع من القماش المعالج يزداد مع زيادة تركيز C_6F_6 حيث يزداد وزن المتر المربع للقماش بنسبة تتراوح (0.5-2%) بازدياد تركيز الفلوروكربون ويعزى ذلك نتيجة التغطية الكيميائية للألياف مسببة زيادة في وزن القماش، ويلاحظ أن وزن المتر المربع للعينتين A,C متماثل تقريباً قبل المعالجة وبعد المعالجة بسبب تقارب الكثافات ونمر الخيوط.

جدول (3-5): وزن المتر مربع للعينات المعالجة بـ C_6F_6 بتركيز مختلفة

العينة	وزن المتر مربع للعينة A (غ/م ²)	نسبة الزيادة (%)	وزن المتر مربع للعينة B (غ/م ²)	نسبة الزيادة (%)	وزن المتر مربع للعينة C (غ/م ²)	نسبة الزيادة (%)
غير معالج	241	-	265	-	247	-
معالج بـ C_6F_6 بتركيز (5 غ/ل)	243	2	265.4	0.4	248.2	1.2
معالج بـ C_6F_6 بتركيز (10 غ/ل)	245.5	2.5	268.3	2.9	250.9	1.7
معالج بـ C_6F_6 بتركيز (15 غ/ل)	250.8	5.3	271.9	3.6	253.6	2.7
معالج بـ C_6F_6 بتركيز (20 غ/ل)	256	5.2	276.2	4.3	257.1	3.5
معالج بـ C_6F_6 بتركيز (25 غ/ل)	259.9	3.9	281.4	5.2	262.3	5.2

ولتوضيح العلاقة بين تركيز مادة المعالجة C_6F_6 ووزن عينات القماش المعالجة يظهر الشكل (3-20) زيادة وزن المتر المربع لعينات القماش المعالجة مقارنة بعينات القماش غير المعالج وزيادة وزن المتر المربع لعينات القماش الثلاث بزيادة تركيز الفلوروكربون C_6F_6 .



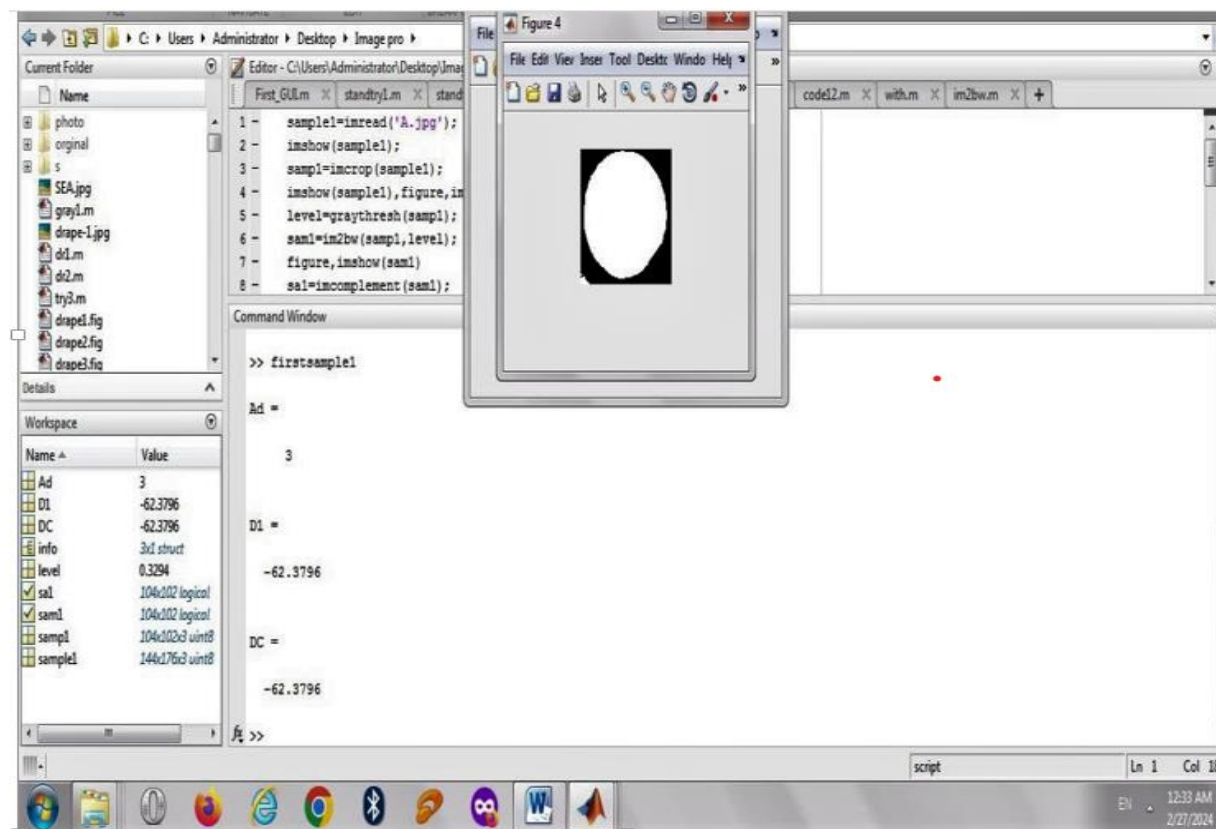
شكل (3-20): العلاقة بين تركيز مادة المعالجة C_6F_6 ووزن عينات القماش المعالجة

اختبار انسدادية القماش:

يستخدم هذا الاختبار لحساب مدى انثناء النسيج عندما يسمح له بالتعليق تحت وزنه وحساب معامل الانسداد للعينات المدروسة بالتراكيز المختلفة وفق المواصفة القياسية (BS5058:1973) وذلك لإيضاح تأثير تغير تركيز المادة الطاردة للماء على انسدادية القماش. بعد إجراء اختبار الانسدادية للقماش المعالج وغير المعالج

عولجت صور العينات على برنامج الماتلاب MATLAB 2012a وقدرت مساحتها بوحدة البيكسل كما هو

مبين بالشكل (21-3).



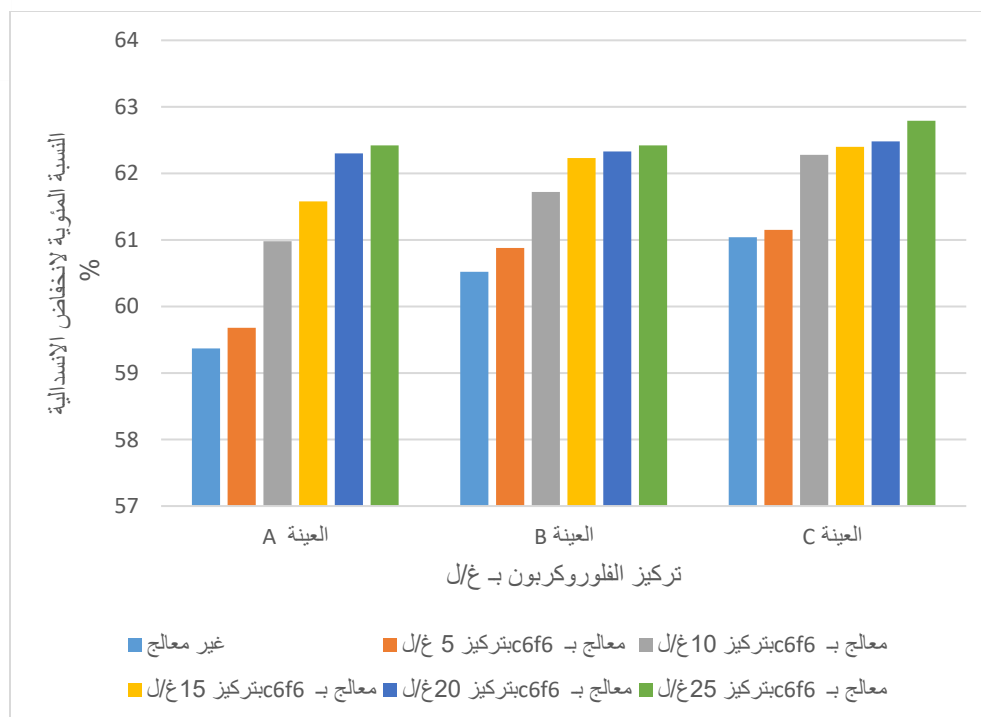
شكل (21-3): صور برنامج الماتلاب لحساب انسدالية القماش

وأدرجت نتائج الانسدالية لجميع العينات في الجدول (6-3) حيث يظهر أن النسبة المئوية لانسدال القماش بالنسبة للعينات (A-B-C) قبل وبعد المعالجة كانت ضمن المجال (30-85%) بحسب المواصفة القياسية (BS5058:1973) بالتالي لم تتأثر انسيابية الأقمشة عند معالجتها بالمحلول الطارد للماء ونلاحظ تناقص في قيمة انسدالية القماش مع زيادة تركيز مادة المعالجة.

جدول (3-6): النسبة المئوية لانسداد عينات القماش (A-B-C) المعالجة بـ C_6F_6 وفق التراكيز
غ/ل (5-10-15-20-25)

العينة	العينة A	العينة B	العينة C
%	%	%	%
غير معالج	59.37	60.52	61.04
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 5 غ/ل	59.68	60.88	61.15
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 10 غ/ل	60.98	61.72	62.28
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 15 غ/ل	61.58	62.23	62.4
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 20 غ/ل	62.3	62.33	62.48
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 25 غ/ل	62.42	62.42	62.79

يظهر المخطط الموضح بالشكل (3-22) انخفاض قيمة انسدادية القماش للعينات المعالجة مع زيادة تركيز مادة الفلوروكربون حيث تغلف المادة البوليميرية الليف ومع زيادة تركيزها تزداد سماكة الطبقة المغلفة لليف وتقل مرونته ويلاحظ أن نسبة انخفاض الانسدادية في العينات (A-C) أكبر من مما هو مقاس في العينة B ويعود ذلك إلى أن كثافة الخيوط في العينات (A-C) أكبر من كثافة الخيوط في العينة B. مع الإشارة إلى أن تناقص قيمة الانسدادية للأقمشة تبقى ضمن الحد المقبول عند جميع التراكيز.



شكل (3-22): مخطط العلاقة بين النسبة المئوية لانخفاض الانسدالية مع تغير تراكيز الفلوروكربون (10-5) (15-20-25g/L) لعينات القماش المدروسة (A-B-C).

اختبار نفاذية الماء :

تم هذا الاختبار على جهاز نفاذية الماء SDL Atls ، وهو أحد الاختبارات المستخدمة لقياس مقاومة

النسيج لترطيب سطحه دون اختراق الماء للسطح، ويحدد مدى مقاومة القماش للماء وفق المواصفة

AATCC الطريقة 22:2005.

جدول (3-7): معدل نفاذية الأقمشة للماء وفق المواصفة القياسية AATCC 22 - 2005:22

المواصفة القياسية AATCC-22	النتائج
AATCC 100	100: عدم التصاق أو ترطيب للسطح العلوي
AATCC 90	90: التصاق أو ترطيب طفيف للسطح العلوي
AATCC 80	80: ترطيب للسطح العلوي في نقاط الرش
AATCC 70	70: ترطيب جزئي إلى ترطيب كامل للسطح العلوي
AATCC 50	50: ترطيب كامل للسطح العلوي
AATCC 0	0: ترطيب كامل للسطح العلوي والسفلي

نلاحظ من القيم المدرجة بالجدول (3-8) أن العينات (A-B-C) تظهر ترطيباً تاماً للسطح العلوي والسفلي قبل المعالجة بينما لم يحدث فيها التصاق أو ترطيب للسطح عند التراكيز (15-20-25) غ/ل حيث يبدي القماش طرداً جيداً للماء وأن العينة B أظهرت التصاقاً أو ترطيباً طفيفاً عند التراكيز (5-10) غ/ل بينما أظهرت العينات (A-C) التصاقاً عند التركيز 5 غ/ل فقط نظراً لكثافتها العالية، ويعزى ذلك إلى أن المعالجة النهائية للقماش بالمواد الطاردة للماء تقلل من الطاقة الحرة لسطوح الألياف ولكون قوة الالتصاق بين الألياف وقطرة الماء أقل من قوة التماسك الداخلية للماء وهذا يتوافق مع الدراسات المرجعية (Dr. Williams, 2018) (Charles Tomasino, 1979).

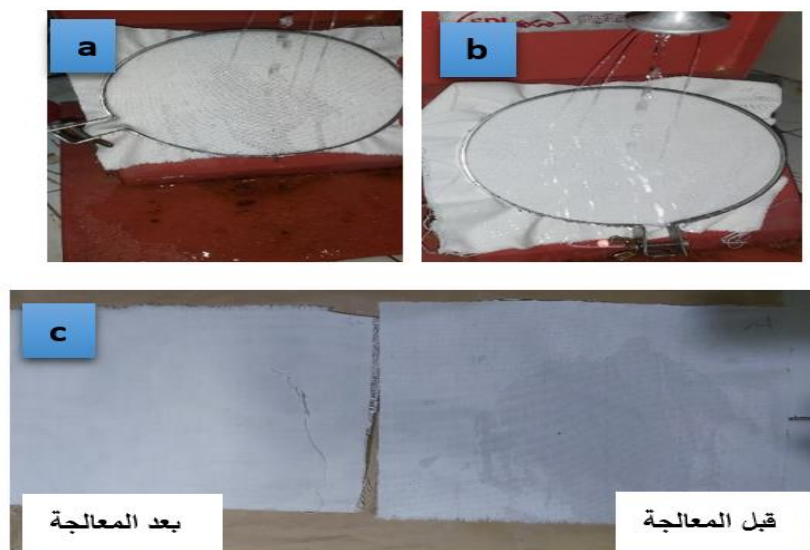
جدول (3-8): نتائج اختبار نفاذية الماء للعينات غير المعالجة والعينات المعالجة وفق التراكيز المدروسة.

اختبار الرش	العينة A	العينة B	العينة C
غير معالج	0	0	0
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 5 غ/ل	90	90	90
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 10 غ/ل	100	90	100
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 15 غ/ل	100	100	100
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 20 غ/ل	100	100	100
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 25 غ/ل	100	100	100

يظهر الشكل (3-23) عينة القماش A قبل المعالجة (a) حيث تبدي بللاً تاماً لسطح القماش وعينة القماش

بعد المعالجة (b) تبدي طرداً تاماً للماء وعدم التصاق الماء على السطح النسيجي و(c) مقارنة بين القماش

قبل المعالجة والقماش بعد المعالجة بـ C_6F_6



شكل (3-23): a اختبار نفاذية الماء: عينة قماش A قبل المعالجة على

جهاز نفاذية الماء. b: العينة A بعد معالجتها بـ C_6F_6

c: مقارنة بين عيّنتين A قبل وبعد المعالجة.

يظهر الشكل (3-24) عينة القماش B قبل المعالجة (a) حيث تبدي بللاً تاماً لسطح القماش وعينة القماش بعد المعالجة (b) تبدي طرداً تاماً للماء وعدم التصاق الماء على السطح النسيجي و(c) مقارنة بين القماش قبل المعالجة والقماش بعد المعالجة بـ C_6F_6



شكل (3-24): اختبار نفاذية الماء a: عينة قماش B قبل المعالجة على جهاز نفاذية الماء. b: العينة B بعد معالجتها بـ C_6F_6 c: مقارنة بين عينتين B قبل وبعد المعالجة.

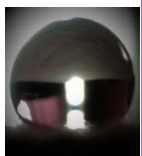
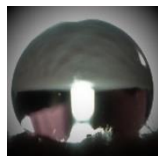
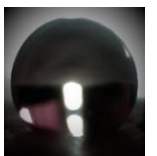
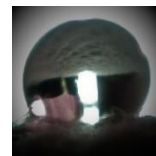
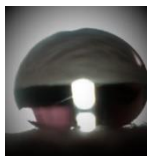
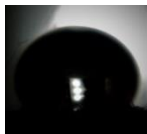
نستنتج أن الأقمشة المعالجة بالفلوروكربون C_6F_6 تظهر طرداً تاماً للماء وعدم التصاق على السطح النسيجي وذلك بسبب انخفاض طاقة السطح للأقمشة المعالجة بحيث يصبح التوتر السطحي للقماش المعالج أصغر من التوتر السطحي لقطرة الماء فتأخذ شكلاً كروياً وتتدحرج على سطح القماش المعالج.

اختبار زاوية تماس قطرة الماء لعينات القماش:

قيست زاوية التماس بين قطرة الماء و سطح القماش عن طريق أخذ صورة للقطرة السائلة بعد توضعها على سطح القماش بواسطة مايكروسكوب ضوئي (Micro Capture 2.5) ومن ثم عولجت الصور بواسطة برنامج (Image j)، حيث أن قياس زاوية التماس يعطي فكرة عن قابلية السطح للترطيب فإذا كانت قيمة زاوية التماس تتراوح بين $^{\circ} (90-180)$ فإن قطرة الماء سوف تتدحرج على السطح النسيجي، أما إذا كانت قيمة زاوية التماس تتراوح بين $^{\circ} (0-90)$ عندئذ يكون السطح محب للماء وقابل للتبلل.

يظهر الشكل (3-25) صور توضع قطرة الماء على السطح النسيجي للعينات المدروسة عند التراكيز

المختلفة لـ C_6F_6 .

العينة	تركيز C_6F_6 (غ/ل)5	تركيز C_6F_6 (غ/ل)10	تركيز C_6F_6 (غ/ل)15	تركيز C_6F_6 (غ/ل)20	تركيز C_6F_6 (غ/ل)25
A	A1 	A2 	A3 	A4 	A5 
B	B1 	B2 	B3 	B4 	B5 
C	C1 	C2 	C3 	C4 	C5 

شكل (3-25): صور توضع قطرة الماء على السطح النسيجي وزاوية التماس بين قطرة الماء و سطح القماش للعينات (A-B-C)

وبتحليل الصور بواسطة برنامج (Image j) قُيست زوايا التماس بين قطرة الماء وسطح عينات القماش المعالج بالفلوروكربون وأدرجت بالجدول (9-3) .

جدول (9-3) زوايا التماس بين قطرة الماء وسطح عينات القماش المعالج بالفلوروكربون عند التراكيز المختلفة.

قياس زاوية التماس	عينة A°	عينة B°	عينة C°
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 5 (غ/ل)	°145.636	°141.393	°141.627
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 10 (غ/ل)	°154.798	°143.022	°148.841
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 15 (غ/ل)	°156.047	°143.632	°155.709
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 20 (غ/ل)	°156.801	°151.258	°159.044
معالج بـ C_6F_6 بتركيز 25 (غ/ل)	145.182°	°145.928	°155.015

النتيجة:

تعد زاوية تماس الماء مؤشراً لكراهية السطح النسيجي للماء لأنها تقيس انتشار قطرة السائل على السطح. عند دمج عوامل مؤكسدة أو مجموعات قابلة للتأين مع سطح ألياف القطن، فسوف يصبح السطح أكثر حبا للماء، وبالتالي سوف تنتشر قطرة الماء على السطح بسهولة وتصبح زاوية انكماش الماء أصغر. من ناحية أخرى، عند دمج الهيدروكربونات مع الألياف، يصبح السطح أكثر كراهية للماء وتصبح زاوية انكماش الماء أكبر. نلاحظ من القيم المدرجة في الجدول (9-3) أن زاوية التماس العظمى كانت 159° لعينات القماش C المعالج بتركيز 20 غ/ل من C_6F_6 ولوحظ تناقصاً في قيمة زاوية التماس 155° عند زيادة التركيز إلى 25 غ/ل للعينة C.

ويعود ذلك إلى أنه عند زيادة تركيز السائل الطارد للماء من 5 غ/ل إلى 20 غ/ل تزداد زاوية التماس بين الماء والقماش القطني ثم تعود لتتناقص عند التركيز 25 غ/ل وفقاً لوضع الحالة الانتقالية Cassie-Wenzel، حيث يفترض وينزل اتصال تام لقطرة السائل مع السطح الصلب بينما يفترض كاسي باكستر أن التماس غير متجانس حيث أن السائل غير متصل بشكل تام مع السطح الصلب، حيث يكون في حالة تماس مع جيب الهواء المحصور بين النتوءات السطحية ومع هذه النتوءات (Derek Heywood, 2003).

وتعتمد حالة القطرة الملامسة للقماش على الفرق بين زاوية التماس لحالة Wenzel وحالة Cassie-Baxter، حيث يمكن التحول من نموذج كاسي إلى نموذج Wenzel تحت تأثير محفزات خارجية منها الضغط والاهتزازات وجاذبية القطرة (X. Wang et al., 2022). ويعتبر التركيز 20 غ/ل تركيزاً حدياً يظهر عنده القماش خشونة سطحية عالية في حين تقل تلك الخشونة عند التركيز 25 غ/ل بسبب تشكل طبقة متجانسة من C_6F_6 على سطح القماش القطني والانتقال إلى نموذج Wenzel للتطبيب (I. Khan et al., 2023). (Bormashenko et al., 2007).

أبدت العينات المعالجة طرداً جيداً للماء، حيث أن العينة B تبدي التصاقاً أو ترطيباً طفيفاً عند التراكيز (5-10) غ/ل بينما العينات (A-C) عند التركيز 5 غ/ل تظهر ترطيباً طفيفاً نظراً لأن كثافتها أعلى، ويعود ذلك إلى أن المعالجة النهائية للقماش بالمواد الطاردة للماء تقلل من الطاقة الحرة لسطوح الألياف ولكون قوة الالتصاق بين الألياف وقطرة الماء أقل من قوة التماسك الداخلية للماء، حيث أن مادة C6-Fluorocarbon Resin تخفض الطاقة السطحية للقماش وتعطيه خواص طرد للماء إلا أن اختلاف الكثافات يؤدي إلى اختلاف تضاريس السطح النسيجي وبالتالي خشونة السطح مما يعطي خصائص طرد أفضل للأقمشة ذات الكثافة الأعلى عند نفس التركيز لمادة المعالجة، في اختبار القطرة السائلة زاوية التماس العظمى كانت 159° لعينات

القماش C ذات الكثافة الأعلى باتجاه السداء واللحمة والمعالجة بتركيز 20 غ/ل والذي يعتبر تركيزاً حدياً يظهر عنده القماش خشونة سطحية عالية.

5.3 تحضير وتوصيف عينات القماش المعالجة بالمادة النانوية وراتنج الفلورو كربون السداسي:

يوضح الجدول (3-10) مواصفات عينات القماش المدروس والذي يستخدم كغطاء سرير مشفى، العينات مبيضة وتم الحصول عليها من شركة العربية المتحدة للصناعة (الدبس).

جدول (3-10): مواصفات عينات القماش المدروس

المادة الأولية	نمرة السداء (Ne)	نمرة الحدف (Ne)	كثافة السداء (Yarn/cm)	كثافة الحدف (Yarn/cm)	التركيب النسجي	وزن مربع g/m ²
قطن 100%	30/2	30/2	34	22	مبرد 3/1	246

1.5.3 تحضير وتوصيف عينات القماش المعدلة بمركب الفضة النانوية وراتنج الفلورو كربون السداسي



أولاً: تحضير عينات القماش المعدلة بمركب الفضة النانوية وراتنج الفلورو كربون السداسي $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$:

لإكساب الأقمشة القطنية خصائص طاردة للماء ومضادة للجراثيم، تم اعتماد طريقة (Pad-Dry-Cure) التي

تعتمد على معالجة الأقمشة القطنية المبيضة بمركب من الفضة النانوية الغروية مع راتنج فلورو كربون C_6F_6

باتباع إجراء دقيق كما في الشكل (3-26).

بدايةً، تمت إضافة كميات مختلفة من محلول الفضة النانوية الغروية المحضر بتركيز $\frac{1600 \text{ mg}}{\text{L}}$ إلى

محلول C_6F_6 المحضر بتركيز 20 غ/ل لتحضير محاليل غمس مختلفة بتركيز Ag (-100-75-50

200-300ppm). خضع كل مركب محضر لتحريك المغناطيسي لمدة 5 دقائق لضمان التجانس الكامل

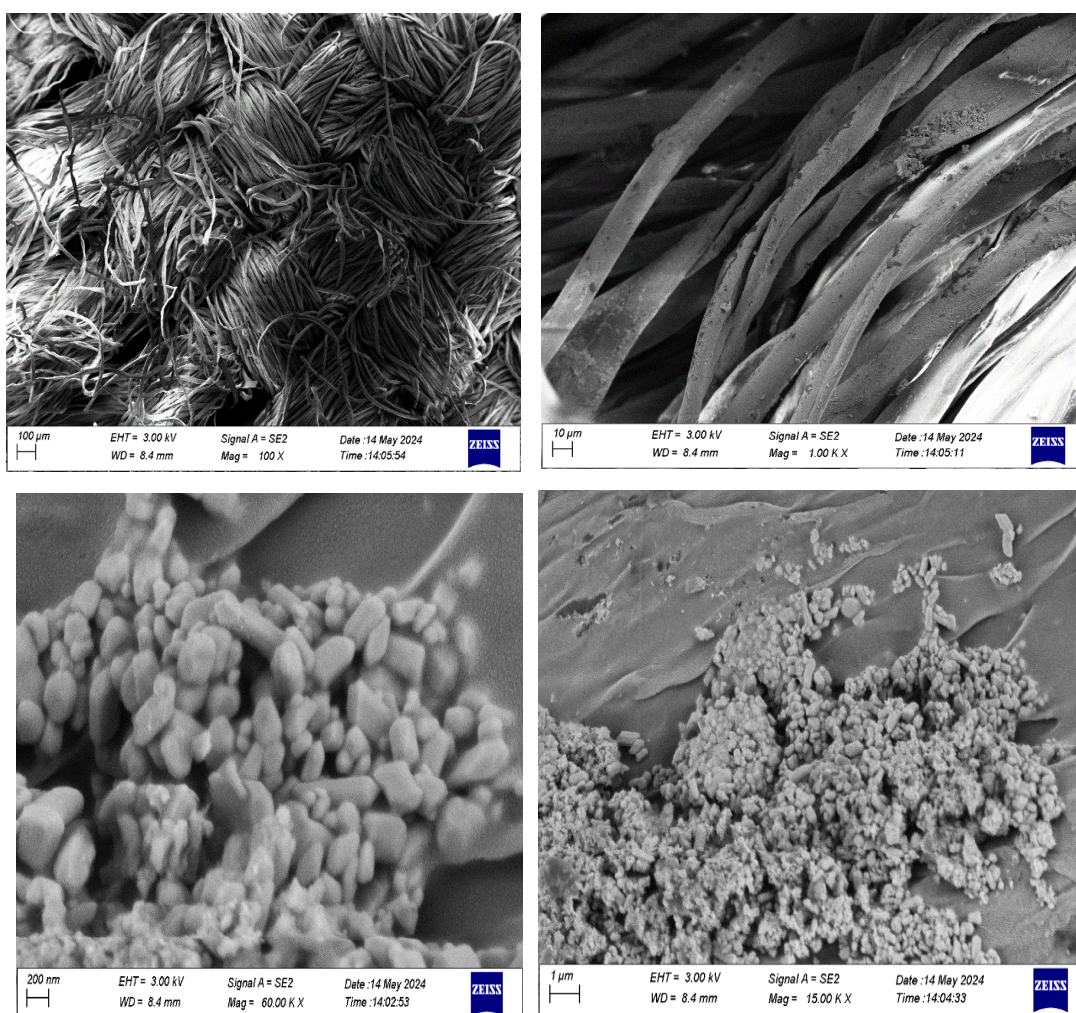
وتوزيع الجسيمات النانوية ضمن المحلول. ثم غُمست عينات القطن أبعادها (5cm×10cm) في محلول الغمس المحتوي على مركب نانوي Ag-C₆F₆ لمدة 10 دقائق. بعد ذلك، عصرت العينات المبللة باستخدام قضيب زجاجي لإزالة المادة المتبقية وللحصول على نسبة تشريب 90%. وأخيراً، جففت العينات المعالجة عند درجة حرارة 80°م لمدة 5 دقائق، ثم خضعت للمعالجة الحرارية في فرن عند 140°م لمدة 3 دقائق لاستكمال عملية المعالجة.



شكل (3-26): مراحل عملية الغمر-التجفيف-المعالجة الحرارية (pad-dry-cure) لمعالجة القماش القطني بتراكيز مختلفة من المركب النانوي Ag-C₆F₆ (a) غمر العينات بمركب (b) عصر العينات (c) تجفيف العينات بدرجة حرارة 80°م (d) المعالجة الحرارية للعينات في الفرن

ثانياً: توصيف عينات القماش المحمل بمركب $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ بالمجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي (FE-SEM):

تم إجراء تحليل المجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي (FE-SEM) لتحديد توزيع وتوزيع جسيمات الفضة على سطح ألياف القطن في القماش المدروس تحت نسب تكبير مختلفة ولتحديد شكل وحجم هذه الجسيمات والنتائج موضحة في الشكل (3-27).



شكل (3-27): صور المجهر الإلكتروني الماسح FE-SEM بقيم تكبير مختلفة توضح توزيع مركب $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ على سطح الليف القطني المعالج

وصفت تضاريس سطح القماش المعالج بجسيمات الفضة النانوية بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح ذو الانبعاث الحثلي وبنسب تكبير مختلفة عند (200x-1kx-5kx-15kx) حيث يظهر عند التكبير 1kx ألياف القطن بشكل خطوط متوازية تتوزع على سطحها جسيمات الفضة النانوية والتي تظهر بوضوح عند قيم تكبير أعلى بشكلها الكروي المتجانس والمنتظم مبرزة التوزيع المتجانس لهذه الجسيمات على ألياف القماش.

كما يظهر الشكل (45) طيف تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) حيث توضح البيانات المأخوذة من التحليل الطيفي للعينة المعدلة نسب العناصر الرئيسية المكونة لها، وهي الكربون (C)، الأكسجين (O)، الفضة (Ag)، والفلور (F)، بالنسب الوزنية والذرية.

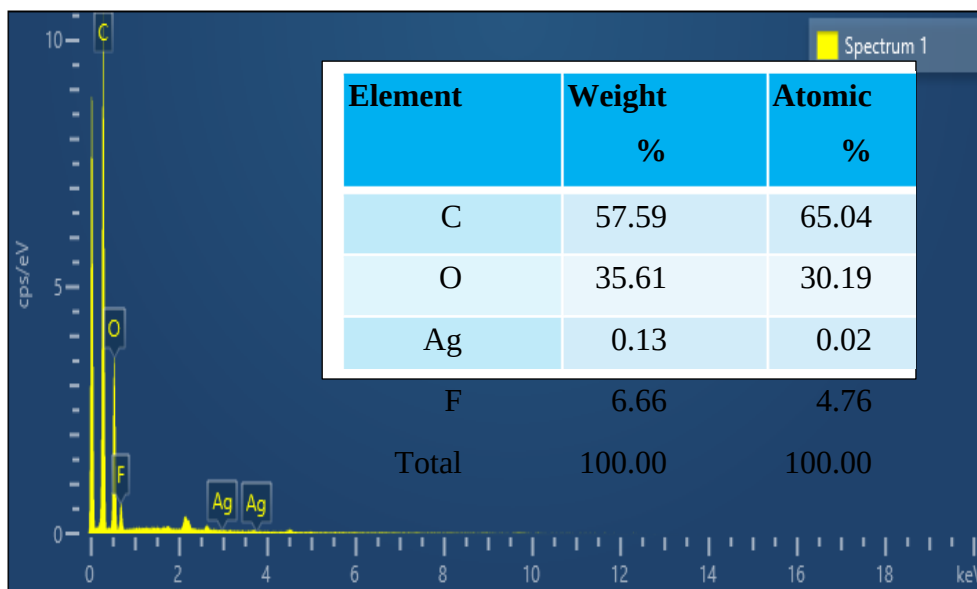
تبلغ نسبة الكربون 57.59% وزنياً و65.04% ذرياً، وهو ما يتوافق مع الطبيعة العضوية الأساسية لألياف القطن المكونة من السليلوز، حيث يشكل الكربون العنصر الرئيسي في الهياكل السليلوزية.

تتواجد نسبة كبيرة من الأكسجين أيضاً، حيث تصل إلى 35.61% وزنياً و30.19% ذرياً، دعماً لوجود مجموعات الهيدروكسي (OH-) في السليلوز، مما يؤكد الطابع العضوي للنسيج، بالإضافة إلى وجود الأكسجين في راتنج الفلوروكربون المستخدم.

تظهر الفلور بنسبة ملحوظة (6.66% وزنياً و4.76% ذرياً)، وهو مؤشر واضح على التغطية بطبقة راتنج فلوروكربون سداسي (C₆F₆)، إذ يحتوي هذا المركب على ذرات فلور متعددة، مما يدل على نجاح الطلاء الفلوري على سطح القماش.

حددت نسبة الفضة المدمجة مع القماش بنسبة (0.13% وزنياً و0.02% ذرياً)، وتعود هذه النسبة القليلة إلى الكمية المحدودة (0.102g) التي تم اضافتها إلى القماش أثناء المعالجة، وظهور الفضة ضمن طيف EDX تؤكد وجود الفضة النانوية بشكل فعال على سطح الألياف.

تشير النسب الستوكيومترية للعناصر المحضرة الشكل (3-28) إلى نجاح ادماج تلك العناصر مع القماش، والتي تجمع بين الخصائص الطاردة للماء الناتجة عن راتنج الفلوروكربون، والفعالية المضادة للجراثيم المرتبطة بجسيمات الفضة النانوية، مع الحفاظ على بنية النسيج الأساسي.



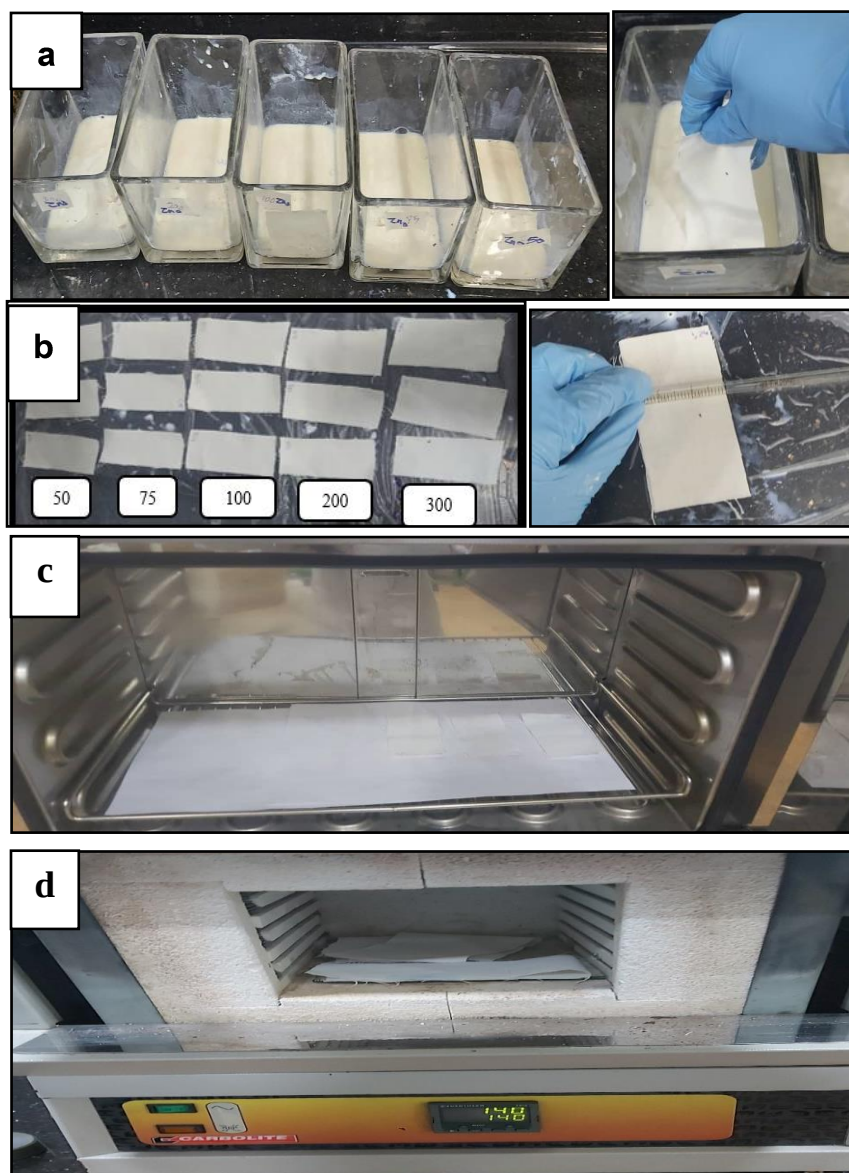
شكل (3-28): التركيب العنصري بواسطة مطيافية تشتت الأشعة السينية EDX لقماش القطن المعالج بجزيئات Ag والفلوروكربون (C6F6) باستخدام عملية (pad-dry-cure) مع جدول لنسب تلك العناصر.

2.5.3 تحضير وتوصيف عينات القماش المعدلة بمركب أكسيد الزنك النانوي وراتنج الفلورو كربون السداسي zno-C6F6:

أولاً: تحضير عينات القماش المعدلة بمركب أكسيد الزنك النانوي وراتنج الفلورو كربون السداسي:

يوضح الشكل (3-29) العملية خطوة بخطوة لتعديل سطح القماش القطني باستخدام طريقة (pad-dry-cure) بهدف إكسابه خصائص طاردة للماء ومضادة للجراثيم. لمعالجة الأقمشة القطنية براتنج فلوروكربون سداسي (C₆F₆) بتركيز 20g/l مع مسحوق أكسيد الزنك النانوي بتركيز مختلفة (-200-100-75-50 ppm). حضرت محاليل الغمر بعد مجانسيتها في حمام أمواج فوق صوتية بتردد 40 كيلو هرتز لمدة 10 دقائق لضمان تساوي التوزيع. بعدها، غمرت عينات القماش القطنية في المحاليل المحضرة لمدة 10

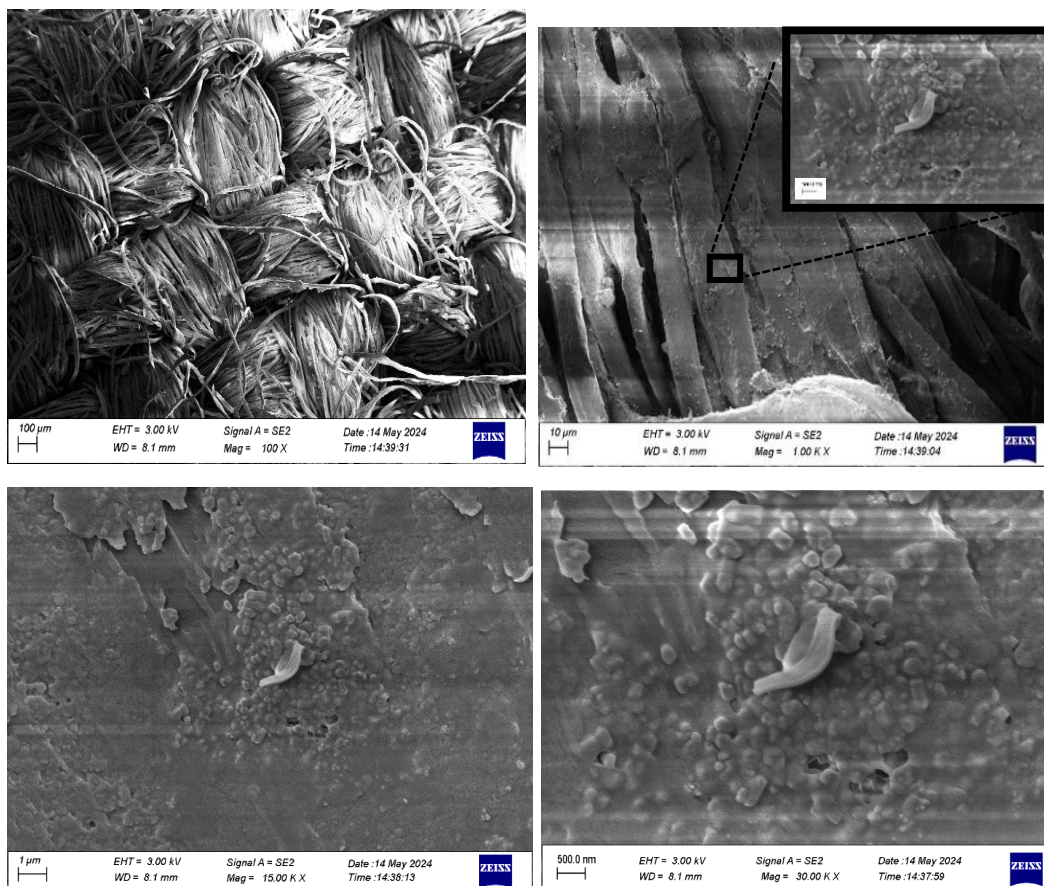
دقائق، تلتها مرحلة إزالة الفائض من خلال عصر العينات عن طريق الدرفلة بقضيب زجاجي، بهدف تثبيت الجسيمات النانوية على ألياف القطن ورفع كفاءة الامتصاص. في المرحلة الأخيرة، جففت العينات عند درجة حرارة 80°م لمدة 10 دقائق، ثم خضعت للمعالجة الحرارية في فرن عند 140°م لمدة 3 دقائق، ما يعزز عملية البلمرة وتحسين عملية ارتباط بين الجسيمات النانوية والألياف القطنية وتحسن ثباتية الطبقة المغلفة وسلوكها الطارد للماء والمضاد للجراثيم.



شكل (3-29): مراحل عملية الغمر-التجفيف-المعالجة الحرارية (pad-dry-cure) لمعالجة القماش القطني بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ بتركيزات مختلفة: (a) الغمر، (b) العصر الميكانيكي، (c) التجفيف و (d) المعالجة الحرارية

ثانياً: توصيف عينات القماش المحمل بمركب $ZnO-C_6F_6$ بالمجهر الإلكتروني الماسح بالانبعاث الحثلي (FE-SEM):

تم إجراء تحليل المجهر الإلكتروني الماسح (FE-SEM) لتحديد طبوغرافيا السطح وأبعاد وتوزيع أبعاد جسيمات أكسيد الزنك النانوي على سطح ألياف القطن في القماش المدروس بقيم تكبير مختلفة (100x-100kx) (30kx-15kx) كما هو موضح في الشكل (3-30).

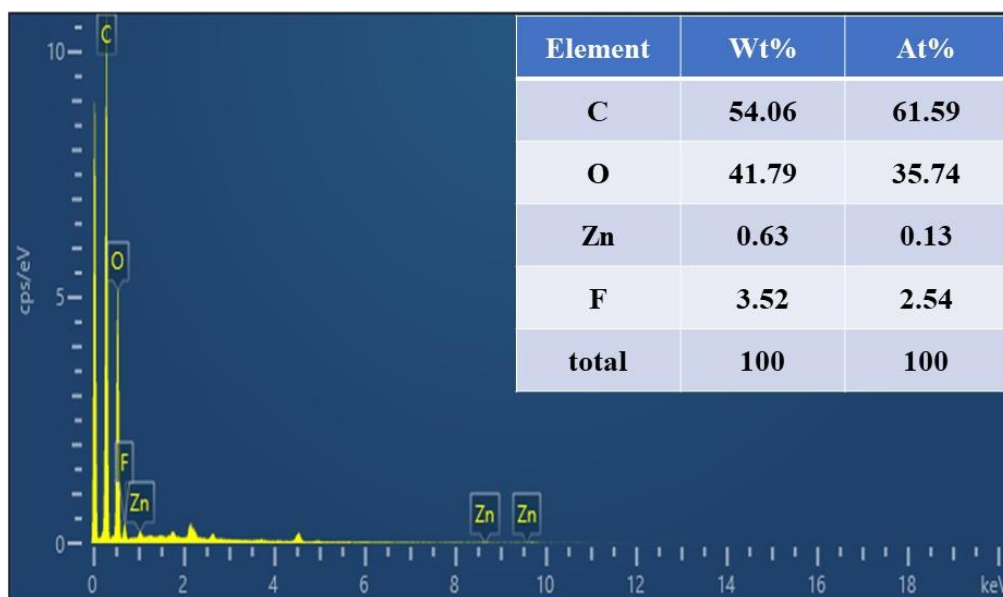


تظهر

شكل (3-30): صور المجهر الإلكتروني الماسح FE-SEM بقيم تكبير مختلفة توضح اندماج $ZnO-C_6F_6$ مع الليف القطني المعالج بطريقة (pad-dray-cure)

الصور اندماج واضح لمركب $ZnO-C_6F_6$ النانوي مع ألياف القطن (Tan, Sin, Bee, Tee, et al., 2019).

كما يظهر الشكل (31-3) طيف تشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) وتوزيع العناصر الكيميائية على سطح قماش القطن المعدل. يظهر الجدول أن النسبة الوزنية والذرية لعنصر الكربون 54.06% و 61.59% كبيرة على الترتيب. يأتي الأكسجين في المرتبة الثانية بنسبة وزنية 41.79% وذرية 35.74%، وهما العنصران الأساسيان في التركيب الكيميائي للنسيج والسليولوز. كما لوحظت نسبة الفلور صغيرة ولا تتجاوز (3.52% وزناً) والتي تعزى إلى وجود مركبات الفلورو مثل الفلورو كربون C_6F_6 المستخدمة في عملية المعالجة. أما عنصر الزنك فظهر بنسبة ضئيلة بلغت 0.63% وزناً، لاستخدام كميات قليلة من أكسيد الزنك أثناء المعالجة. تعكس هذه النتائج نجاح عملية اندماج مركب $ZnO-C_6F_6$ في القماش.



شكل (31-3): التركيب العنصري بواسطة مطيافية تشتت الأشعة السينية EDX لقماش القطن المعالج بـ $ZnO-C_6F_6$ باستخدام عملية (pad-dry-cure) مع جدول لنسب تلك العناصر.

6.3 اختبار ثباتية مواد المعالجة على الأقمشة بعد الغسيل:

قُيِّمت ثباتية مواد المعالجة على الأقمشة من خلال إجراء اختبارات غسيل في غسالة مخبرية الشكل (3-32) وفقاً للمواصفة القياسية AATCC 61-2003 أُجري الغسيل عند درجة حرارة 40 ± 2 درجة مئوية، حيث وضعت العينة المختبرة، أبعادها (10cm × 5cm)، بين عینتي قماش من القطن والصوف، وتم تثبيتها بخياطتها بين العينتين عند الحافة لضمان استقرارها خلال الغسيل. وضعت هذه العينة في علب من الفولاذ غير القابل للصدأ، مع إضافة عشرة كرات معدنية صغيرة لتعزيز الاحتكاك الميكانيكي. استخدم محلول غسل مكون من 2 غرام من مسحوق الغسيل مذاب في 100 مل من الماء.

تتم عملية الغسيل لمدة 45 دقيقة، وهي فترة تعادل تقريباً تأثير خمس عمليات غسيل تقليدية، مما يسمح بمحاكاة دقيقة لثبات المادة المعالجة بعد تعريضها لعدة مرات غسيل، تم محاكاة 5 دورات غسيل و10 دورات غسيل. تدور علب الفولاذ في حمام مائي متحكم بدرجة حرارته بسرعة 40 ± 2 دورة في الدقيقة، مع تثبيت حرارة الماء طوال فترة الاختبار. بعد انتهاء الغسيل، تشطف العينات عدة مرات بماء مقطر بدرجة حرارة 40 درجة مئوية، ثم تعصر وتجفف في المجففة بدرجة حرارة 70 درجة مئوية وفقاً للإجراءات القياسية.

تم إجراء اختبار ثباتية الغسيل للتحقق من الحفاظ على النشاط المضاد للجراثيم والخواص ذاتية التنظيف للأقمشة بعد عدد معين من دورات الغسيل. في هذا الاختبار، تغسل الأقمشة المعالجة باستخدام غسالات صناعية وفقاً لمعيار (AATCC Test method 61-2013e (2020)). في هذه الدراسة، تم إجراء الغسيل خمس وعشر مرات على التوالي، وذلك لتعريف قدرة الأقمشة على الحفاظ على خصائصها المضادة للبكتيريا والمقاومة للماء تحت ظروف استخدام متكررة. يعد هذا الاختبار مهماً في تقييم استدامة خصائص الأقمشة الطبية والعمل على تحسين طرق تثبيت الجسيمات النانوية عليها بما يضمن فعالية طويلة الأمد. يهدف هذا

الاختبار إلى محاكاة ظروف الغسيل المنزلية بدقة لتقييم مدى قدرة المادة المعالجة على الاحتفاظ بخصائصها الفيزيائية والوظيفية، وهو ما يتوافق مع المتطلبات الصارمة.



شكل (3-32): غسل العينات في غسالة مخبرية وفق المواصفة القياسية

AATCC61-2003

4. الفصل الرابع: النتائج والمناقشة

تمهيد:

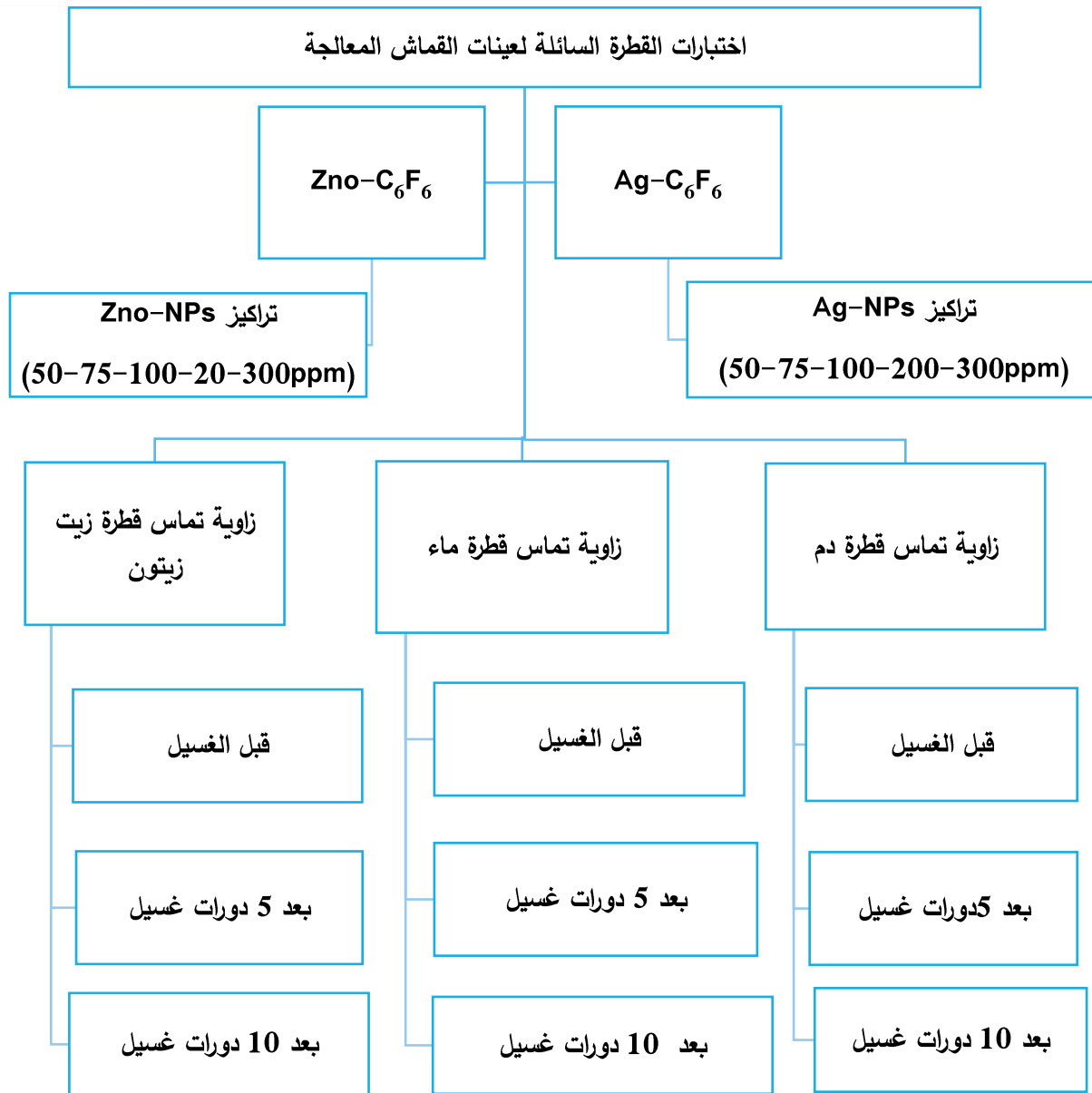
يشكل هذا الفصل نواة لعرض نتائج الدراسة التجريبية المنهجية، التي تهدف إلى تقييم الخواص المضادة للجراثيم والذاتية التنظيف لعينات القماش القطني المعالجة بالمركب البوليميري النانوي $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ و $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ بطريقة (غمر_ تجفيف _ معالجة حرارية). صممت الدراسة لتشمل مراحل متسلسلة تضمن دقة التحليل وموثوقية البيانات، حيث يفتتح عرض النتائج بمخططين تفصيليين يلخصان الإجراءات الرئيسية من حيث المركب البوليميري النانوي الذي سيعالج القماش به والتراكيز المختلفة للمادة النانوية ومراحل دراسة الخواص الوظيفية للقماش بعد المعالجة.

حيث يوضح الشكل (4-1) مخطط تفصيلي لمراحل دراسة الخواص المضادة للجراثيم لعينات القماش المعالجة.

كما يوضح الشكل (4-2) مخطط تفصيلي لخطوات اختبار القطرة السائلة لعينات القماش المعالجة.



شكل (1-4): مخطط تفصيلي يوضح مراحل دراسة الخواص المضادة للجراثيم لعينات القماش المعالجة



شكل (4-2): مخطط تفصيلي يوضح خطوات اختبار القطرة السائلة لعينات القماش المعالجة

1.4 دراسة خواص المقاومة الجرثومية للعينات:

درست الخواص المضادة للجراثيم للأقمشة المعالجة بمركبات نانوية بوليميرية، من خلال نهجين متكاملين. اعتمدت الدراسة على الطريقة النوعية وفقاً للمواصفة القياسية AATCC 147:2004 التي تعتمد على تقنية الخطوط المتوازية، بالإضافة إلى الطريقة الكمية وفقاً لمعيار AATCC 100-2004. يسمح هذا التكامل المنهجي بفحص شامل للنشاط المضاد للجراثيم، حيث توفر الطريقة النوعية تقييماً بصرياً دقيقاً لمناطق تثبيط نمو الجراثيم، في حين تكشف الطريقة الكمية عن مدى تثبيط الأعداد الجرثومية بعد المعالجة.

تم تطبيق هاتين الطريقتين على عينات قماش معالجة بمركب فلورو كربون مع جسيمات الفضة النانوية (Ag-C₆F₆)، وأخرى بمعالجة مركب فلورو كربون مع أكسيد الزنك النانوي (ZnO-C₆F₆)، بهدف تقييم ومقارنة فعالية كل من المركبين في تحقيق نشاط مضاد للجراثيم لنوعين من الجراثيم المختبرة.

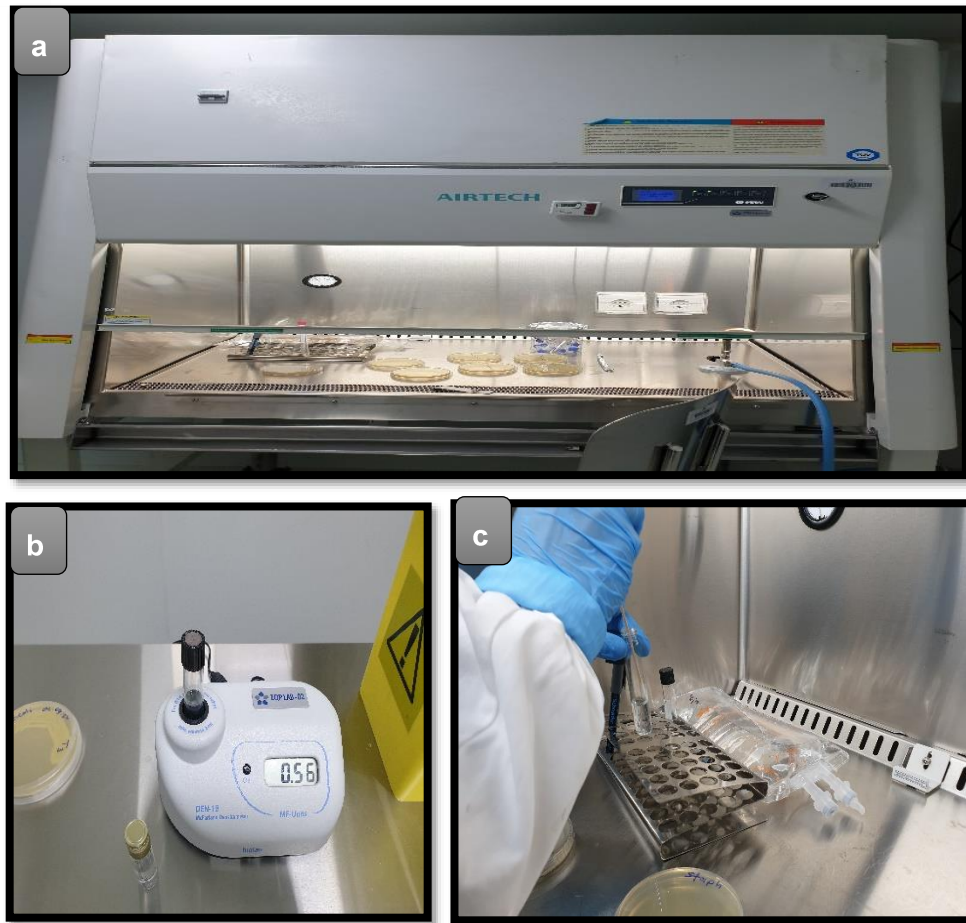
1.1.4 دراسة مقاومة عينات القماش المدروس للجراثيم وفق المواصفة القياسية AATCC 147:2004

تمت دراسة مقاومة عينات الأقمشة لسلاسل معيارية نشطة لكل من جراثيم *Staphylococcus aureus* الموجبة لصبغة الغرام (ATCC 8538) وجراثيم *Escherichia coli* السالبة لصبغة الغرام (ATCC 8739) ضمن مختبرات معمل مياميد للصناعات الدوائية الشكل (3-4). بدايةً، تم تحضير وسط الزرع باستخدام تربتون سويا آغار (TAS Trypton Soya Agar) وزراعة الجراثيم المنقولة من السلاسل القياسية، مع الالتزام باستخدام الأجيال حتى الجيل الخامس فقط مع تحديد عمر المستعمرات النشطة بين 18 و24 ساعة، لضمان أعلى درجات النشاط البيولوجي.



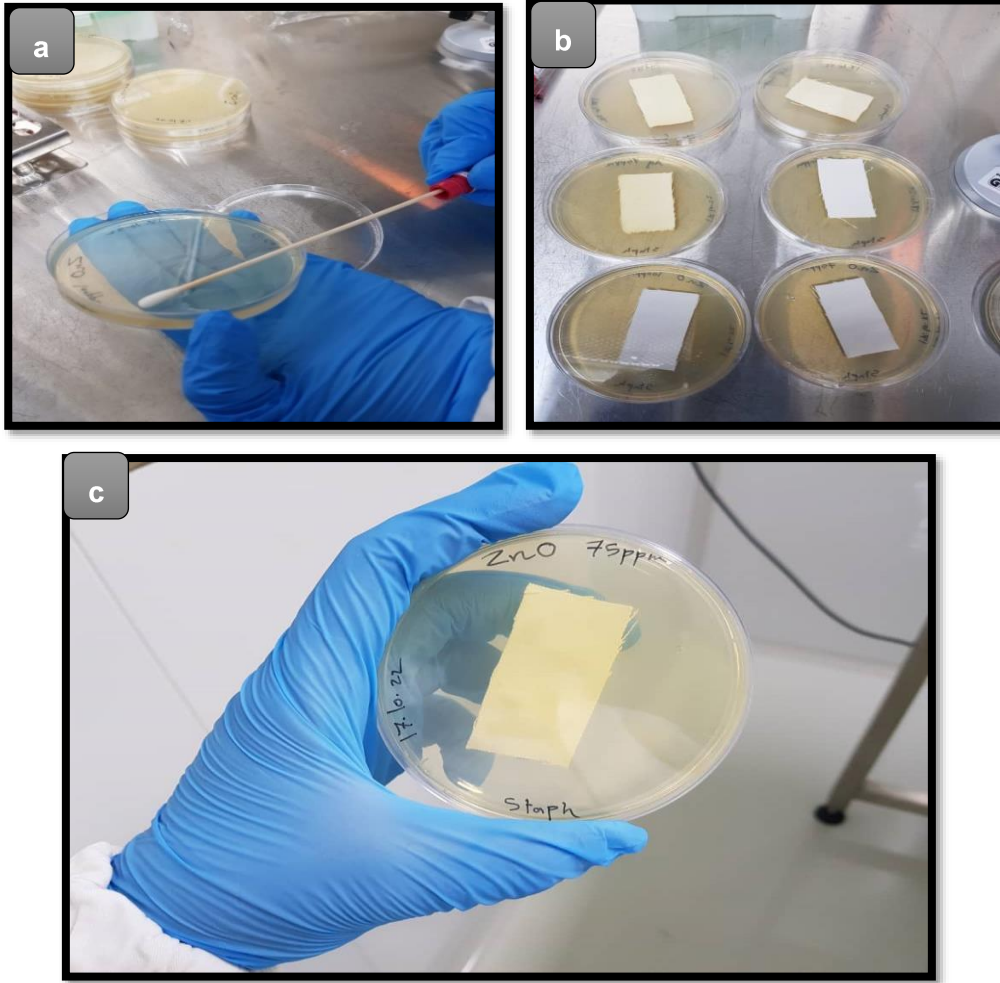
شكل (3-4): المواد المستخدمة في الاختبار a: سلالات معيارية لكل من جراثيم *Staphylococcus aureus* الموجبة لصبغة الغرام (ATCC 8538) وبكتيريا *Escherichia coli* السالبة لصبغة الغرام (ATCC 8739) b: وسط الزرع باستخدام تربتون سويا آغار

تم تنفيذ كافة التجارب ضمن بيئة معقمة، وذلك داخل غرف النظافة (Cleanrooms) باستخدام جهاز تدفق الهواء الصفائحي (Laminar Air Flow)، لضمان أكبر قدر من السلامة ومنع التلوث الشكل (4-4) . شملت خطوات التحضير نقل 5 مل من المصل الفيزيولوجي المعقم إلى أنابيب اختبار معقمة، ومن ثم تم إضافة مستعمرات دقيقة من طبق الزرع إلى المصل وخلطها جيدا لتحضير المعلق الجرثومي. استخدم جهاز قياس العكارة (McFarland Turbidity Meter) لمقارنة عكارة المعلق المحضر بمعياري العكارة المعياري McFarland 0.5 ، الذي يمثل تركيزاً ميكروبياً يقدر بـ 10^8 مستعمرة/مل، مع تعديل التركيز حسب الحاجة.



شكل (4-4): تجهيزات اختبار مقاومة العينات المعالجة للجراثيم a: جهاز تدفق الهواء الصفائحي (Laminar Air Flow) b: جهاز قياس العكارة (McFarland Turbidity) c: تحضير المعلق الجرثومي.

بعد تحضير المعلق الجرثومي، أُجريت عمليات تخفيف متسلسلة داخل أنابيب معقمة باستخدام مصل فيزيولوجي معقم لتحضير محاليل بتركيزات مختلفة. أُخذت عينة من التركيز النهائي 10^5 بواسطة ماسحة قطنية معقمة، تم بها تلقيح سطح طبق زرع TSA بشكل خطوط متوازية. وضعت قطع لعينات قماش معالجة أبعادها (5cm×2.5cm) على سطح الأطباق باستخدام ملقط معدني معقم، حيث أخضعوا لتقنية التلقيح بخطوط متوازية لتحديد نشاطهم المضاد للجراثيم بدقة الشكل (4-5). حضنت الأطباق في حاضنة بدرجة حرارة 35°C لمدة 24 ساعة لإتمام عملية النمو والاختبار.



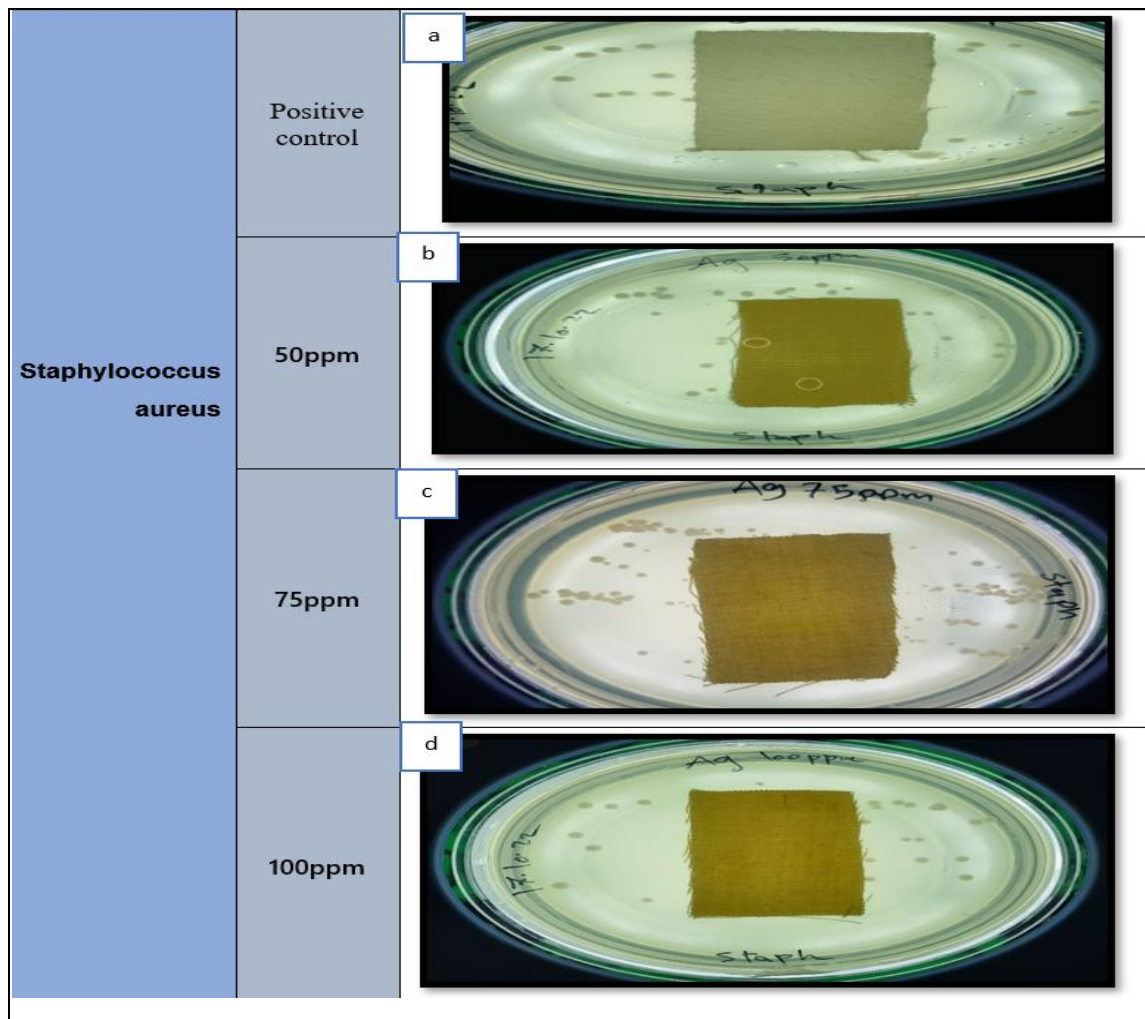
شكل (4-5): تحضير عينات القماش المعالجة للاختبار الجرثومي a : إجراء المسح الجرثومي على أطباق بتري بوضع خطوط متوازية من المحلول البكتيري b : وضع العينات (قطع الأقمشة) على سطح أطباق بتري بعد الانتهاء من المسح الجرثومي c : تحضير الأطباق للحضانة عن طريق كتابة معلومات تعريفية عليها، مثل نوع المادة المعالجة، وتركيزها، تاريخ الإعداد، ونوع الجراثيم المستخدمة في الاختبار.

1.1.1.4 اختبار النشاط المضاد للجراثيم لعينات القماش المعالجة بالفضة النانوية والفلورو

كربون:

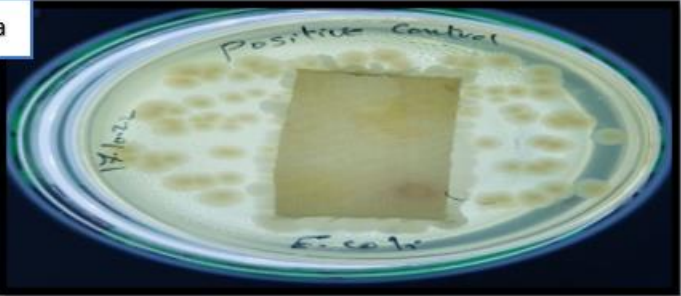
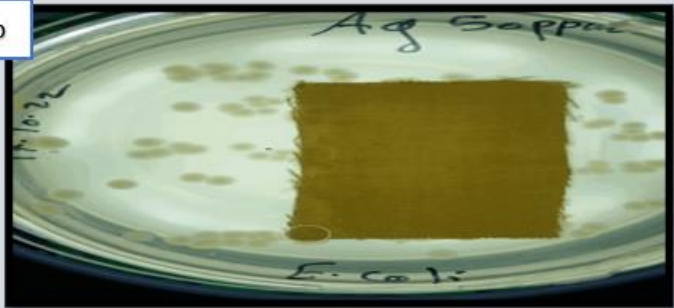
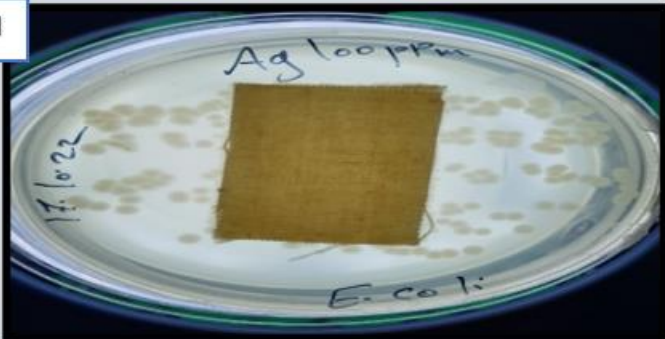
قيمت فعالية الأقمشة القطنية المعالجة بجسيمات الفضة النانوية والفلورو كربون ($\text{Ag-C}_6\text{F}_6$) مقابل كل من الجراثيم موجبة الغرام (المكورات العنقودية الذهبية) والجراثيم سالبة الغرام (الإشريكية القولونية) باستخدام التقييم النوعي للنشاط المضاد للجراثيم وفق المواصفة القياسية AATCC 147:2004 بطريقة الخطوط المتوازية عند تركيز جرثومي 10^5 (مستعمرة/مل لتر).

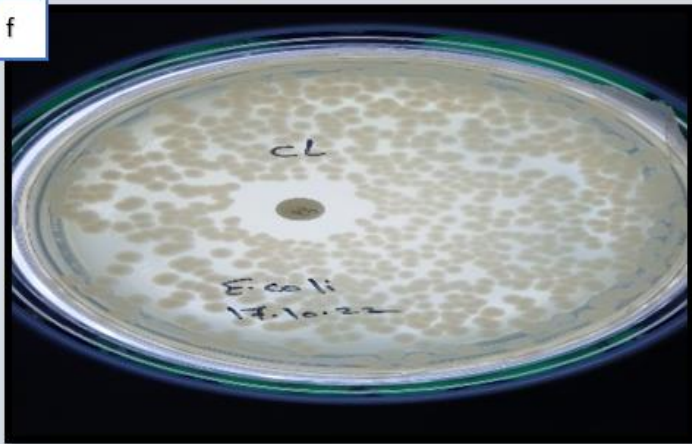
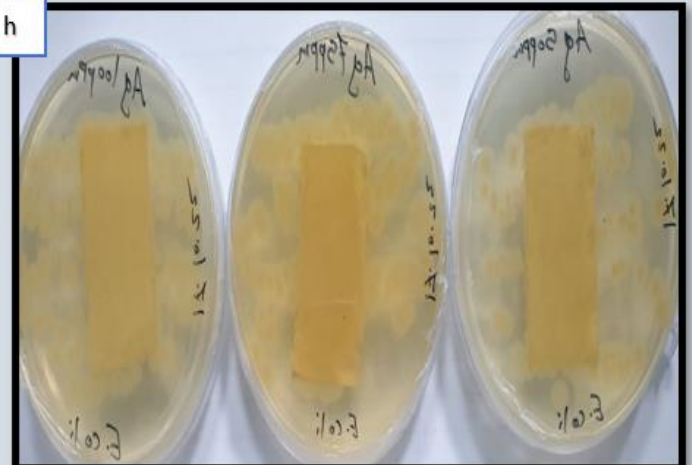
يوضح الشكل (4-6) القدرة التثبيطة لعينات القماش المعالج بتركيزات مختلفة من جسيمات الفضة النانوية (50-75-100ppm).



Staphylococcus aureus	صاد حيوي imipenem	f	
	Positive Control; after 48h	g	
	(50-75-100ppm) after 48h	h	

شكل (4-6): صور أطباق بتري توضح القدرة التثبيطية للأقمشة المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ والمعرضة لجراثيم (*Staphylococcus aureus*) بعد حضانة 24 ساعة على (a) عينة قماش غير معالج، (b) قماش معالج بـ $\text{Ag-c}_6\text{f}_6$ بتركيز 50ppm، (c) قماش معالج بتركيز 75ppm، (d) قماش معالج بتركيز 100ppm، (f) النشاط المضاد للجراثيم لعينة الصاد الحيوي، (g) العينة غير المعالجة بعد 48 ساعة، (h) العينات المعالجة عند التراكيز مختلفة للفضة النانوية (50-75-100ppm) بعد حضانة للجراثيم 48 ساعة.

Escherichia coli	Positive control	a	
	50ppm	b	
	75ppm	c	
	100ppm	d	

Escherichia coli	صاد حيوي Colistin	f	
	Positive Control; after 48h	g	
	(50-75-100ppm) after 48h	h	

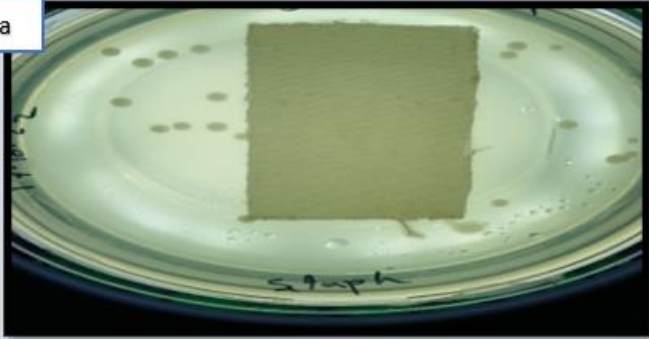
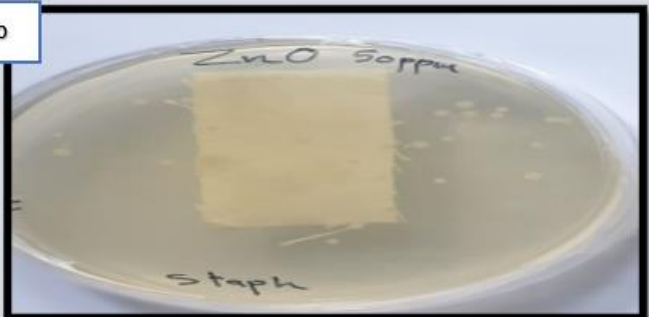
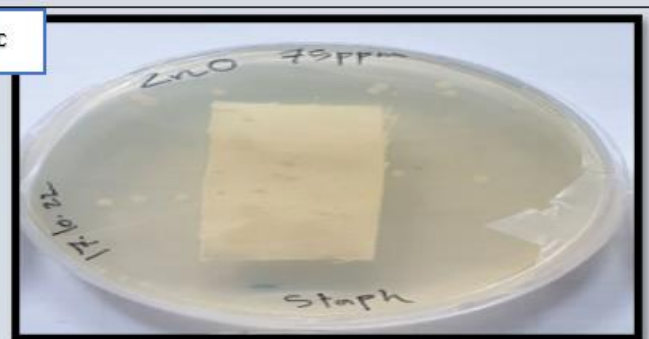
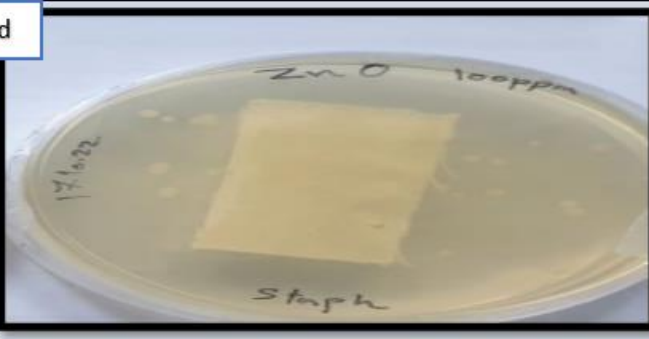
شكل (4-7): صور أطباق بتري توضح القدرة التنشيطية للأقمشة المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ والمعرضة لجراثيم (*Escherichia coli*) بعد حضانة 24 ساعة على (a) عينة قماش غير معالج، (b) قماش معالج بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ فيه Ag بتركيز 50ppm، (c) قماش معالج بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ فيه Ag بتركيز 75ppm، (d) قماش معالج بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ فيه Ag بتركيز 100ppm، (f) النشاط المضاد للبكتيريا لعينة الصاد الحيوي، (g) العينة غير المعالجة بعد 48 ساعة، (h) العينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ عند التراكيز (50-75-100ppm) بعد حضانة للجراثيم 48 ساعة

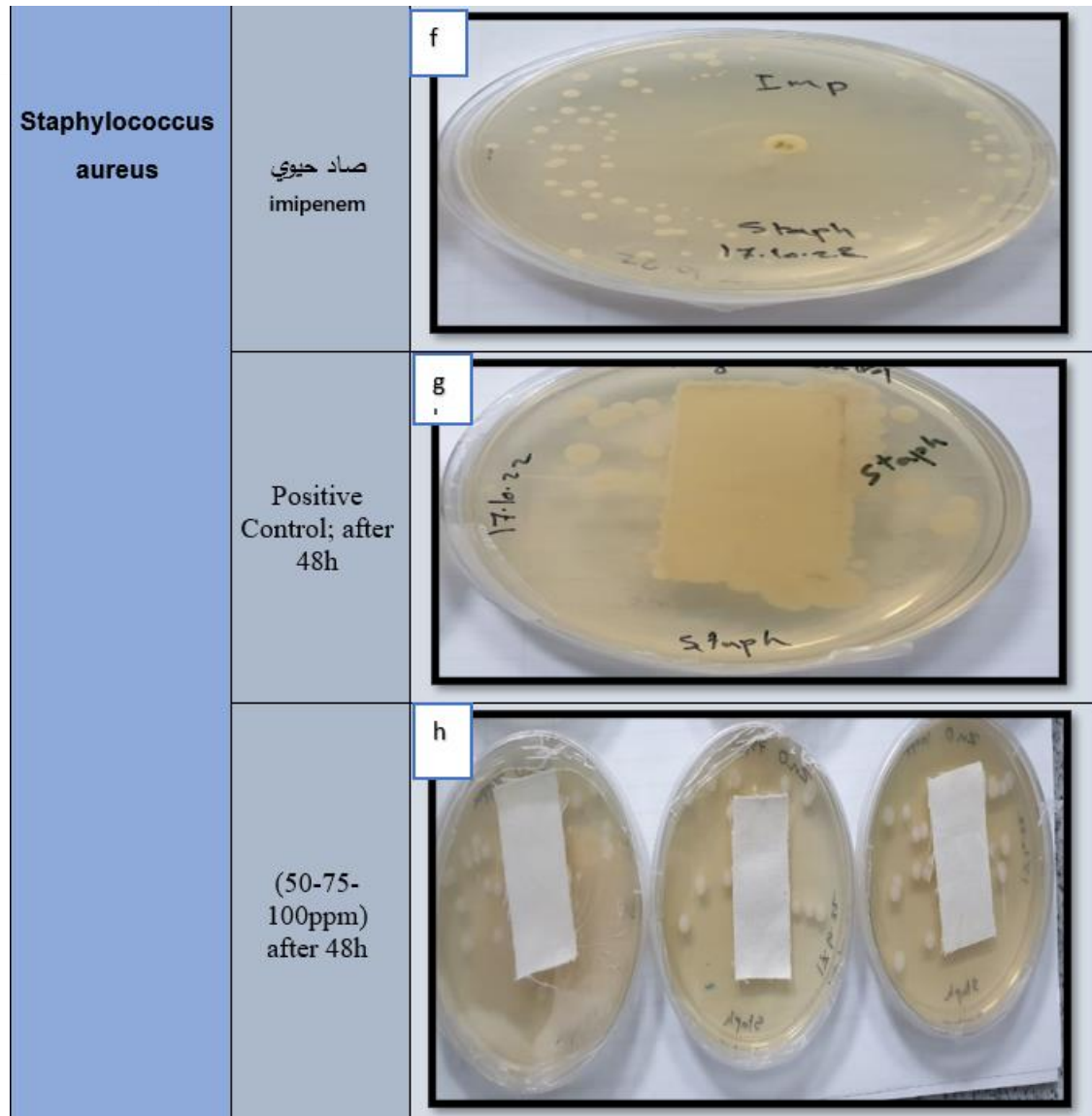
في الشكل (4-6)، لوحظ غياب النشاط الجرثومي أسفل العينات المعالجة بمركب $Ag-C_6F_6$ عند تراكيز مختلفة للفضة النانوية (75-100ppm)، بسبب القدرة التثبيطية العالية لجسيمات الفضة النانوية (AgNPs) والتي يمكن أن تعزى إلى تخريب جدار الخلية الجرثومية بفعل أيونات Ag^+ أو نتيجة الموت المبرمج، مما يعطل التنفس الخلوي والتكاثر للخلية الجرثومية. ومع الإشارة إلى أن هناك العديد من الفرضيات التي تفسر آلية القتل إلا أنه لا يوجد للآن دراسة تجزم آلية القتل. في حين تم رصد مستعمرتين فقط عند التركيز الأدنى 50ppm. كما تبين عدم تكاثر المستعمرات على سطح العينات المعالجة بتراكيز مختلفة وذلك بعد مرور 48 ساعة من الحضانة عند 37 درجة مئوية حيث تمنع جسيمات الفضة النانوية التكاثر السطحي للجراثيم بفعالية عالية. بالمقابل، أظهرت العينة غير المعالجة انتشاراً جرثومياً واسعاً، وهو ما يعزى إلى احتواء القماش القطني غير المعالج على مادة السليلوز التي توفر بيئة رطبة مغذية للجراثيم. وفي الشكل (4-7) يظهر الفعالية الحيوية لمركب $Ag-C_6F_6$ ضد جراثيم الإشريكية القولونية، حيث لوحظ فعالية أكبر لعينات القماش المعالج ضد المكورات العنقودية الذهبية مقارنة بالإشريكية القولونية بسبب اختلاف بنية الجدار الخلوي بين الجراثيم إيجابية الغرام والجراثيم سلبية الغرام. بالمقارنة بين فعالية المضادين الحيويين تظهر عينة المضاد الحيوي imipenem شكلت حالة تثبيط واضحة أمام المكورات العنقودية الذهبية، على عكس عينات Colistin التي أظهرت حالة تثبيط صغيرة ضد الإشريكية القولونية، مع التأكيد على تخصص كل مضاد حيوي لطائفة جرثومية معينة.

ولوحظ عدم تشكل حالة تثبيط حول العينات القماش المعالجة بـ $Ag-C_6F_6$ وعدم وجود انتشار جرثومي على سطحها، مما يشير إلى الفعالية الحيوية التي توفرها جسيمات الفضة النانوية كعامل اتصالي (contact-killing) بدلاً من الانتشار (zone of inhibition)، حيث تقتل الجراثيم الملامسة مباشرة.

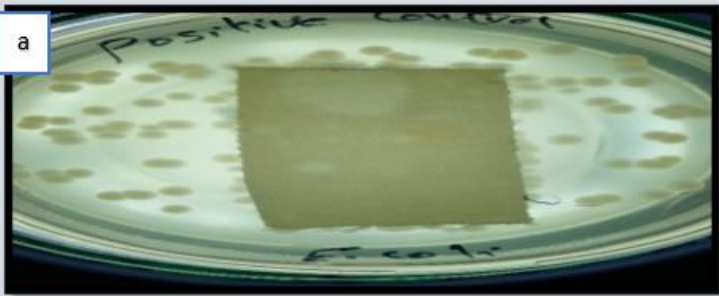
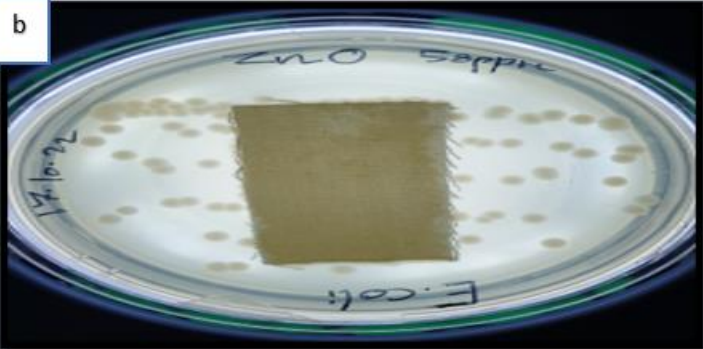
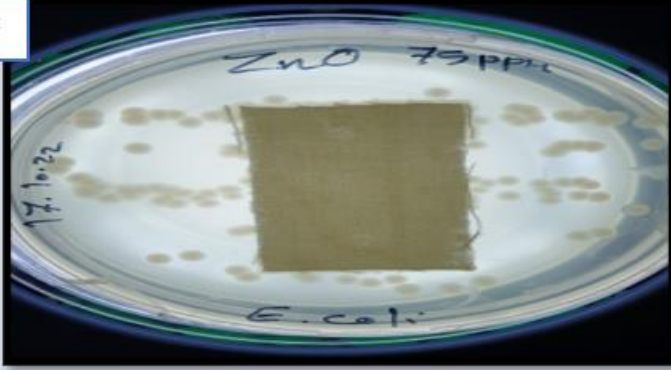
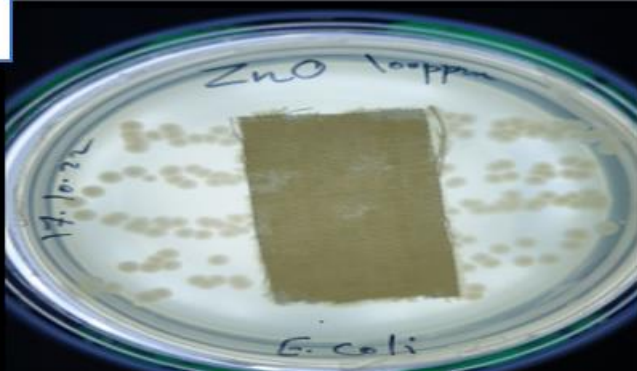
2.1.1.4 اختبار النشاط المضاد للجراثيم لعينات القماش المعالجة بأكسيد الزنك النانوي والفلورو كربون:

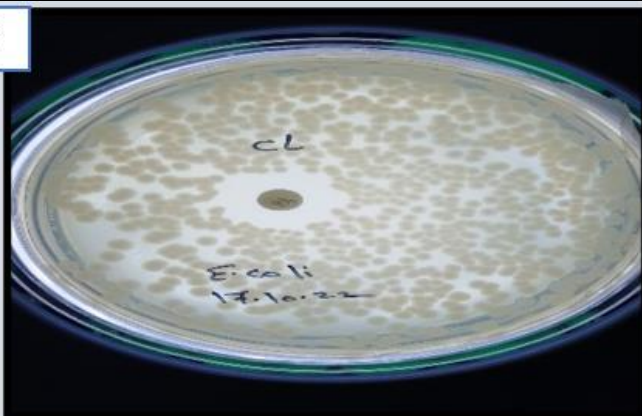
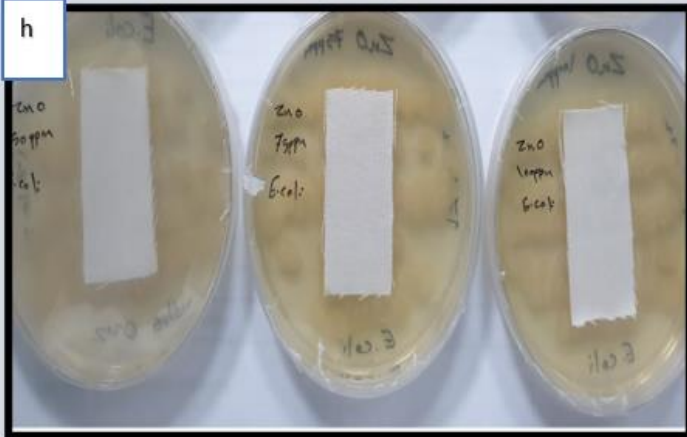
كما تم تقييم فعالية الأقمشة القطنية المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ ضد الجراثيم موجبة الغرام (المكورات العنقودية الذهبية) والجراثيم سالبة الغرام (الإشريكية القولونية) باستخدام الطريقة النوعية لتقييم النشاط المضاد للميكروبات وفق المواصفة القياسية AATCC 147:2004 بطريقة الخطوط المتوازية، عند تركيز جراثيمي (10^5 cfu/ml). يوضح الشكل (4-8) النشاط المضاد للجراثيم للقماش المعالج عند تراكيز مختلفة من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (50-75-100ppm).

Staphylococcus aureus	Positive control	a	
	50ppm	b	
	75ppm	c	
	100ppm	d	



شكل (4-8): صور أطباق بتري توضح القدرة التنشيطية للأقمشة المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ والمعرضة لجراثيم إيجابية الغرام (*Staphylococcus aureus*) بعد حضانة 24 ساعة. (a) عينة قماش غير معالج، (b) قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 50ppm، (c) قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 75ppm، (d) قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 100ppm، (f) النشاط المضاد للبكتيريا لعينة الصاد الحيوي، (g) العينة غير المعالجة بعد 48 ساعة، (h) العينات المعالجة بأكسيد الزنك النانوي عند التراكيز (50-75-100ppm) بعد حضانة للجراثيم 48 ساعة

Escherichia coli	Positive control	
	50ppm	
	75ppm	
	100ppm	

Escherichia coli	صاد حيوي Colistin	f	
	Positive Control; after 48h	g	
	(50-75-100ppm) after 48h	h	

شكل (4-9): صور أطباق بتري توضح القدرة التثبيطية للأقمشة المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ والمعرضة لجراثيم سالبة الغرام (*Escherichia coli*) بعد حضانة 24 ساعة على **a** عينة قماش غير معالج، **b** قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 50ppm، **c** قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 75ppm، **d** قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي بتركيز 100ppm، **(f)** النشاط المضاد للجراثيم لعينة الصاد الحيوي، **(g)** العينة غير المعالجة بعد 48 ساعة، **h** العينات المعالجة بأكسيد الزنك النانوي عند التراكيز (50-75-100ppm) بعد حضانة للجراثيم 48 ساعة

تم تحديد فعالية تثبيط الجراثيم بطريقة الانتشار عبر الأطباق لعينات القماش المدروسة وذلك بعد حضنها عند 37 درجة مئوية لمدة 24 ساعة. يشير عدم وجود نشاط جرثومي أسفل عينة القماش مباشرة إلى فعالية مضادة للجراثيم مع غياب ظهور هالة التثبيط التي لعدم قدرة المادة النانوية على الانتشار عبر الوسط نتيجة ارتباطها مع القماش. (M. Z. Khan et al., 2018)

أيضاً يوضح الشكل (4-8) عدم وجود نشاط جرثومي ضد جراثيم المكورات العنقودية أسفل العينات المعالجة عند التركيز 100ppm حتى بعد مرور 48 ساعة مقارنة بالعينة غير المعالجة، حيث يلاحظ وجود انتشار جرثومي كبير عليها ، ويعود السبب لاحتواء القماش القطني غير المعالج على مادة السيللوز كمادة مغذية للجراثيم. وكذلك يوضح الشكل (4-9) عدم القدرة التثبيطية لعينات القماش المعالجة ضد جراثيم الاشريكية القولونية مع ملاحظة أن القدرة التثبيطية للعينات المعالجة ضد جراثيم المكورات العنقودية أكبر من قدرتها التثبيطية ضد الاشريكية القولونية حيث أن عينات الصاد الحيوي imipenem أبدت هالة تثبيط كبيرة ضد جراثيم المكورات العنقودية الذهبية مقارنة بهالة التثبيط الصغيرة التي شكلتها عينة الصاد الحيوي Colistin ضد جراثيم الاشريكية القولونية.

ي عزى اختلاف النشاط المضاد للجراثيم لجسيمات أكسيد الزنك النانوية بين الجراثيم موجبة الغرام وسالبة الغرام إلى الفوارق البنيوية في جدار الخلية الجرثومية. حيث تتميز الجراثيم سالبة الغرام ببنية جدارية أكثر تعقيدا وتعددا في الطبقات، مع وجود غشاء بلازمي خارجي، مما يوفر حماية إضافية ضد تأثيرات الجذور الحرة التفاعلية (ROS) مقارنة بالجراثيم موجبة الغرام التي تمتاز ببنية أبسط وأقل تعقيدا (Verbič et al., 2019) كما تم تقييم النشاط المضاد للجراثيم لعينات الأقمشة المعالجة بمركبات $Ag-C_6F_6$ و $ZnO-C_6F_6$ بطريقة نوعية باستخدام اختبار الخطوط المتوازية وفق المواصفة القياسية AATCC 147:2004. لم تظهر العينات

المعالجة أي هالات تثبيط واضحة للنمو الجرثومي، ويرجع ذلك إلى ترسيب طبقة من الفلوروكربون على سطح الجسيمات النانوية، مما يمنع توليد الأكسجين التفاعلية (ROS) لأيونات الزنك والفضة.

إن طبقة الفلوروكربون تشكل سطحاً كارها للماء (hydrophobic)، يعيق ارتباط جزيئات الماء مع النانو جسيمات المشاركة في تكوين أيونات OH^- وأيونات Zn^{++} ، مما يفسر غياب مناطق التثبيط. ومع ذلك، أظهرت عينات الفضة النانوية مع الفلوروكربون مقاومة جرثومية أعلى مقارنة بمركبات أكسيد الزنك، ويعود ذلك إلى الخصائص المضادة للجراثيم الفريدة لأيونات الفضة والتي يمكنها تعطيل الخلايا الجرثومية حتى مع وجود حجب جزئي (M. Z. Khan et al., 2018).

حيث أن فعالية الفضة النانوية في تعطيل الجراثيم تعتمد أساساً على إطلاق أيونات الفضة (Ag^+) التي تتفاعل مع مكونات الخلايا الجرثومية بشكل مباشر مقارنة بجسيمات أكسيد الزنك التي تعتمد بشكل أكبر على التفاعلات مع جزيئات الماء لتوليد ROS وإطلاق أيونات Zn^{++} ، بناءً على ذلك يمكن القول إن طبقة الفلوروكربون تؤثر على كلا النوعين، إلا أن تأثيرها على أكسيد الزنك أكبر مقارنة بالفضة النانوية.

بناءً على هذه النتائج، أجريت اختبارات كمية للنشاط المضاد للجراثيم وفق المواصفة القياسية AATCC 100-2004، إلى جانب دراسة ثباتية الفعالية بعد غسل العينات.

2.1.4 دراسة مقاومة عينات القماش المدروس للجراثيم وفق المواصفة القياسية AATCC 100-

2004

تمت دراسة مقاومة عينات الأقمشة لنسخ نشطة من السلالات المعيارية لكل من جراثيم *S. aureus* الموجبة لصبغة الغرام (ATCC 8538) وجراثيم *E. coli* السالبة لصبغة الغرام (ATCC 8739) ضمن مختبرات معمل مياميد للصناعات الدوائية، تم تنفيذ كافة الإجراءات ضمن بيئة معقمة، وذلك داخل غرفة نظيفة

(Cleanrooms) بوجود جهاز تدفق الهواء الصفائحي (Laminar Air Flow) ، لضمان أكبر قدر من

السلامة ومنع التلوث.

استخدمت عينات مربعة بقياس $4.8 \text{ cm} \times 4.8 \text{ cm}$ وفق الآتي: عينات غير معالجة، عينات معالجة

بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ وبـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ وفق التراكيز (50, 75, 100, 200, 300 ppm)، عينات معالجة بعد 5

دورات غسيل، عينات معالجة بعد 10 دورات غسيل.

تم تحضير 100 مل من وسط مغذي من سائل تريبتون صويا (TSB) وتم حضنه لمدة 24 ساعة عند درجة

حرارة 37 ± 1 درجة مئوية مع الجراثيم، ثم نقل 5 مل من المصل الفيزيولوجي المعقم إلى أنابيب اختبار

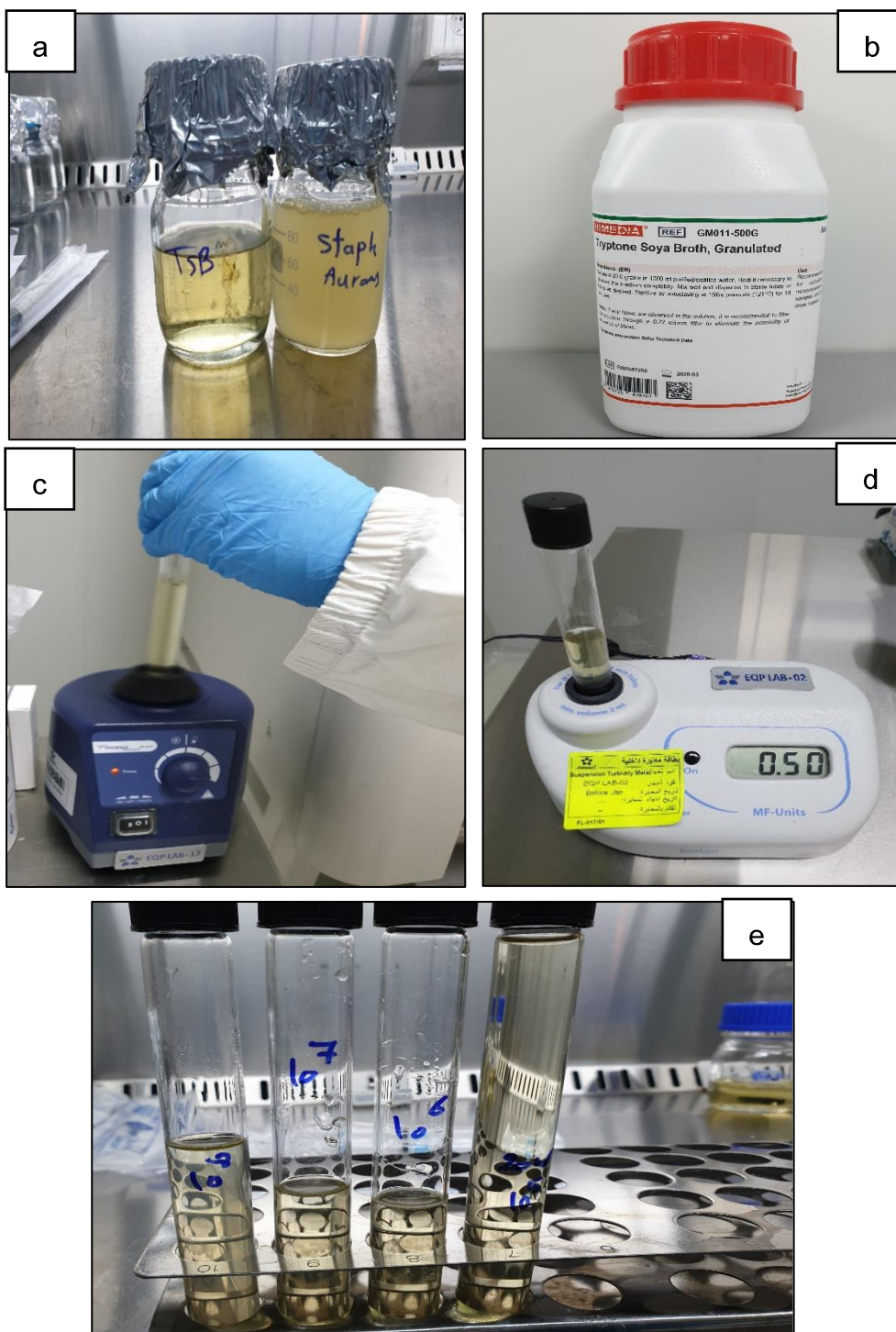
معقمة أيضاً، ومن ثم أُضيفت مستعمرات جرثومية من طبق الزرع للسلاطات المدروسة إلى المصل وخطها

جيدا بواسطة Vortex لتحضير المعلق الجرثومي. استخدم جهاز قياس العكارة (McFarland Turbidity

Meter) للمقارنة عكارة المعلق المحضر بمقياس العكارة المعياري McFarland 0.5 ، الذي يعادل تركيزاً

ميكروبياً يقدر بـ 10^8 مستعمرة/مل، مع تعديل التركيز حسب الحاجة ليصبح $1 \times 10^5 \text{ cfu per ml}$. يوضح

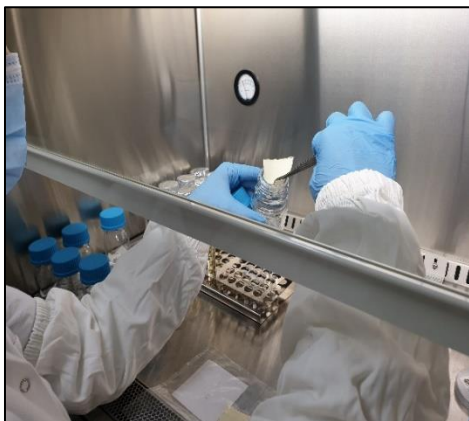
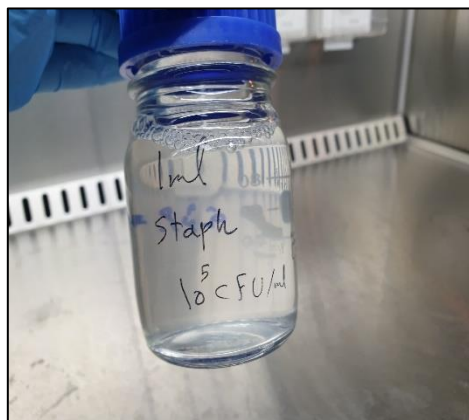
الشكل (4-10) الخطوات المعمول بها.

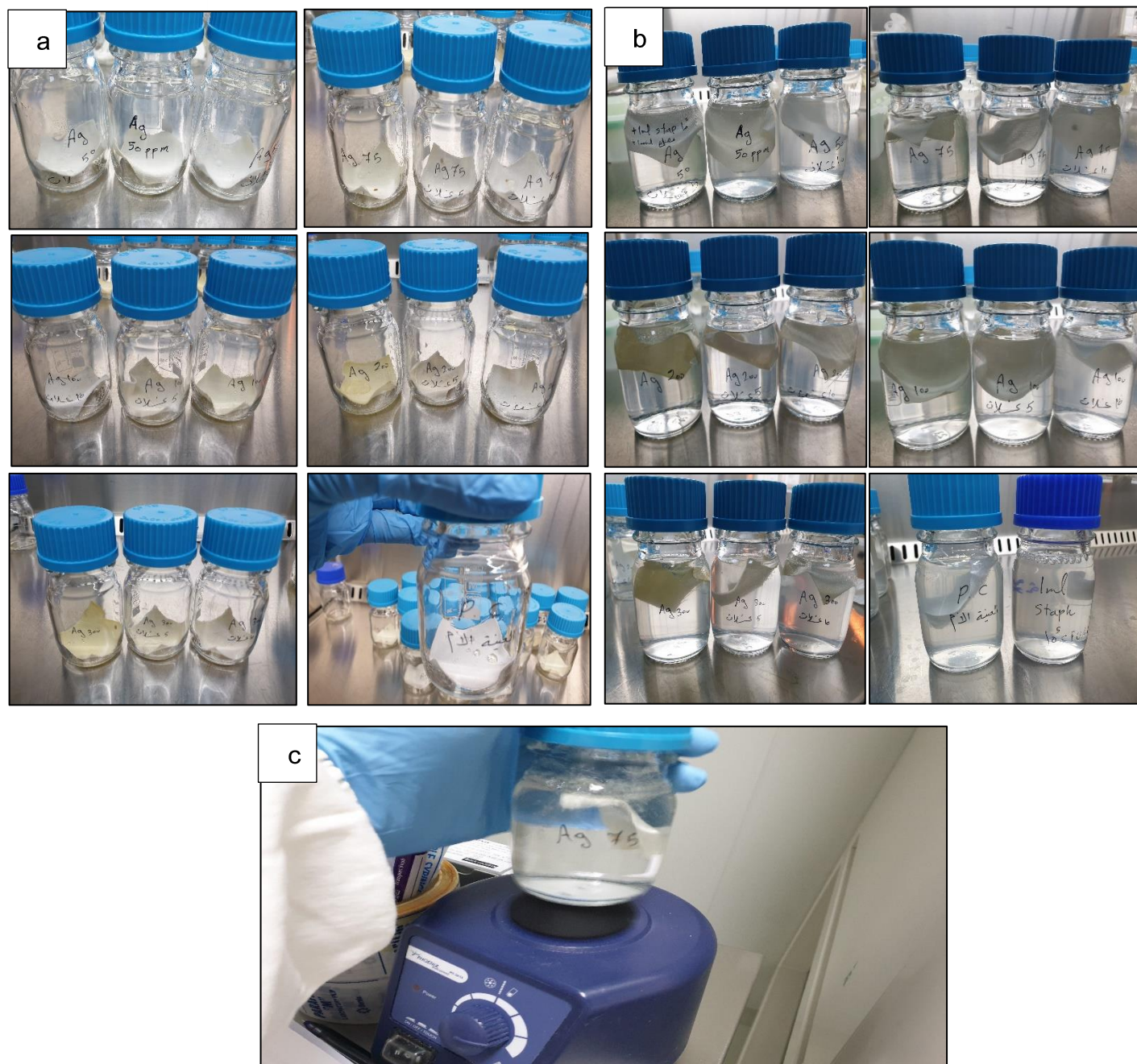


شكل (4-10): تحضير اللقاح الجرثومي المخفف a: مغذي تريبتون صويا (TSB) b: وسط مغذي (TBS) ووسط جراثيم الـ Staph c: جهاز vortex لرج المحاليل وخطها d: جهاز قياس العكارة (McFarland) e: Turbidity Meter: تحضير التركيز الميكروبي المطلوب

تم تطبيق 1 ± 0.1 مل من اللقاح المخفف (سائل جرثومي مخفف) لكل عينة، ثم حُضنت لمدة 24 ساعة إضافية عند درجة حرارة $37 \pm 1^\circ \text{C}$. بعد فترة الحضانة، بعدها تم إضافة 100 مل من محلول الفسيولوجي (0.85% كلوريد الصوديوم) إلى العينات الشكل (60)، ثم تم خلطها بشكل جيد.

كما حضرت عينات Ag-C6F6 بالتراكيز (50-75-100-200-300ppm) باتباع نفس النهج المعمول به سابقاً. حيث تم تحضير مجموعة من عينات القماش المعالج (15 عينة) بهدف دراسة فعالية المركب البوليميري النانوي قبل الغسيل و بعد خمس دورات غسيل وعشرة دورات غسيل. يوضح الشكل (4-11) مجموعة العينات المحضرة. تم تحضير 200 عينة تقريباً للحصول على التخفيف التسلسلي المناسب.





شكل (4-11): صور العينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ للاختبارات الجرثومية الكمية بجراثيم الـ staph.

a: تطبيق اللقاح الجرثومي المخفف على كل عينة وفق التراكيز المدروسة للفضة النانوية.

b: إضافة 100 مل من محلول الفسيولوجي (0.85% كلوريد الصوديوم) إلى العينات المدروسة.

c: خلط المحلول بقوة على جهاز الـ vortex.

حددت نسبة تثبيط الجراثيم بطريقة عد اللوحات بالتخفيف التسلسلي، وفقاً لمعيار AATCC 100-2004

وفق العلاقة التالية:

$$R\% = \frac{(B - A)}{B} \times 100 \quad (5)$$

حيث:

B: عدد المستعمرات على القماش المرجعي (القماش غير المعالج).

A: عدد المستعمرات على القماش المعالج

وذلك عن طريق اخذ 100 ميكرو لتر بعد رج العبوات جيداً وزراعتها على طبق أجار التريبتون الصويا

محضر سابقاً وتحضن لمدة 24 ساعة كما هو موضح بالشكل (4-12).



شكل (4-12): تحديد عدد المستعمرات الجرثومية في طبق الآغار .

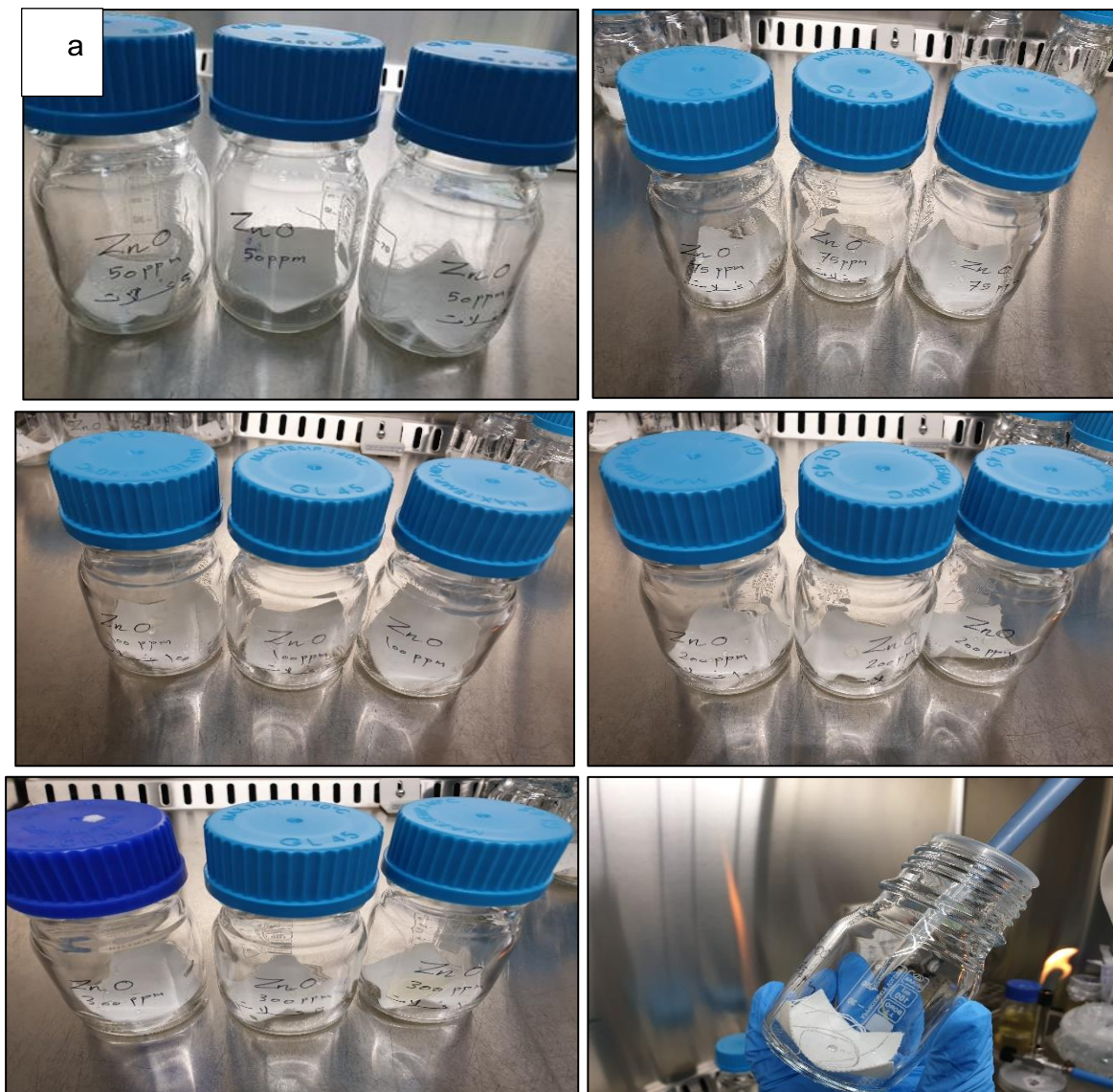
a: محلول مخفف (100 ميكرو لتر) مع سائل فيسيولوجي .

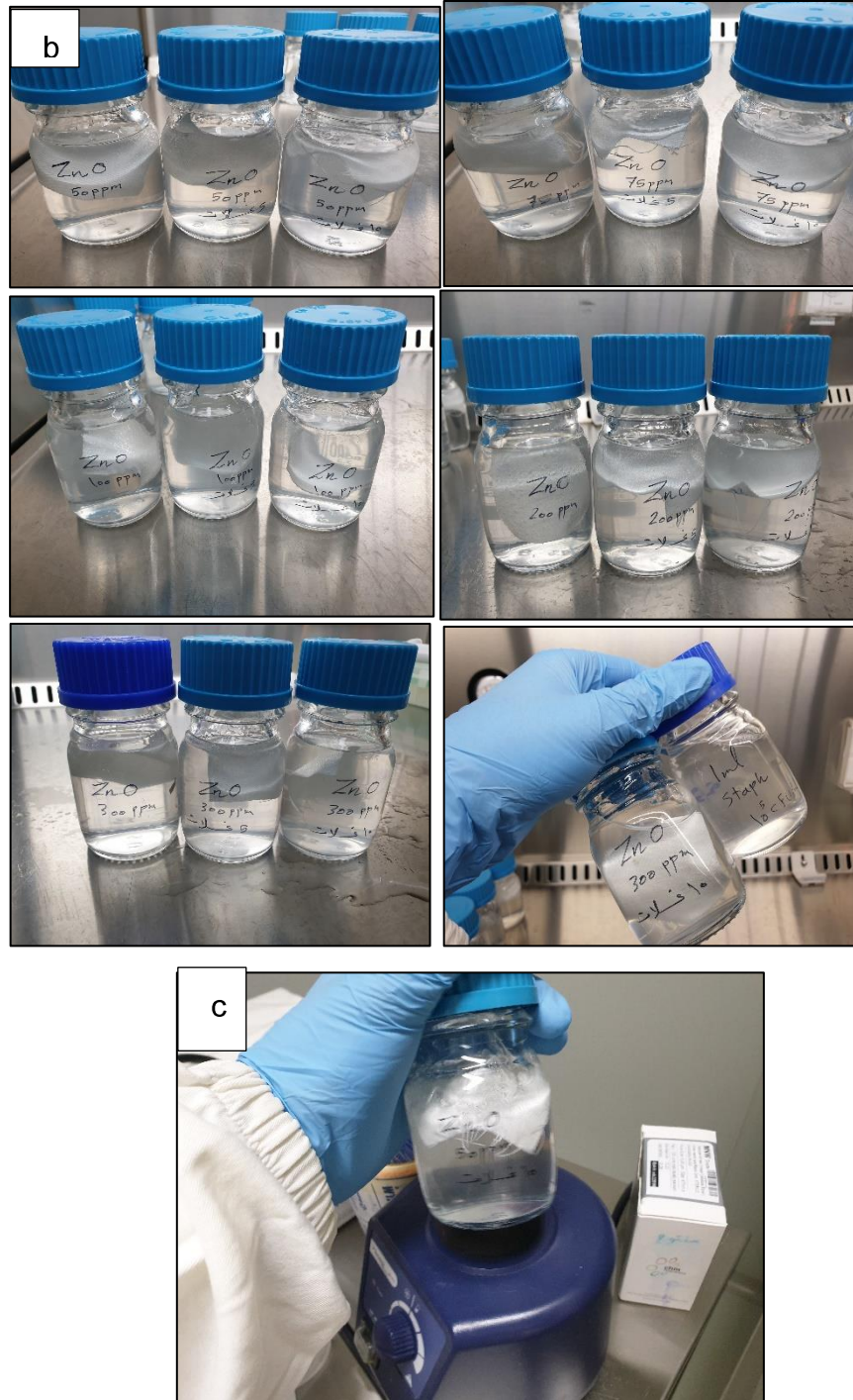
b: زراعة 100 ميكرو لتر من المحلول على طبق TSA.

c: تعداد المستعمرات الجرثومية على جهاز colony counter

كما درست فعالية العينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ وقدرتها على تثبيط جراثيم *E.coli* بنفس الخطوات السابقة.

وكذلك درست فعالية المركب البوليميري النانوي $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ بالتراكيز مختلفة (50-75-100-200-300ppm) باتباع نفس النهج المتبع في دراسة فعالية المركب البوليميري النانوي $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$. يظهر الشكل (13-4) صوراً لمجموعة العينات المحضرة للاختبارات الجرثومية بطريقة كمية لعينات القماش المعالجة بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$.





شكل (4-13): صور العينات المعالجة بـ ZnO-C₆F₆ للاختبارات الجرثومية الكمية لـ staph. a: تطبيق اللقاح الجرثومي المخفف على كل عينة وفق التراكيز المدروسة لأكسيد الزنك النانوي. b: إضافة 100 مل من محلول الفسيولوجي (0.85% كلوريد الصوديوم) إلى العينات المدروسة. c: خلط المحلول بقوة على جهاز vortex.

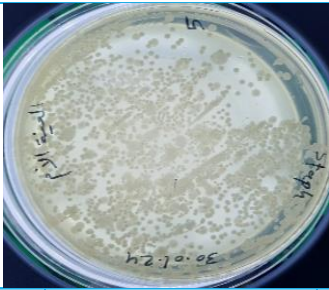
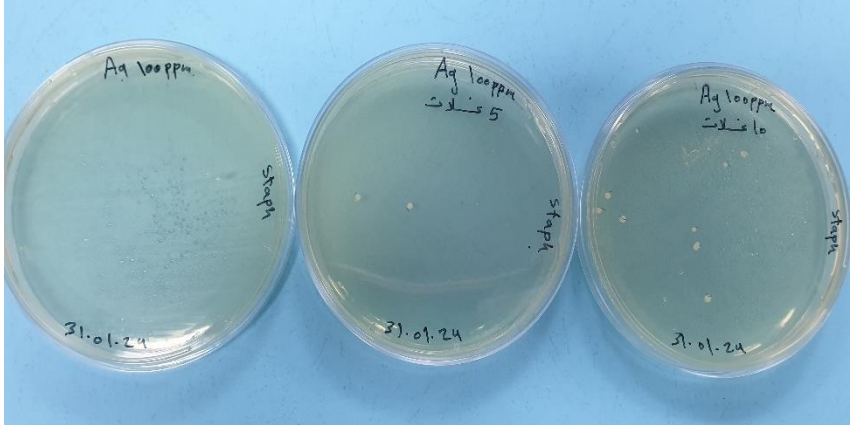
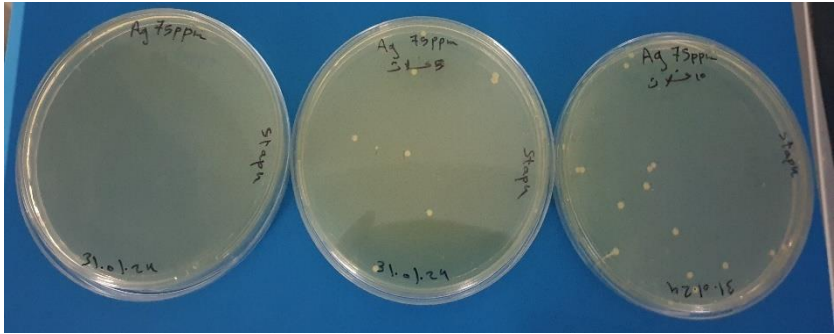
وقدّرت نسبة التثبيط الجرثومي E.coli للعينات القماشية المعالجة بـ zno-C6F6 باتباع نفس العلاقة رقم (5).

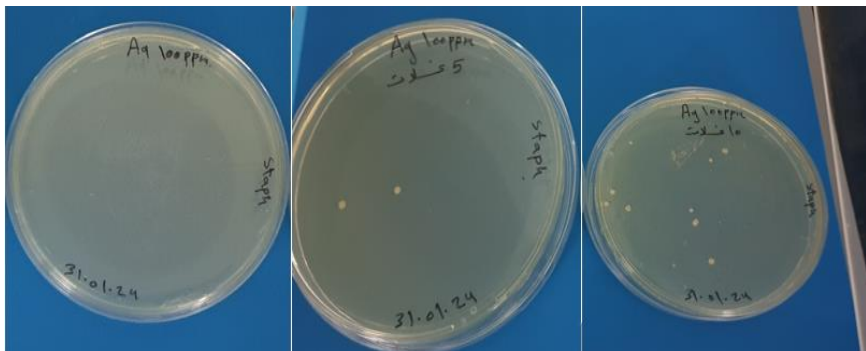
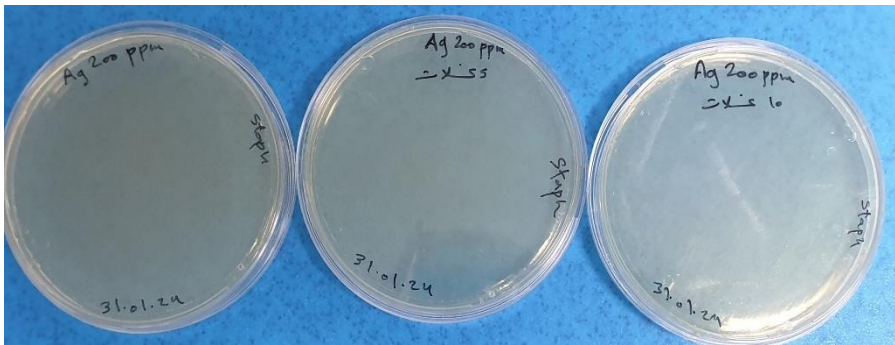
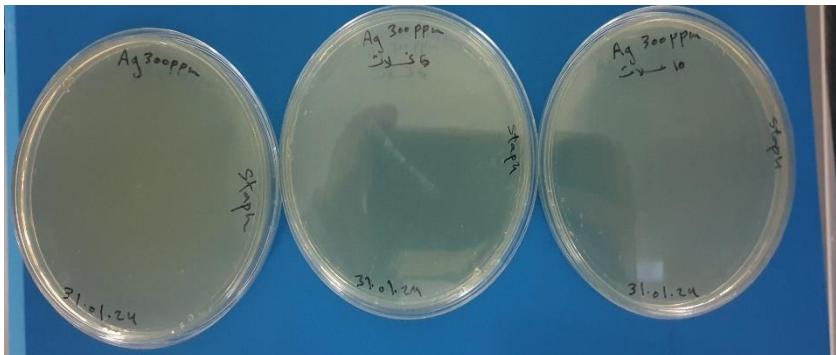
1.2.1.4 اختبار النشاط المضاد للجراثيم لعينات القماش المعالجة بالفضة النانوية والفلورو كربون:

قُيِّمت فعالية أقمشة القطن المعالجة بـ Ag النانوية ضد الجراثيم موجبة الغرام (Staphylococcus aureus) وسلبية الغرام (Escherichia coli) باستخدام طريقة تقييم كمية، وفق المواصفة القياسية -AATCC 100:2004. يوضح الشكل (4-14) القدرة التثبيطية للقماش المعالج بـ Ag-C₆F₆ عند تراكيز مختلفة من محلول الفضة النانوية الغروية المحضرة مسبقاً (50-75-100-200-300ppm) بالنسبة لجراثيم S.aureus وقد أُجريت الاختبارات قبل الغسل وبعد 5 و 10 دورات غسيل، مع مقارنة النتائج بعينة غير معالجة كعينة مرجعية.

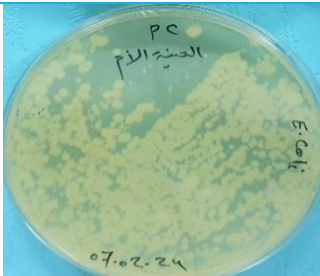
لوحظ تناقص في عدد المستعمرات الجرثومية مع زيادة تركيز الفضة النانوية بدءاً من التركيز المنخفض 50ppm مقارنةً بالعينة المرجعية. مع الحفاظ على فعاليتها الحيوية بعد 10 دورات غسيل، مما يشير إلى فعالية الفضة النانوية الغروية واندماجها جيداً بالقماش.

كما يوضح الشكل (4-15) القدرة التثبيطية للقماش المعالج بـ Ag-C₆F₆ عند تراكيز مختلفة من محلول الفضة النانوية الغروية المحضرة مسبقاً (50-75-100-200-300ppm) بالنسبة لجراثيم E.Coli وقد أُجريت الاختبارات قبل الغسل وبعد 5 و 10 دورات غسيل، مع مقارنة النتائج بعينة غير معالجة كعينة مرجعية.

Staphylococcus aureus	control			
		Before washing	5 washings	10 washings
	50 ppm			
	75 ppm			

<i>Staphylococcus aureus</i>	100 ppm	
	200 ppm	
	300 ppm	

شكل (4-14): صور أطباق بتري للقدرة التثبيطية لعينات الأقمشة القطنية المعالجة بـ $Ag-C_6F_6$ والمعرضة لجراثيم *S.aureus* إيجابية الغرام ، عند تراكيز مختلفة من الفضة النانوية (50,75,100,200,300ppm)، قبل وبعد 5 و10 دورات غسيل.

<i>Escherichia coli</i>	control			
		Before washings قبل الغسيل	5 washings بعد 5 دورات غسيل	10 washings بعد 10 دورات غسيل
	50 ppm			
	75 ppm			

<i>Escherichia coli</i>	100 ppm	
	200 ppm	
	300 ppm	

شكل (4-15): صور أطباق بتري للقدرة التثبيطية لعينات الأقمشة القطنية المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ والمعرضة لجراثيم سالبة الغرام (*Escherichia coli*) ، عند تراكيز مختلفة من الفضة النانوية (50,75,100,200,300ppm)، قبل وبعد 5 و 10 دورات غسيل.

تظهر النتائج تثبيط نمو الجراثيم على الأقمشة المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ بتركيز مختلفة كما هو مدرج بالجدول (1-4) فعالية مضادة قوية وثابتة ضد جراثيم المكورات العنقودية الذهبية (*Staphylococcus aureus*) والإشريكية القولونية (*Escherichia coli*). تبين أن أقل تركيز 50ppm تثبط نمو *S. aureus* بنسبة 98.9% قبل الغسيل، وانخفض التأثير قليلاً إلى 95.0% بعد عشرة دورات غسيل. أما *E. coli* فقد أظهرت تثبيطاً بلغ 90.1% قبل الغسيل وتراجع إلى 79.8% بعد عشر دورات غسيل.

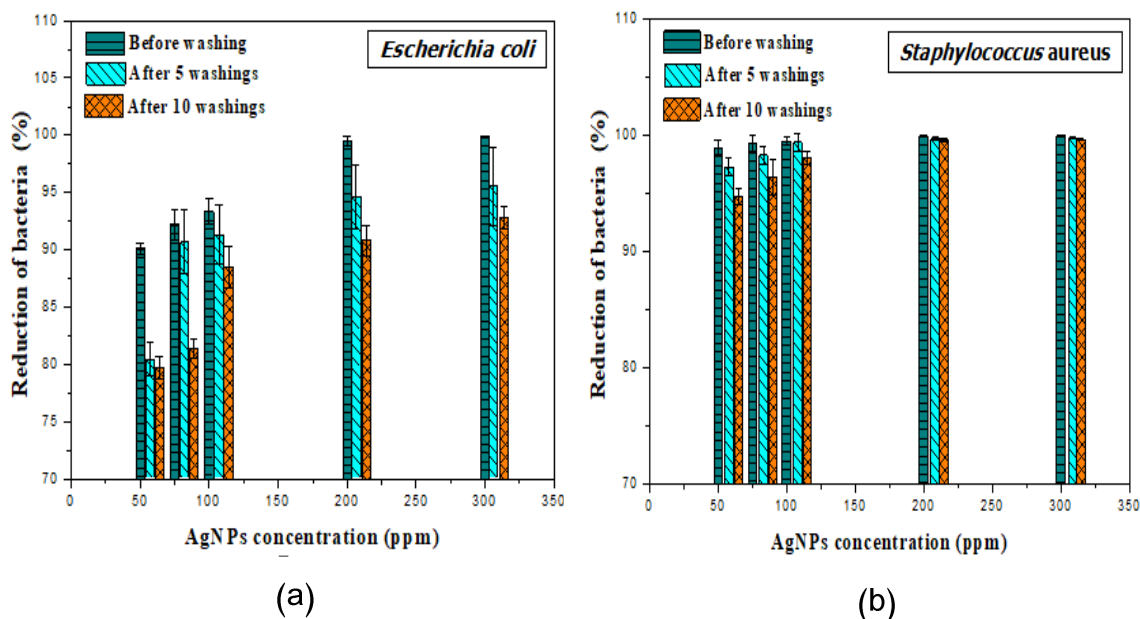
ومع زيادة التركيز إلى 300ppm كان الفعل التثبيطي بنسبة 100% لجراثيم *S. aureus* لجميع دورات الغسيل، في حين انخفض تثبيط نمو *E. coli* من 99.9% إلى 92.8% بعد عشرة دورات غسيل. هذا يشير إلى أن الفضة النانوية عند التراكيز المرتفعة تتسم بترباط قوي مع الألياف النسيجية مما يحافظ على نشاطها الحيوي رغم الغسيل المتكرر.

وكذلك تبقى الفعالية مرتفعة تجاه *S. aureus* حيث أنها لا تقل عن 95% حتى بعد 10 دورات غسيل عند التراكيز المنخفضة، وتبقى قدرتها التثبيطية حوالي 100% عند التراكيز العليا. بالنسبة لـ *E. coli*، في حين تنخفض القدرة التثبيطية بشكل واضح بعد عدد من دورات الغسيل، خاصة عند التراكيز الأقل حيث انخفضت فعالية Ag 50ppm من 90.1% قبل الغسيل إلى 79.8% بعد 10 دورات غسيل. ويعزى الفرق في التأثير إلى أن *S. aureus* تمتلك جداراً سميكاً من الببتيدوغليكان دون غشاء خارجي، ما يجعلها أكثر عرضة لاختراق للفضة النانوية وتأثيرها المباشر حتى مع تكرار الغسيل، بينما تملك *E. coli* سالبية الغرام غشاء خارجي غني بالليبوسكاريدات (LPS) يعزز مقاومتها ويحد من نفاذية الجسيمات النانوية.

جدول (1-4): نسب تثبيط العينات القماشية المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ للجراثيم *Staphylococcus aureus* والجراثيم *Escherichia coli* عند التراكيز (50, 75, 100, 200, 300 ppm) بعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل وفقاً للمواصفة القياسية AATCC 100-2004.

العينة	نسبة تثبيط النمو الجرثومي % bacterial growth reduction, %					
	<i>Staphylococcus aureus</i>			<i>Escherichia coli</i>		
	قبل الغسيل	بعد 5 دورات غسيل	بعد 10 دورات غسيل	قبل الغسيل	بعد 5 دورات غسيل	بعد 10 دورات غسيل
غير معالجة	0	0	0	0	0	0
Ag 50ppm	98.9± 0.7	97.5± 0.7	95.0± 0.7	90.1± 0.5	80.4± 1.5	79.8± 1.0
Ag75ppm	99.3± 0.7	98.4± 0.8	96.7± 1.5	92.2± 1.4	90.6± 2.8	81.5± 0.9
Ag100ppm	99.5± 0.3	99.6± 0.8	98.4± 0.6	93.4± 1.1	91.2± 2.6	88.6± 1.8
Ag 200ppm	99.9± 0.1	99.9± 0.1	99.9± 0.1	99.5± 0.4	94.6± 2.8	90.8± 1.3
Ag 300ppm	100±0 .1	100±0 .1	100±0 .1	99.9± 0.1	95.5± 3.4	92.8± 0.9

أظهرت نسبة تثبيط النمو الجرثومي كدالة للتركيز وعدد دورات الغسيل في الشكل (4-16). حيث يتضح زيادة في تثبيط نمو الجراثيم مع ارتفاع تركيز الفضة النانوية، وتقل الفعالية مع زيادة عدد مرات الغسيل مقارنة بعينة الشاهد غير المعالجة. تم تحقيق تثبيط نمو جراثيم *Staphylococcus aureus* بنسبة تزيد عن 97% و *Escherichia coli* بنسبة تزيد عن 90% عند تركيز 50ppm في العينات غير المغسولة. في حين زادت عن 98% لجراثيم *S. aureus* و 92% لجراثيم *E. coli* عند التراكيز الأعلى (75-100-200-300ppm) في كل من العينات غير المغسولة والعينات بعد عشر دورات غسيل.



شكل (4-16): مخطط بياني لنسبة تثبيط النمو الجرثومي للأقمشة المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ بتركيز مختلفة من الفضة النانوية (50-75-100-200-300ppm) بعد 5 دورات غسيل وبعد 10 دورات غسيل.

a: نسبة تثبيط النمو الجرثومي لجراثيم *Staphylococcus aureus*

تعزيز فعالية تثبيط الجراثيم لجسيمات الفضة النانوية بشكل رئيسي إلى خاصية إطلاق أيونات الفضة (Ag^+)، التي يمكنها تعطيل الخلايا الجرثومية بفاعلية حتى في حالة التداخل الجزئي مع الأغشية الخلوية أو وجود حواجز حيث أن الأيونات النشطة تتفاعل مباشرة مع مكونات الخلايا الجرثومية، مسببة أضراراً كبيرة في الأغشية والبروتينات، مما يؤدي إلى تثبيط نمو الجراثيم وموتها.

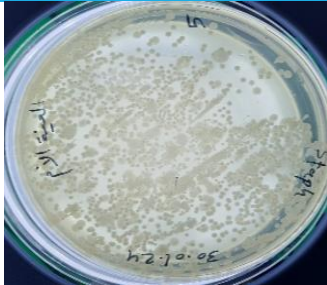
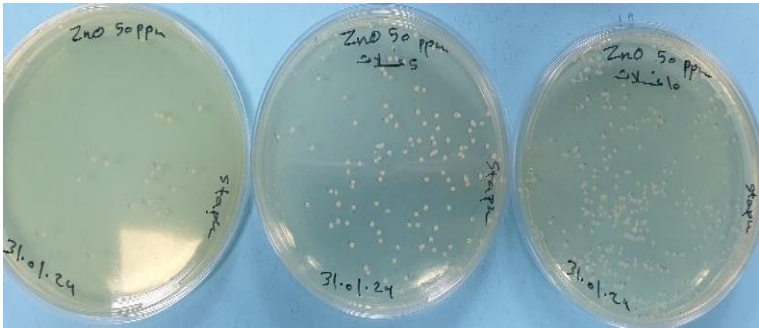
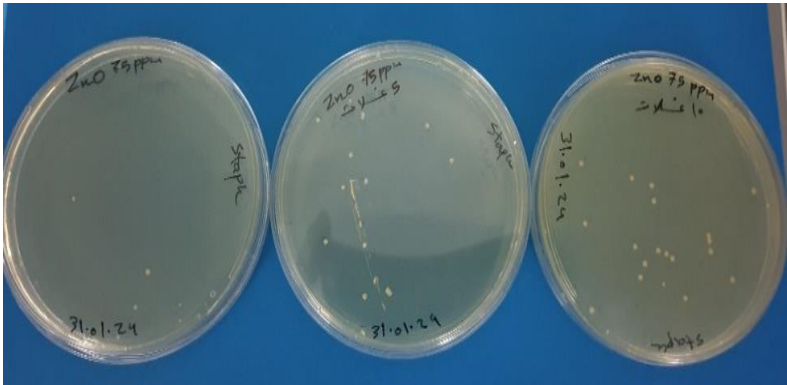
تستطيع جسيمات الفضة النانوية إطلاق أيونات الفضة باستمرار، والتي يمكن اعتبارها الآلية الرئيسية لقتل الميكروبات. وبفضل الجذب الكهروستاتيكي والتفضيل للارتباط بالبروتينات وتثبيتها، يمكن لأيونات الفضة الالتصاق بجدار الخلية والغشاء السيتوبلازمي. تعمل الأيونات الملتصقة على زيادة نفاذية الغشاء

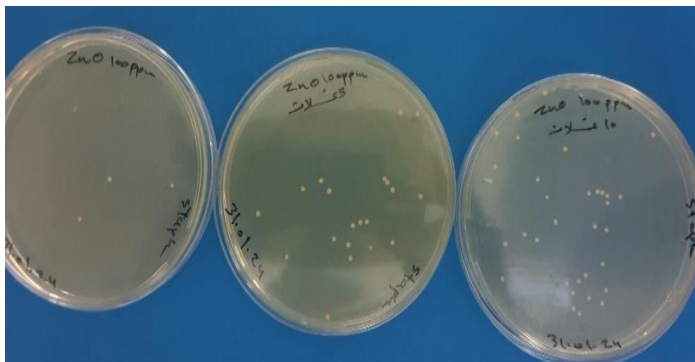
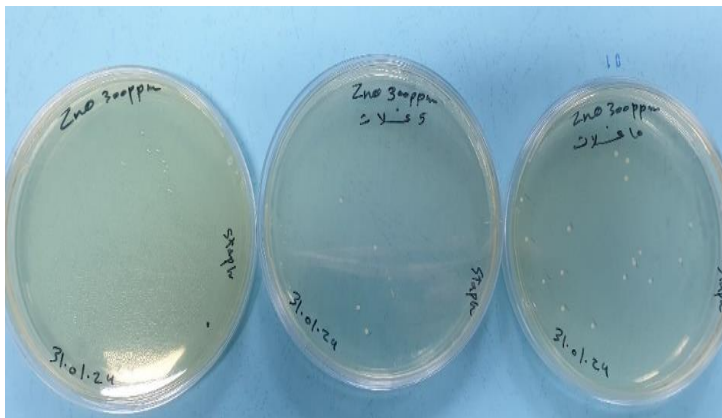
السيتوبلازمي مما يؤدي إلى تعطيل الغلاف الجرثومي. عقب دخول أيونات الفضة الحرة إلى داخل الخلايا، يمكن تعطيل إنزيمات التنفس ويتم إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية التي توقف إنتاج أدينوسين ثلاثي الفوسفات. تعد أنواع الأكسجين التفاعلية عاملاً رئيسياً في إثارة اضطراب الغشاء الخلوي وتعديل الحمض النووي (DNA). بالإضافة إلى ذلك، يمكن لأيونات الفضة تثبيط تخليق البروتينات من خلال تغيير تركيب الرايبوسومات في السيتوبلازم. بجانب قدرتها على إطلاق أيونات الفضة، يمكن لجسيمات الفضة النانوية نفسها قتل الجراثيم وذلك وفقاً للمرجع (Zhao & Mei, 2020).

إن التأثير على بروتينات الغشاء والإجهاد التأكسدي الناتج عن جسيمات الفضة النانوية هما الآليتان الرئيسيتان المسؤولتان عن النشاط المضاد للميكروبات (Yan et al., 2018).

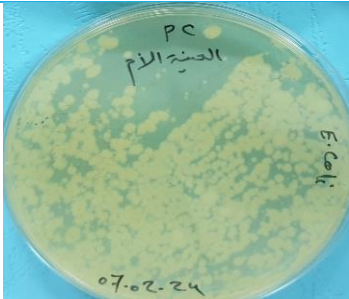
2.2.1.4 النشاط المضاد للجراثيم لعينات القماش المعالجة بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$:

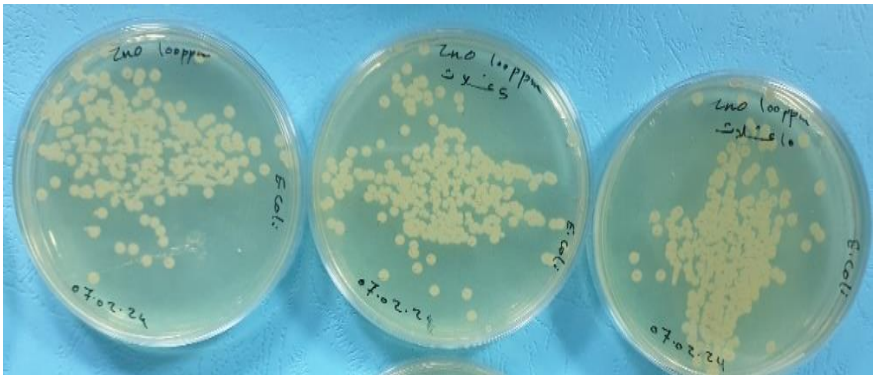
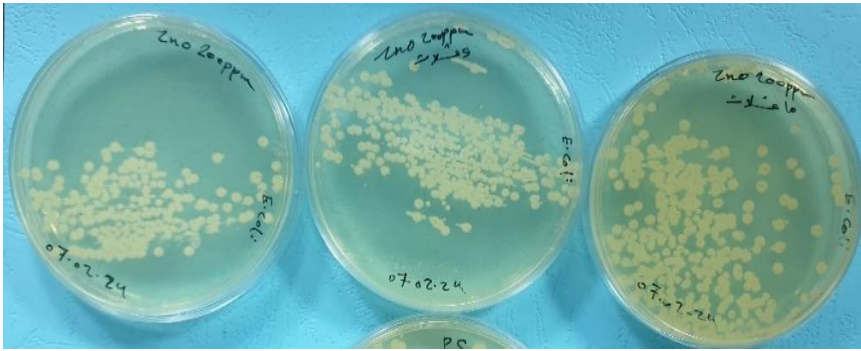
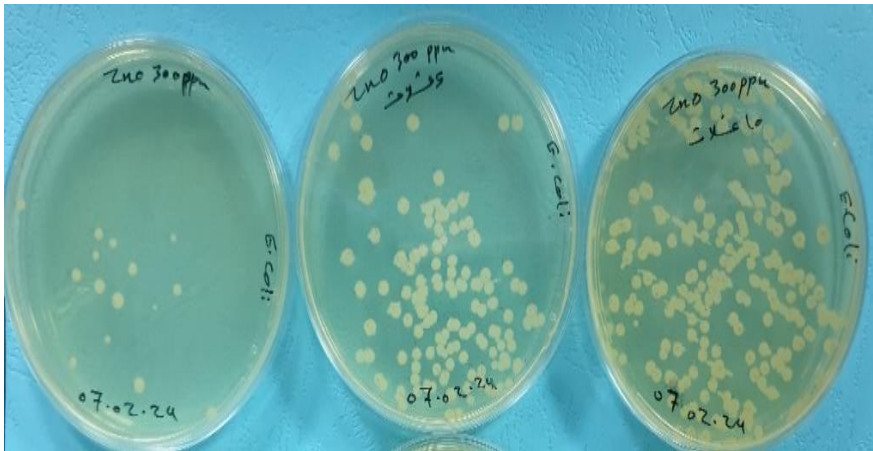
قيمت فعالية أقمشة القطن المعالجة سطحياً بجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO-NPs) ضد الجراثيم موجبة الغرام (*S. aureus*) وسالبة الغرام (*E. coli*) باستخدام تقييم كمي للنشاط المضاد للجراثيم وفق معيار AATCC-100. أوضح الشكل (4-17) النشاط المضاد لجراثيم (*S. aureus*) للنسيج المعالج عند تراكيز مختلفة من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (50-75-100-200-300ppm) بينما يوضح الشكل (4-18) النشاط المضاد لجراثيم (*E. coli*) للنسيج المعالج عند تراكيز مختلفة من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (50-75-100-200-300ppm). أُجريت الاختبارات قبل وبعد 5 و 10 دورات غسيل، وتمت مقارنة النتائج مع عينة غير المعالجة كعينة ضابطة. لوحظ انخفاض في عدد مستعمرات الجراثيم مع زيادة تركيز جسيمات أكسيد الزنك النانوية، وبدأ هذا الانخفاض بشكل ملحوظ عند تركيز 50ppm مقارنةً بالعينة الضابطة. بالإضافة إلى ذلك، بقيت الفعالية المضادة للجراثيم محفوظة حتى بعد 10 مرات من الغسيل بفضل دور مركب C_6F_6 في تعزيز ثبات جسيمات أكسيد الزنك، مما يساعد في الحفاظ على النشاط المضاد للجراثيم خلال الغسيل المتكرر.

<i>Staphylococcus aureus</i>	control			
		Before washing قبل الغسيل	5 washings بعد 5 دورات غسيل	10 washings بعد 10 دورات غسيل
	50 ppm			
	75 ppm			

<i>Staphylococcus aureus</i>	100 ppm	
	200 ppm	
	300 ppm	

شكل (4-17): صور أطباق بترى للقدرة التثبيطية للأقمشة القطنية المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ ضد الجراثيم موجبة الغرام (*Staphylococcus aureus*) ، عند تراكيز مختلفة من جسيمات الفضة النانوية (50,75,100,200,300ppm)، قبل وبعد 5 و 10 دورات غسيل.

<i>Escherichia coli</i>	control			
		Before washing قبل الغسيل	5 washings بعد 5 دورات غسيل	10 washings بعد 10 دورات غسيل
	50 ppm			
	75 ppm			

<i>Escherichia coli</i>	100 ppm	
	200 ppm	
	300 ppm	

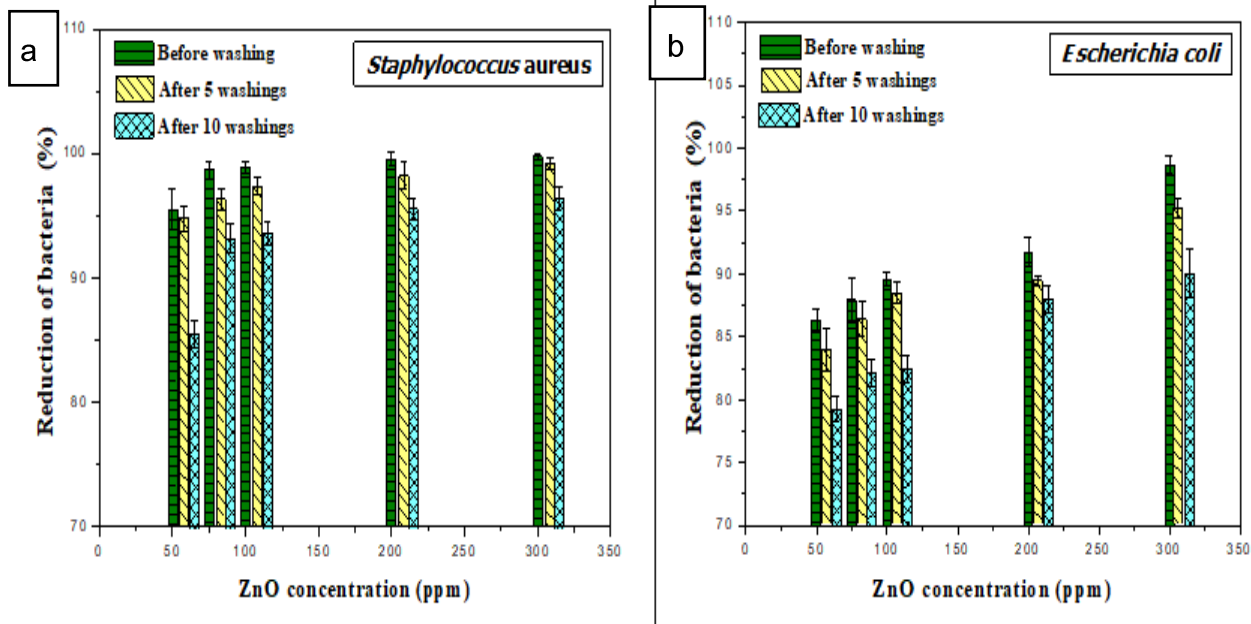
شكل (4-18): صور أطباق بتري للقدرة التثبيطية للأقمشة القطنية المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ ضد الجراثيم سالبة الغرام (*Escherichia coli*) ، عند تراكيز مختلفة من جسيمات الفضة النانوية (50,75,100,200,300ppm) ، قبل وبعد 5 و 10 دورات غسيل.

أظهرت نتائج نسبة تخفيض نمو الجراثيم للأقمشة المعالجة بجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO) بتركيز مختلفة (50-75-100-200-300ppm) والتي تم اختبارها قبل وبعد 5 و 10 مرات غسيل في الجدول (4-62). يتضح أن جميع العينات أظهرت نشاطاً فعالاً ضد نمو جراثيم *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* قبل وبعد الغسيل. في العينات غير المغسولة وبتركيز 50ppm من جسيمات أكسيد الزنك، تم تحقيق تخفيض في نمو جراثيم *S.aureus* بنسبة 95.5% و *E. coli* بنسبة 86.3%. ومع ذلك، انخفض هذا التأثير مع زيادة عدد دورات الغسيل، حيث انخفض إلى 70.9% لجراثيم *S. aureus* و 73.9% لجراثيم *E. coli* بعد 10 دورات غسيل. أما عند استخدام تركيز 300ppm من جسيمات أكسيد الزنك، فقد نتج عنه تخفيض بنمو مستعمرات جراثيم *S.aureus* بنسبة 99.8%، والتي انخفضت إلى 96.6% بعد 10 دورات غسيل، في حين لوحظ تخفيض بنسبة 98.7% في مستعمرات جراثيم *E. coli* وانخفض إلى 90% بعد 10 دورات غسيل.

جدول (4-2): نسب تثبيط العينات القماشية المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ وفقاً للمواصفة القياسية AATCC 100-2004 ضد كل من الجراثيم موجبة الغرام *Staphylococcus aureus* والجراثيم سالبة الغرام *Escherichia coli* عند التراكيز (50, 75, 100, 200, 300 ppm) بعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل

نسبة تثبيط نمو الجراثيم، % bacterial growth reduction						
العينة	Staphylococcus aureus			Escherichia coli		
	قبل الغسيل	بعد 5 دورات غسيل	بعد 10 دورات غسيل	قبل الغسيل	بعد 5 دورات غسيل	بعد 10 دورات غسيل
غير معالجة	0			0		
zno 50ppm	95.5±1.6	94.9±1.0	85.7±1.1	86.3±0.9	83.9±1.7	79.3±1.0
zno75ppm	98.7±0.7	96.5±0.9	93.4±1.2	87.9±1.7	86.3±1.3	82.2±1.1
zno100ppm	98.9±0.5	97.5±0.7	93.9±0.9	89.6±0.5	88.4±0.8	82.5±1.1
zno 200ppm	99.6±0.5	98.4±1.0	95.8±0.8	91.7±1.2	89.4±0.4	88.0±1.0
zno 300ppm	99.8±0.2	99.3±0.5	96.6±0.9	98.7±0.7	95.2±0.8	90.0±1.9

أظهرت نسبة تثبيط نمو الجراثيم كدالة للتركيز وعدد دورات الغسيل في الشكل (4-19). حيث يتضح زيادة في تقليل نمو الجراثيم مع ارتفاع تركيز جسيمات أكسيد الزنك النانوية، وتقل الفعالية مع زيادة عدد دورات مقارنة بعينة الشاهد غير المعالجة. تم تحقيق تقليل نمو جراثيم *Staphylococcus aureus* بنسبة تزيد عن 95% و *Escherichia coli* بنسبة تزيد عن 86% عند تركيز 50ppm في العينات غير المغسولة. بالإضافة إلى ذلك، تم الحصول على تخفيض يزيد عن 93% لجراثيم *S. aureus* وأكثر من 82% لجراثيم *E. coli* عند تراكيز أعلى (75-100-200-300ppm) في كل من العينات غير المغسولة والعينات التي تم غسلها حتى عشر دورات غسيل.



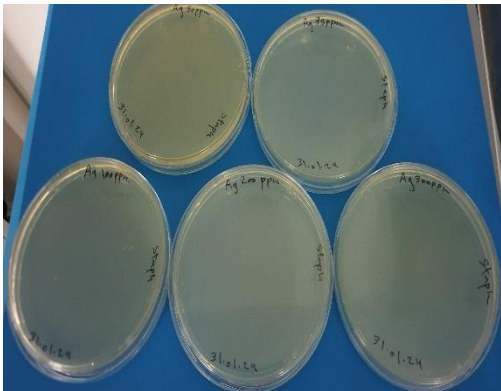
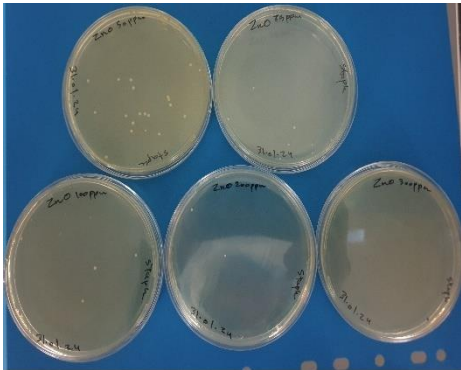
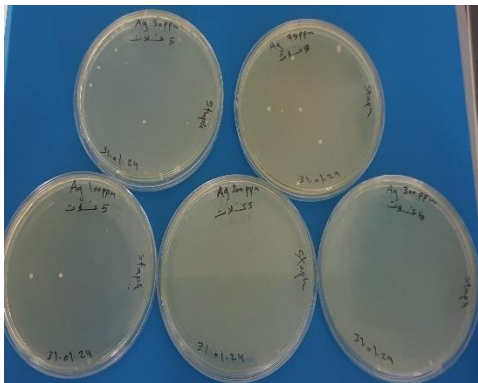
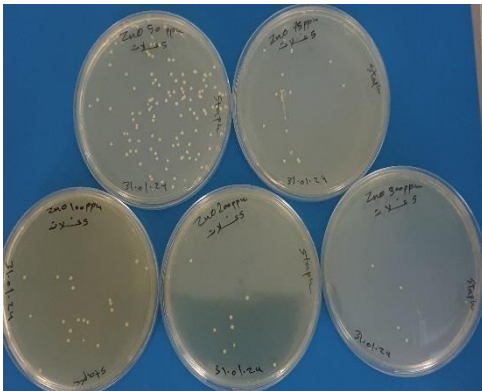
شكل (4-19): مخطط بياني لنسبة تثبيط النمو الجرثومي للأقمشة المعالجة للأقمشة المعالجة بـ ZnO- C_6F_6 بتركيزات مختلفة لـ ZnO (50-75-100-200-300ppm) بعد 5 دورات غسيل وبعد 10 دورات غسيل

a: نسبة تخفيض النمو الجرثومي لجراثيم *Staphylococcus aureus*

يلاحظ بوضوح أن الجراثيم سالبة الغرام (*Escherichia coli*) أقل حساسية لجسيمات أكسيد الزنك النانوية مقارنةً بالجراثيم موجبة الغرام (*Staphylococcus aureus*) ، وهو ما يتوافق مع الدراسات السابقة (Kalra et al., 2022)(Gudkov et al., 2021). يعود ذلك إلى اختلاف تركيب جدار الخلية بين هذين النوعين من الجراثيم. على عكس الجراثيم موجبة الغرام، يحتوي جدار الجراثيم سالبة الغرام على غشاء خارجي إضافي يحتوي على الليببوليسكاريديات (LPS) (Mikheyeva et al., 2023). أظهرت الدراسات أن هذه الليببوليسكاريديات تعزز من خصائص الحاجز للغشاء الخارجي، مما يزيد من مقاومة الجراثيم. يعزى النشاط المضاد للجراثيم لجسيمات أكسيد الزنك النانوية إلى عدة آليات (Mendes et al., 2022)، منها إطلاق أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) التي تحفز الإجهاد التأكسدي مما يؤدي إلى تثبيط تخليق البروتين ونسخ الحمض النووي (DNA) . كما يمكن لجسيمات ZnO أن تتلف الغشاء السيتوبلازمي من خلال إطلاق أيونات Zn^{+2} التي تسبب تدمير الغشاء ودخول الجسيمات النانوية إلى داخل الخلايا الجرثومية.

يوضح الشكل (4-20) مقارنة النشاط المضاد للجراثيم بين العينات المعالجة بـ $Ag-C_6F_6$ والعينات المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ عند التراكيز المدروسة وذلك قبل الغسيل وبعد 5 دورات غسيل و10 دورات غسيل وذلك ضد الجراثيم موجبة الغرام *Staphylococcus aureus*.

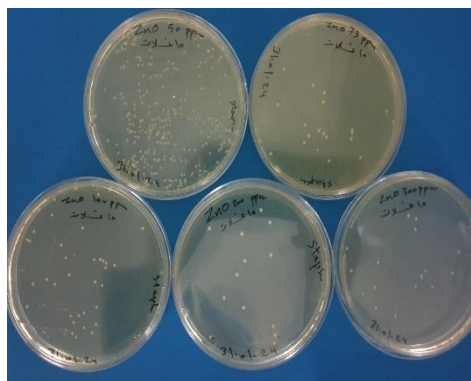
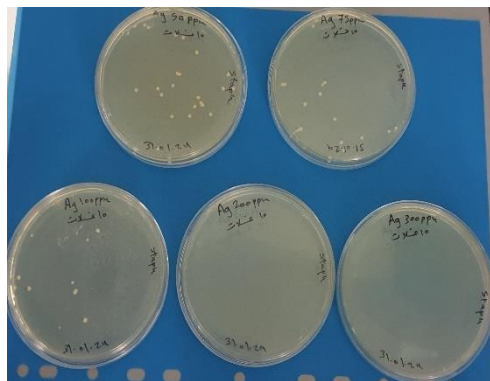
Staphylococcus aureus

المعالجة	عينات معالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$	عينات معالجة بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$
قبل الغسيل		
بعد خمس دورات غسيل		

بعد عشر

دورات

غسيل



شكل (4-20): مقارنة النشاط التثبيطي للجراثيم بين العينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ والعينات المعالجة بـ $\text{Zno-C}_6\text{F}_6$ عند التراكيز المدروسة وذلك قبل الغسيل وبعد 5 دورات غسيل و10 دورات غسيل وذلك ضد الجراثيم موجبة الغرام

كما يوضح الشكل (4-21) مقارنة النشاط التثبيطي للجراثيم بين العينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ والعينات المعالجة بـ $\text{Zno-C}_6\text{F}_6$ عند التراكيز المدروسة وذلك قبل الغسيل وبعد 5 دورات غسيل و10 دورات غسيل

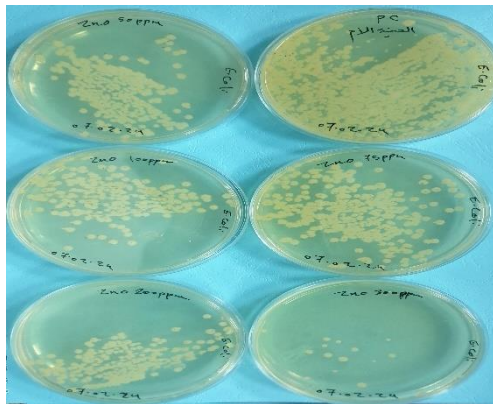
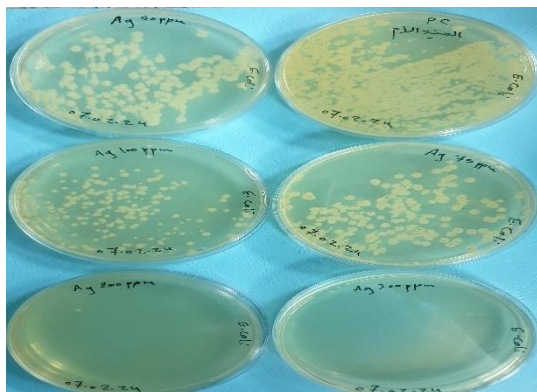
وذلك ضد الجراثيم سالبة الغرام *Escherichia coli*

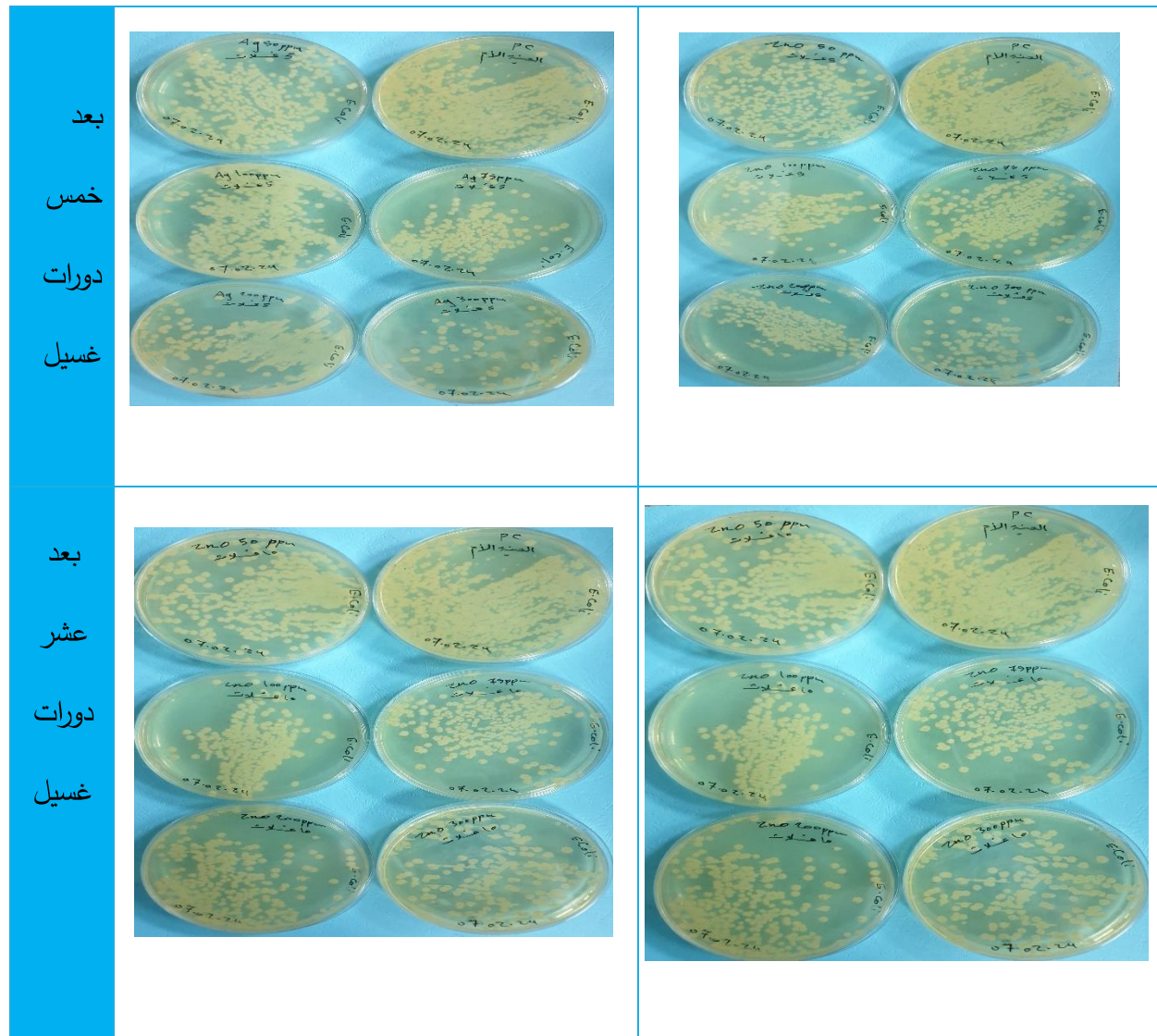
Escherichia coli

عينات معالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ عينات معالجة بـ $\text{Zno-C}_6\text{F}_6$

قبل

الغسيل





شكل (4-21): مقارنة النشاط المضاد للجراثيم بين العينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ والعينات المعالجة بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ عند التراكيز المدروسة وذلك قبل الغسيل وبعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل وذلك ضد الجراثيم سالبة الغرام

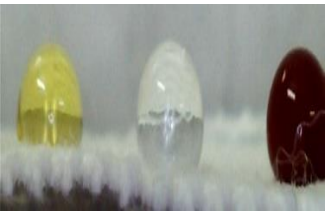
2.4 دراسة الخواص ذاتية التنظيف لعينات القماش المدروس:

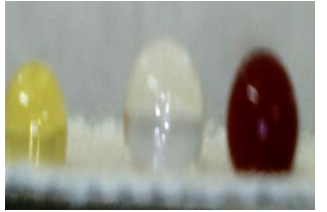
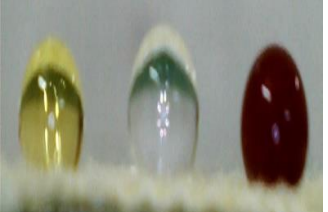
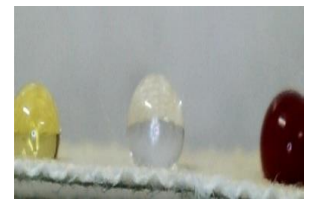
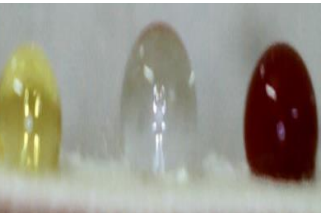
لدراسة مقاومة القماش لامتصاص السوائل وتقييم مدى ثبات خاصية الطرد المائي قيمت خاصية الطرد المائي للسطح (Hydrophobicity) بقياس زاوية تماس الماء (Water Contact Angle, WCA) على عينات القماش المعالجة، على أنواع مختلفة من السوائل ماء، و لزييت، ودم ، وتم أخذ صورة القطرة بواسطة المجهر

الضوئي (Micro Capture 2.5) كما في الشكل (4-22) قيست زاوية التماس باستخدام برنامج IMAGE لفي ثلاثة أماكن مختلفة على السطح وقدر متوسط الزاوية والانحراف المعياري.

1.2.4 اختبار القطرة السائلة للعينات القماش المعالج بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$:

أظهرت الفضة النانوية، عند دمجها مع الفلوروكربون السداسي (C_6F_6) ، تغييراً في خشونة السطح وإيجاد بنية (ميكروية-نانوية) تعزز حالة كاسي-باكستر التي تتموضع فيها القطرات على السطح دون أن تنتشر، مما يزيد من زاوية تماس الماء ويمنح القماش خصائص طاردة للسوائل فائقة الأداء. كما بينت النتائج أن زاوية التماس تحافظ على قيمها تقريباً حتى بعد 5 و 10 دورات غسيل ، مما يؤكد ثباتية المعالجة وفعاليتها في ظروف الاستخدام المختلفة.

التركيز	Unwashed	5 washings	10 washings
50 ppm			
75 ppm			

100 ppm			
200 ppm			
300 ppm			

شكل (4-22): اختلاف زاوية التماس لقطرات من سوائل مختلفة (الدم، الماء، وزيت الزيتون) على سطح القماش الفليني المعالج بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ عند تراكيز مختلفة من الفضة النانوية (50ppm، 75، 100، 200، 300) قبل الغسيل وبعد 5 و 10 دورات غسيل.

تعتبر زاوية التماس مؤشراً حاسماً على درجة طرد الماء من السطح. يصبح السطح محباً للماء فإذا كانت زاوية التماس أقل من 90 درجة يكون السطح محباً للماء وعندما تكون أكبر من 90 درجة يكون كارهاً للماء وعندما تزيد عن 150 درجة يكون فائق الكراهية للماء.

تم قياس قيم زاوية التماس لثلاث سوائل مختلفة: الدم والماء وزيت الزيتون، وتم تقييم متانة المعالجة بعد 5 و 10 دورات غسيل كما هو موضح في الجدول (4-3).

جدول (3-4): زوايا التماس لقطرة (دم- ماء- زيت) لأقمشة القطن المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ عند تراكيز Ag (50, 75, 100, 200, 300 ppm) قبل الغسيل و بعد 5 دورات غسيل و 10 دورات غسيل

قطرة دم (Blood)			
تركيز Ag-NPs	unwashed	5 washings	10 washings
50 ppm	$126.9 \pm 2.4^\circ$	$123.9 \pm 1.1^\circ$	$120.2 \pm 1.7^\circ$
75 ppm	$139.8 \pm 2.1^\circ$	$132.7 \pm 2.0^\circ$	$130.8 \pm 1.1^\circ$
100 ppm	$140.8 \pm 1.9^\circ$	$136.8 \pm 1.9^\circ$	$135.2 \pm 2.2^\circ$
200 ppm	$144.5 \pm 1.7^\circ$	$140.0 \pm 2.4^\circ$	$138.2 \pm 2.3^\circ$
300 ppm	$149.1 \pm 3.1^\circ$	$146.1 \pm 1.2^\circ$	$144.9 \pm 1.2^\circ$
قطرة ماء (Water)			
تركيز Ag-NPs	unwashed	5 washings	10 washings
50 ppm	$131.6 \pm 2.0^\circ$	$127.3 \pm 2.3^\circ$	$124.0 \pm 2.4^\circ$
75 ppm	$141.8 \pm 2.1^\circ$	$129.5 \pm 2.5^\circ$	$131.8 \pm 1.3^\circ$
100 ppm	$142.1 \pm 2.2^\circ$	$139.5 \pm 2.5^\circ$	$137.9 \pm 2.0^\circ$
200 ppm	$146.8 \pm 3.0^\circ$	$140.9 \pm 2.9^\circ$	$139.9 \pm 2.9^\circ$
300 ppm	$147.9 \pm 3.3^\circ$	$147.1 \pm 3.0^\circ$	$145.6 \pm 3.4^\circ$
قطرة زيت زيتون (Olive Oil)			
تركيز Ag-NPs	unwashed	5 washings	10 washings
50 ppm	$132.8 \pm 2.6^\circ$	$126.6 \pm 1.9^\circ$	$122.8 \pm 1.7^\circ$
75 ppm	$137.1 \pm 2.9^\circ$	$133.5 \pm 2.3^\circ$	$132.5 \pm 2.3^\circ$

100 ppm	$^{\circ}138.0 \pm ^{\circ}3.4$	$^{\circ}135.6 \pm ^{\circ}2.8$	$^{\circ}134.7 \pm ^{\circ}2.5$
200 ppm	$^{\circ}144.2 \pm ^{\circ}2.8$	$^{\circ}141.4 \pm ^{\circ}2.0$	$^{\circ}137.7 \pm ^{\circ}2.5$
300 ppm	$^{\circ}146.9 \pm ^{\circ}2.4$	$^{\circ}144.2 \pm ^{\circ}1.5$	$^{\circ}142.6 \pm ^{\circ}2.6$

أظهرت النتائج زيادة واضحة في خاصية الطرد المائي مع زيادة تراكيز الفضة النانوية المختلفة. بالنسبة لعينات الدم ازدادت زاوية التماس من $^{\circ}126.9 \pm ^{\circ}2.4$ للعينات غير المغسولة عند تركيز 50ppm، وتتناقص تدريجياً بعد 5 دورات غسيل إلى $^{\circ}123.9 \pm ^{\circ}1.1$ (بنسبة 2.36%)، ثم إلى $^{\circ}120.1 \pm ^{\circ}1.7$ (بنسبة 5.36%) بعد 10 دورات غسيل. وعند التركيز الأعلى 300 ppm كانت زاوية التماس قبل الغسيل $^{\circ}149.1 \pm ^{\circ}3.1$ ، وتناقصت إلى $^{\circ}146.2 \pm ^{\circ}1.2$ (بنسبة 1.96%) بعد 5 دورات غسيل، وإلى $^{\circ}144.8 \pm ^{\circ}1.4$ (بنسبة 2.91%) بعد 10 دورات غسيل وتعزى زاوية التماس المرتفعة لقطرات الدم مقارنة بالماء الأخرى يتمتع بلزوجة مرتفعة ولزوجة ديناميكية تفوق الماء بـ 3-4 مرات. وتفسر زاوية التماس العالية بعد 10 دورات غسيل $WCA=144.8^{\circ}$ للقماش المعالج عند تركيز 300 ppm مقابل $^{\circ}120.1$ عند 50 ppm AgNPs نتيجة تشكل الجيوب هوائية مستقرة (air pockets) تحمي القماش من الاختراق العميق وفق نموذج Cassie-Baxter المعمم للسوائل اللزجة.

ما يجعل الأقمشة المعالجة عند هذا التركيز مثاليا لغطاء سرير قرح الفراش الذي يعرض للدم والإفرازات الجلدية بشكل يومي.

وفيما يخص عينات الماء، لوحظت زوايات تماس تراوحت بين $^{\circ}131.6 \pm ^{\circ}2.0$ عند تركيز 50ppm و $^{\circ}147.8 \pm ^{\circ}3.3$ عند تركيز 300ppm في العينات غير المغسولة مما يشير إلى انتقال من الهيدروفوبية

العادية إلى الهيدروفوبية الفائقة (قريبة من 150 °) نتيجة زيادة كثافة الهيكل النانوي السطحي الذي يعزز احتجاز الهواء بموجب نموذج (Cassie-Baxter).

عند 50ppm تناقصت الزوايا بعد 5 دورات غسيل إلى $127.3 \pm 2.3^\circ$ (بنسبة 3.29%)، واستمرت في التناقص بعد 10 مرات غسيل إلى $124.0 \pm 2.4^\circ$ (بنسبة 5.77%). أما عند 300ppm، فكان التناقص أقل حدة حيث تراجعت الزوايا إلى $147.1 \pm 3.0^\circ$ بعد 5 دورات غسيل فقط (بنسبة 0.47%)، وإلى $145.6 \pm 3.4^\circ$ بعد 10 دورات غسيل (بنسبة 1.49%). عند تركيز 50ppm، يتشكل هيكل نانوي رقيق وقليل الكثافة، مما يجعل طبقة الفلوروكربون عرضة للإزالة السريعة أثناء الغسيل (AATCC 61)، بالإضافة إلى تآكل الهيكل السطحي النانوي نفسه، مما يقلل مساحة الهواء المحتجز ويؤدي إلى انخفاض حاد في WCA من 131.6° إلى 124.0° بعد 10 دورات غسيل، بنسبة 5.77%. أما عند تركيز 300ppm، فإن الطبقة النانوية أكثر سماكة، توفر مقاومة ميكانيكية عالية ضد الاحتكاك والمواد المنظفة، مع الحفاظ على كثافة الجيوب الهوائية، فتتخفص WCA بدرجة ضئيلة جدا (من 147.8° إلى 145.6° ، بنسبة 1.49%)، محققة استقراراً فائقاً يتجاوز 90% من الهيدروفوبية الأصلية حتى بعد 10 دورات غسيل.

وبالنسبة لعينات زيت الزيتون تظهر النتائج نمطاً مشابهاً للماء حيث أنه عند تركيز 50ppm، انخفضت زاوية التماس من $132.8 \pm 2.6^\circ$ إلى $126.6 \pm 1.9^\circ$ بعد 5 دورات غسيل تناقصت (بنسبة 4.68%)، وإلى $122.8 \pm 1.7^\circ$ بعد 10 دورات غسيل (بنسبة 7.53%). عند تركيز 300ppm، تناقصت الزوايا إلى $144.2 \pm 1.5^\circ$ بنسبة (1.84%) و $142.6 \pm 2.6^\circ$ (بنسبة 2.91%) بعد 5 و 10 دورات غسيل على التوالي.

تشير النتائج إلى اتجاه واضح مع زيادة تركيز جزيئات الفضة النانوية، تزداد خاصية الطرد المائي للألياف القطن. لوحظ أن أعلى تركيز للفضة النانوية 300ppm حقق أعلى قيم لزاوية تماس الماء عبر جميع السوائل

ودورات الغسيل، محافظاً على أعلى درجة من الطرد المائي حتى بعد 10 دورات غسيل. هذا يشير إلى أن التركيز العالي للفضة النانوية لا يعزز الطرد المائي فقط، بل يحسن أيضاً من ثبات المعالجة. مما يشير إلى أن الطبقة النانوية الكثيفة لا تحسن الطرد السائلي فحسب، بل توفر أيضاً ثباتية ميكانيكية فائقة ضد الغسيل المتكرر، وهو مثالي لتطبيقات المنسوجات الطبية المعرضة للسوائل الدهنية مثل العرق والزيوت الجلدية.

وعند مقارنة النتائج بين السوائل المختلفة، أظهر الماء أعلى قيم لزوجة التماس بعد الغسيل، وهو ما يمكن تفسيره بتوتره السطحي العالي ($\text{Surface tension} = 72.8 \text{ mN/m}$) مقارنة بالدم الذي يمتلك توتراً سطحياً يتراوح بين (55-60 mN/m)، مما يدل على أن طبيعة السائل تؤثر بشكل كبير على خاصية الطرد المائي لألياف القطن المعالجة.

يشير سلوك القطرات على القماش المعالج إلى تعديل ناجح للسطح لجعله مقاوماً للبلل، مما يقلل من امتصاص السوائل. وتعد هذه الخاصية حيوية في التطبيقات التي تتطلب أقصى درجات النظافة مثل الأقمشة الطبية، لأنها تمنع تسرب سوائل الجسم والملوثات الأخرى، وبالتالي تقلل من خطر انتقال العدوى.

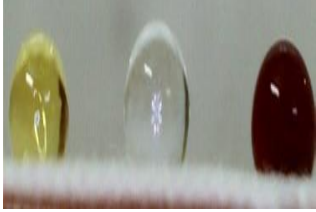
بشكل عام، توفر الفضة النانوية معالجة فعالة تجمع بين خاصية الطرد المائي والاستدامة في الأداء تحت ظروف الاستخدام المتكررة.

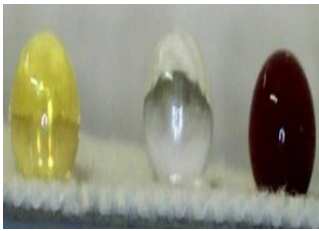
2.2.4 اختبار القطرة السائلة للعينات القماش المعالج بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$:

تظهر الصور المأخوذة لقطرات من سوائل مختلفة (الدم، الماء، وزيت الزيتون) على سطح القماش القطني المعالج بالفلورو كربون السداسي (C_6F_6) وبتراكيز مختلفة من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (50-75 ppm) قبل الغسيل وبعد 5 و 10 دورات غسيل كما موضح في الشكل (4-23). يدل الشكل الكروي للقطرات على الفعالية العالية لخاصية الطرد المائي لدى القماش المعالج، ويشير إلى نجاح المعالجة النانوية الميكروية في إكساب القماش خصائص مقاومة للماء.

إن معالجة القماش بأكسيد الزنك النانوي يزيد من خشونة السطح وتخلق بنية ميكروية نانوية تعزز من تكوين حالة كاسي_ باكستر، حيث تستقر القطرات على سطح القماش بدلاً من أن تنتشر عليه. وتعزز هذه الخاصية بشكل أكبر باستخدام مركب C_6F_6 ، وهو مركب فلوري معروف بخواصه الممتازة في الطرد المائي. إن الجمع بين هذين المكونين يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في طاقة سطح القماش، مما يرفع زاوية تماس الماء عليه.

علاوة على ذلك، تظهر النتائج أن القطرات تحافظ على شكلها الكروي حتى بعد 5 و10 دورات غسيل في العينات المعالجة، مما يدل على ثبات خاصية الطرد المائي وقدرتها على مقاومة الغسيل المتكرر، وهذا يؤكد متانة هذه المعالجة وكفاءتها في الحفاظ على الأداء الوظيفي للنسيج في ظروف الاستخدام المتكرر.

التركيز	unwashed	5 washings	10 washings
50 ppm			
75 ppm			

100 ppm			
200 ppm			
300 ppm			

شكل (4-23): قطرات من سوائل متنوعة (الدم، الماء، وزيت الزيتون) على سطح قماش قطني معالج بـ (C_6F_6) وبتراكيزات مختلفة من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (50-75-100-200-300ppm) قبل الغسيل وبعد 5 و 10 دورات غسيل

تعتبر زاوية تماس الماء مؤشراً حاسماً لدرجة قدرة السطح على صد الماء، ويتم حسابها من خلال زاوية التماس التي تتكون بين السطح وقطرة الماء الموضوعة عليه. السطح يعتبر محباً للماء إذا كانت زاوية التماس أقل من 90 درجة مئوية.

تم قياس قيم زاوية التماس لثلاثة سوائل مختلفة: الدم، الماء، وزيت الزيتون، وتم تقييم متانة المعالجة بعد 5 و 10 دورات غسيل كما هو موضح في الجدول (4-4).

أشارت النتائج إلى زيادة واضحة في خاصية الطرد المائي مع زيادة تركيز جسيمات أكسيد الزنك النانوية. بالنسبة للدم، زادت قيم زاوية التماس من $144.3 \pm 1.4^\circ$ عند تركيز 50ppm إلى $152.3 \pm 3.1^\circ$ عند تركيز 300ppm في العينات غير المغسولة. وبالمثل، بالنسبة للماء، زادت هذه القيم من $140.9 \pm 1.9^\circ$ إلى $151.1 \pm 3.6^\circ$ ، ولزيت الزيتون من $145.4 \pm 2.0^\circ$ إلى $151.0 \pm 1.1^\circ$ زيادة تركيز ZnO-NPs يؤدي إلى زيادة معامل الخشونة النانوية وفق معادلة Wenzel وتكون طبقة هجينة منخفضة الطاقة السطحية.

لكن التحسن في خاصية الطرد المائي تناقص مع الغسيل. بعد 5 دورات غسيل، تناقصت زاوية التماس للدم بنحو 6.6% إلى 9.7% عبر كل التراكيز. حيث بلغت $135.8 \pm 1.2^\circ$ عند 50ppm و $144.1 \pm 2.8^\circ$ عند 300ppm، وبعد 10 دورات غسيل، تناقصت إلى $131.2 \pm 2.2^\circ$ و $137.5 \pm 2.4^\circ$ على التوالي. أصبح التناقص أوضح بعد 10 دورات غسيل، حيث تناقصت زاوية التماس بنسبة تتراوح بين 10.1% و 14.2% حيث ينخفض معامل الخشونة السطحية r بعد 10 دورات غسيل نتيجة الاحتكاك الميكانيكي الذي يزيل جسيمات ZnO-NPs السطحية غير المرتبطة كيميائياً، مما يقلل من تأثير lotus effect ويخفض زاوية التماس وفق العلاقة $\cos\theta^* = r \times \cos\theta$. ولوحظت اتجاهات مماثلة بالنسبة للماء وزيت الزيتون. بالنسبة للماء، تناقصت زاوية التماس بعد 5 مرات غسيل إلى $135.1 \pm 1.6^\circ$ عند تركيز 50ppm (بنسبة 4.1%) وإلى $141.7 \pm 2.8^\circ$ عند تركيز 300ppm (بنسبة 6.2%). وبعد 10 مرات غسيل، تناقصت إلى $129.5 \pm 2.4^\circ$ (بنسبة 8.1%) و $136.6 \pm 3.6^\circ$ (بنسبة 9.6%) على التوالي. أما زيت الزيتون، فقد تناقصت قيم زاوية التماس بعد 5 دورات غسيل إلى $131.8 \pm 1.5^\circ$ و $141.2 \pm 2.7^\circ$ بنسب حوالي 9.4% و 6.5% عند تراكيز 50ppm و 300 على التوالي. وبعد 10 دورات غسيل تناقصت زاوية التماس إلى $125.5 \pm 2.2^\circ$ و $137.2 \pm 3.6^\circ$ بنسبة 13.7% و 9.1% عند نفس التراكيز على التوالي ويعزى

التناقص إلى مغادرة جزيئات C_6F_6 للقماش بسبب المنظفات والاحتكاك أثناء الغسيل حيث تستخلص الطبقة الفلورية ذات الطاقة السطحية المنخفضة ($<25 \text{ mN/m}$) ، مع تأثير أكبر لزيت الزيتون ذي التوتر السطحي المنخفض (32 mN/m). حافظت التراكيز العالية ($>200 \text{ ppm}$) على فائق كراهية مستقرة ($>135^\circ$) بنسبة $>90\%$ تفوق الطلاءات التجارية التقليدية، مما يؤكد نجاح تقنية pad-dry-cure في ربط ZnO بنسب NPs بشكل دائم لتطبيقات النسيج الطبي والحماية.

جدول (4-4): زوايا التماس لقطرة (زيت- ماء- زيت) لأقمشة القطن المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ عند التراكيز المختلفة لـ ZnO (50, 75, 100, 200, 300 ppm) قبل الغسيل وبعد 5 دورات غسيل و10 دورات غسيل.

قطرة دم (Blood)			
تركيز $ZnO-NPs$	unwashed	5 washings	10 washings
50 ppm	$144.3 \pm 1.4^\circ$	$135.8 \pm 1.2^\circ$	$131.2 \pm 2.2^\circ$
75 ppm	$147.5 \pm 2.2^\circ$	$137.1 \pm 1.8^\circ$	$132.9 \pm 2.6^\circ$
100 ppm	$148.6 \pm 2.6^\circ$	$138.3 \pm 2.2^\circ$	$133.8 \pm 2.3^\circ$
200 ppm	$149.5 \pm 2.6^\circ$	$141.6 \pm 2.2^\circ$	$136.7 \pm 2.2^\circ$
300 ppm	$152.3 \pm 3.1^\circ$	$144.1 \pm 2.8^\circ$	$137.5 \pm 2.4^\circ$
قطرة ماء (Water)			
تركيز $ZnO-NPs$	unwashed	5 washings	10 washings
50 ppm	$140.9 \pm 1.9^\circ$	$135.1 \pm 1.6^\circ$	$129.5 \pm 2.4^\circ$

75 ppm	$^{\circ}143.5 \pm ^{\circ}2.5$	$^{\circ}136.9 \pm ^{\circ}1.9$	$^{\circ}131.8 \pm ^{\circ}2.7$
100 ppm	$^{\circ}146.3 \pm ^{\circ}2.6$	$^{\circ}138.4 \pm ^{\circ}2.5$	$^{\circ}134.6 \pm ^{\circ}2.8$
200 ppm	$^{\circ}147.5 \pm ^{\circ}2.9$	$^{\circ}140.0 \pm ^{\circ}2.3$	$^{\circ}136.5 \pm ^{\circ}3.7$
300 ppm	$^{\circ}151.1 \pm ^{\circ}3.6$	$^{\circ}141.7 \pm ^{\circ}2.8$	$^{\circ}136.6 \pm ^{\circ}3.6$
قطرة زيت زيتون (Olive Oil)			
تركيز ZnO-NPs	unwashed	5 washings	10 washings
50 ppm	$^{\circ}145.4 \pm ^{\circ}2.0$	$^{\circ}131.8 \pm ^{\circ}1.5$	$^{\circ}125.5 \pm ^{\circ}2.2$
75 ppm	$^{\circ}146.6 \pm ^{\circ}2.0$	$^{\circ}135.2 \pm ^{\circ}1.7$	$^{\circ}129.4 \pm ^{\circ}2.3$
100 ppm	$^{\circ}147.4 \pm ^{\circ}2.0$	$^{\circ}138.9 \pm ^{\circ}2.3$	$^{\circ}133.7 \pm ^{\circ}2.8$
200 ppm	$^{\circ}148.0 \pm ^{\circ}2.4$	$^{\circ}140.7 \pm ^{\circ}2.5$	$^{\circ}134.3 \pm ^{\circ}2.9$
300 ppm	$^{\circ}151.0 \pm ^{\circ}1.1$	$^{\circ}141.2 \pm ^{\circ}2.7$	$^{\circ}137.2 \pm ^{\circ}3.6$

تشير النتائج إلى أنه مع زيادة تركيز أكسيد الزنك النانوي، تزداد خاصية الطرد المائي للأقمشة المعالجة. يلاحظ أن أعلى تركيز لأكسيد الزنك النانوي (300ppm) حقق باستمرار أعلى قيم لزواية تماس الماء (WCA) عبر جميع السوائل ودورات الغسيل. حافظ هذا التركيز على أعلى درجة من خاصية الطرد المائي حتى بعد 10 دورات غسيل، مما يشير إلى أن التركيز الأعلى من جسيمات أكسيد الزنك النانوية لا يعزز فقط الطرد المائي الابتدائي بل يحسن من ثبات واستمرارية المعالجة. تؤثر خشونة سطح ألياف القطن تأثيراً كبيراً على خاصية الطرد المائي لسطح النسيج. زيادة تركيز جزيئات ZnO يؤدي إلى تكوين طبقة أكثر كثافة مع ظهور هياكل تدرجية (هرمية) على سطح الليف. تتكون هذه الهياكل الدقيقة/النانوية من جزيئات ZnO التي يقل حجمها عن 200 نانومتر، مع أن قطر كل ليف قطني حوالي 10 ميكرومتر، ما يقارن بخصائص ورقة

اللوتس التي تتميز بالطرد المائي. بسبب وجود مجموعات الهيدروكسيل على سطح ألياف القطن، يتكون رابط هيدروجيني بين جزيئات ZnO والليف مما يعزز الالتصاق الجيد بينهما (Y. Wang et al., 2022).

وعند مقارنة النتائج بين السوائل المختلفة، أظهر زيت الزيتون أقل قيم لزوية التماس بعد الغسيل مقارنة بالماء والدم. ويمكن رد هذا إلى توتره السطحي المنخفض مقارنة بالماء والدم الذي يقدر بـ (32 mN/m)، مما يشير إلى أن طبيعة السائل تؤثر بشكل كبير على خاصية الطرد المائي لألياف القطن المعالجة.

ويشير استقرار القطرات على القماش المعالج إلى أن السطح قد تم تعديله بنجاح لمقاومة البلل، مما يقلل من امتصاص السوائل. وتعد هذه الخاصية حيوية في التطبيقات التي تتطلب أقصى درجات النظافة والصحة، مثل المنسوجات الطبية، حيث تساعد في منع اختراق سوائل الجسم والملوثات الأخرى، مما يقلل من خطر انتقال العدوى.

بشكل عام، تعكس هذه النتائج مدى فاعلية جسيمات أكسيد الزنك النانوية في توفير معالجة مستدامة تجمع بين خاصية الطرد المائي العالية والتحمل في ظروف الاستخدام المتكرر.

3.4 الدراسة الإحصائية:

تم تحليل البيانات باستخدام برنامج SPSS الإصدار 25 لتقييم تأثير المادة النانوية Ag و ZnO على جراثيم *Escherichia coli* و *Staphylococcus aureus* عند تراكيز مختلفة (50، 75، 100، 200، 300 ppm) للمواد النانوية قبل الغسيل وبعد خمس دورات غسيل وعشر دورات غسيل اعتمدت الدراسة على اختبار Repeated Measures ANOVA.

كما تم تقييم لقياس تأثير نوع المادة النانوية Ag و ZnO والتراكيز المختلفة وعدد دورات الغسيل على زاوية التماس لثلاث أنواع من قطرات السائل (دم-ماء-زيت زيتون) للقماش المعالج بالمادة النانوية البوليميرية

واعتمدت الدراسة على اختبار Repeated Measures ANOVA ، باعتبار أن القياسات أُخذت على نفس العينات في أكثر من حالة.

تضمنت الإجراءات الإحصائية على ثلاث مكررات ما يلي:

حساب المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية لكل مجموعة من المعالجات لتوضيح الاتجاهات العامة.

تنفيذ اختبار Repeated Measures ANOVA لاختبار الفروق بين المتوسطات عبر القياسات المتكررة.

تحديد مستوى الدلالة الإحصائية عند $(\alpha = 0.05)$ لاعتماد النتائج ذات الدلالة المعنوية.

1.3.4 الدراسة الإحصائية للجراثيم:

يوضح الجدول (4-5) الإحصاءات الوصفية للجراثيم لثلاث مكررات من العينات قبل الغسيل وبعد الغسيل

جدول (4-5): الإحصاءات الوصفية للجراثيم

التركيز 50ppm						المجموعة	
بعد 10 دورات غسيل		بعد 5 دورات غسيل		قبل الغسيل			
Escherichia coli	Staphylococcus aureus	Escherichia coli	Staphylococcus aureus	Escherichia coli	Staphylococcus aureus		
79.80	95.00	80.37	97.47	90.10	98.93	Mean	Ag
1.00	0.70	1.50	0.74	0.50	0.67	Std. Deviation	
79.30	85.70	83.90	94.93	86.29	95.50	Mean	Zno
0.99	1.05	1.72	1.00	0.91	1.61	Std. Deviation	
التركيز 75ppm							المجموعة

بعد 10 دورات غسيل		بعد 5 دورات غسيل		قبل الغسيل			
Escheric hia coli	Staphylococcu s aureus	Escheric hia coli	Staphylococ cus aureus	Escheric hia coli	Staphylococ cus aureus		
81.47	96.70	90.60	98.43	92.20	99.30	Mean	A g
0.87	1.51	2.79	0.76	1.35	0.66	Std. Deviati on	
82.22	93.41	86.32	96.47	87.90	98.67	Mean	zn o
1.08	1.18	1.34	0.93	1.71	0.70	Std. Deviati on	

التركيز 100ppm						المجموعة	
بعد 10 دورات غسيل		بعد 5 دورات غسيل		قبل الغسيل			
Escheric hia coli	Staphylococ cus aureus	Escheric hia coli	Staphylococ cus aureus	Escheric hia coli	Staphylococ cus aureus		
88.57	98.37	91.23	99.57	93.37	99.50	Mean	Ag
1.82	0.59	2.58	0.75	1.06	0.30	Std. Deviation	
82.49	93.85	88.40	97.50	89.57	98.87	Mean	Zno
1.09	0.88	0.83	0.72	1.52	0.45	Std. Deviation	
التركيز 200ppm							المجموعة
بعد 10 دورات غسيل		بعد 5 دورات غسيل		قبل الغسيل			

Escherichia coli	Staphylococcus aureus	Escherichia coli	Staphylococcus aureus	Escherichia coli	Staphylococcus aureus		
90.83	99.90	94.57	99.90	99.87	99.90	Mean	Ag
1.27	0.10	2.81	0.10	0.12	0.10	Std. Deviation	
88.02	95.82	89.39	98.40	91.71	99.57	Mean	Zn
1.03	0.85	0.41	1.04	1.18	0.49	Std. Deviation	

التركيز 300ppm						المجموعة	
بعد 10 دورات غسيل		بعد 5 دورات غسيل		قبل الغسيل			
Staphylococcus aureus	Staphylococcus aureus	Staphylococcus aureus	Staphylococcus aureus	Staphylococcus aureus	Staphylococcus aureus		
92.83	99.97	95.50	99.97	99.97	99.97	Mean	Ag
0.93	0.06	3.42	0.06	0.06	0.06	Std. Deviation	
90.02	96.65	95.16	99.33	98.65	99.76	Mean	Zno
1.92	0.90	0.78	0.46	0.69	0.23	Std. Deviation	

يبين الجدول (4-5) الإحصاءات الوصفية لنسب تثبيط جراثيم *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* لعينات قماش معالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ و $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ بتركيزات مختلفة للمادة النانوية (50-75-100-200-300ppm) قبل الغسيل وبعد خمس دورات غسيل وبعد عشر دورات غسيل وذلك بالنسبة لثلاث مكررات.

توضح النتائج أن للفضة النانوية قدرة تثبيطية أكبر من أكسيد الزنك النانوي في جميع التركيزات ، حيث أنه بالنسبة لجراثيم *S. aureus* عند التركيز 50 ppm القدرة التثبيطية لـ Ag 94.5% قبل الغسيل مقابل 90.9% لـ ZnO ، وعند 75-100ppm (95.8-96.4%) على التوالي لـ Ag ، (93.3-94.2%) لـ ZnO ، وعند التركيز 200-300ppm تتراوح القدرة التثبيطية بين 99-100% قبل الغسيل، ويلاحظ أن زيادة تركيز المادة النانوية يزيد تثبيط الجراثيم بسبب زيادة الكثافة النشطة حيث تفرز أيونات Ag^+ تثبط DNA وتدمر الغشاء بسرعة، بينما ينتج أكسيد الزنك ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH}^-$) ROS أكبر عند التركيز الأعلى، مع التأكيد على أهمية عملية المعالجة pad-dry-cure في التوزيع المتساوي للجسيمات النانوية والربط الدائم والاستقرار.

كما تظهر النتائج أن عدد دورات الغسيل ونوع الجرثومة عاملان مؤثران لأن الغسيل يسبب تآكلاً ميكانيكياً للطبقة النانوية البوليميرية ويزداد التآكل عند التركيزات المنخفضة، حيث تنقص فعالية Ag (50 ppm) بعد 10 دورات غسيل إلى 3.93% ضد جراثيم (*S.aureus*) و 11.43% ضد جراثيم (*E.coli*)، وتنقص فعالية ZnO-NPs 10.24% ضد (*S.aureus*) و 8.10% ضد (*E.coli*)، بينما عند 300 ppm نقصت فعالية Ag 0% ضد (*S.aureus*) و 7.14% ضد (*E.coli*) بالمقابل ZnO 3.11% (*S.aureus*) و 8.63% (*E.coli*) ، و يفسر اختلاف تركيب جدار الخلية بين هذين النوعين من الجراثيم ، مع تفوق Ag بسبب إطلاق Ag^+ السريع مقابل ROS الأبطأ لـ ZnO .

جدول (4-6): نتائج اختبار التأثيرات داخل المجموعات لعامل التركيز وتفاعلاته مع المجموعة والمادة ونوع الجرثومة

Tests of Within-Subjects Effects						
Measure: MEASURE_1						
Sig.	F	Mean Square	df	Type III Sum of Squares	Source	
.000	1155.331	602.781	2.527	1523.084	Greenhouse-Geisser	التركيز
.000	25.524	13.317	5.054	67.296	Greenhouse-Geisser	التركيز * الغسيل
.000	21.163	11.041	2.527	27.899	Greenhouse-Geisser	التركيز * المادة
.000	246.712	128.719	2.527	325.243	Greenhouse-Geisser	التركيز * الجرثومة
.000	22.571	11.776	5.054	59.510	Greenhouse-Geisser	التركيز * الغسيل * المادة
.000	22.757	11.873	5.054	60.001	Greenhouse-Geisser	التركيز * الغسيل * الجرثومة
.000	65.694	34.275	2.527	86.605	Greenhouse-Geisser	التركيز * المادة * الجرثومة
.000	11.026	5.753	5.054	29.073	Greenhouse-Geisser	التركيز * الغسيل * المادة * الجرثومة

		.522	60.642	31.639	Greenhouse- Geisser	Error(التركيز)
--	--	------	--------	--------	------------------------	----------------

يبين الجدول (4-6) نتائج اختبار التأثيرات داخل المجموعات باستخدام تحليل التباين للقياسات المتكررة (Repeated Measures ANOVA) لدراسة أثر عامل التركيز وتفاعلاته مع كل من الغسيل، المادة النانوية، ونوع الجرثومة.

النتائج أظهرت ما يلي:

يوجد تأثير دال إحصائي لعامل التركيز ($\text{Sig} = 0.000$)، مما يعني أن التغير في تركيز المادة النانوية أثر بشكل واضح على النتائج.

كما وجد تفاعل دال بين التركيز وعدد مرات الغسيل، مما يشير إلى أن فعالية المواد النانوية تختلف باختلاف عدد دورات الغسيل.

أظهر التفاعل بين التركيز والمادة النانوية فرقاً معنوياً، ما يدل على أن كل مادة استجابت بطريقة مختلفة لزيادة التركيز.

كذلك كان التفاعل بين التركيز ونوع الجرثومة ذا دلالة عالية، مما يوضح اختلاف تأثير التركيز حسب نوع الجراثيم.

جميع التفاعلات الثلاثية والرابعة بين العوامل كانت دالة إحصائياً عند مستوى (0.000)، مما يعكس وجود تأثيرات مشتركة معقدة بين العوامل الأربعة.

بشكل عام، توضح النتائج أن عامل التركيز هو المتغير الأكثر تأثيراً، وأن فعالية المواد النانوية تختلف باختلاف نوع الجرثومة وعدد مرات الغسيل، مع وجود تفاعل واضح بين هذه العوامل في تحديد درجة الفعالية

المضادة للجراثيم. لأن زيادة التركيز تزيد الكثافة السطحية النشطة والتغطية النانوية، مما يعزز إفراز Ag^+ وإنتاج ROS.

جدول (4-7): نتائج اختبار التأثيرات بين المجموعات للعوامل التجريبية (الغسيل، المادة، ونوع الجرثومة)

Tests of Between-Subjects Effects					
Measure: MEASURE_1					
Transformed Variable: Average					
Sig.	F	Mean Square	df	Type III Sum of Squares	Source
.000	264596.449	1572438.336	1	1572438.336	Intercept
.000	75.750	450.165	2	900.329	الغسيل
.000	54.315	322.779	1	322.779	المادة
.000	511.919	3042.222	1	3042.222	الجرثومة
.147	2.078	12.348	2	24.695	الغسيل * المادة
.001	10.185	60.528	2	121.056	الغسيل * الجرثومة
.753	.101	.601	1	.601	المادة * الجرثومة
.012	5.388	32.017	2	64.034	الغسيل * المادة * الجرثومة
		5.943	24	142.627	Error

يبين الجدول (4-7) نتائج اختبار التأثيرات بين المجموعات للعوامل التجريبية الثلاثة: عدد دورات الغسيل، نوع المادة النانوية، ونوع الجرثومة، باستخدام تحليل التباين الثنائي والثلاثي (Between-Subjects Effects).

أوضحت النتائج ما يلي:

يوجد تأثير دال إحصائياً لعدد دورات الغسيل ($\text{Sig} = 0.000$)، مما يعني أن تكرار الغسيل أثر بشكل واضح على الفعالية المضادة للجراثيم.

كما ظهر تأثير معنوي لنوع المادة النانوية ($\text{Sig} = 0.000$)، حيث اختلفت القيم باختلاف نوع المادة (Ag أو ZnO).

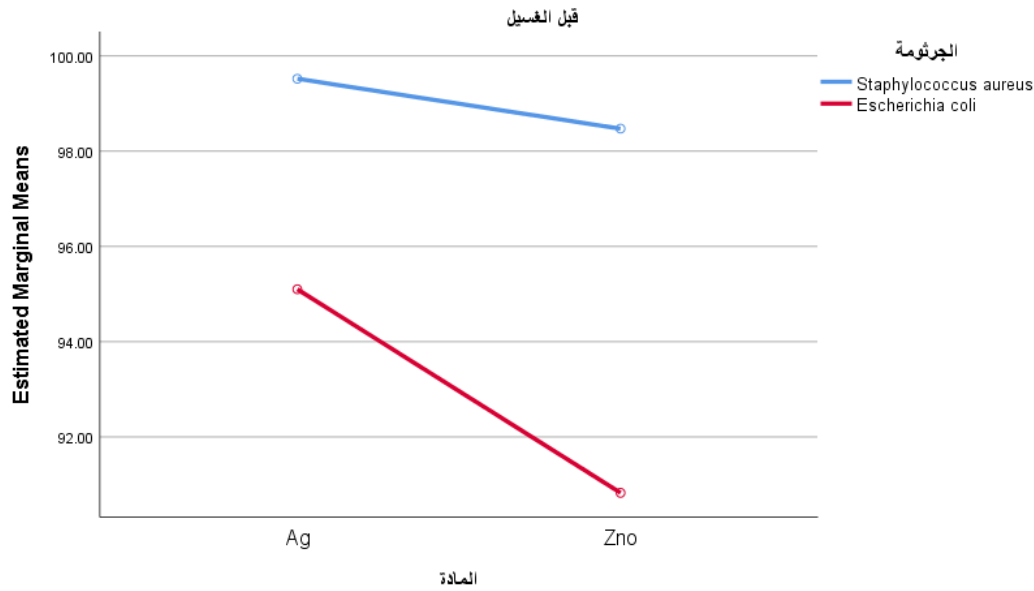
كذلك كان هناك تأثير معنوي قوي لنوع الجرثومة ($\text{Sig} = 0.000$)، مما يدل على أن استجابة *Escherichia coli* و *Staphylococcus aureus* كانت مختلفة تجاه المعالجات.

لم يظهر تفاعل معنوي بين عدد دورات الغسيل و نوع المادة ($\text{Sig} = 0.147$) أو بين المادة والجرثومة ($\text{Sig} = 0.753$)، ما يعني أن أثر كل عامل مستقل عن الآخر في هذين التفاعلين.

في المقابل، وجد تفاعل معنوي بين عدد دورات الغسيل ونوع الجرثومة ($\text{Sig} = 0.001$)، مما يشير إلى أن تأثير الغسيل يختلف حسب نوع الجرثومة.

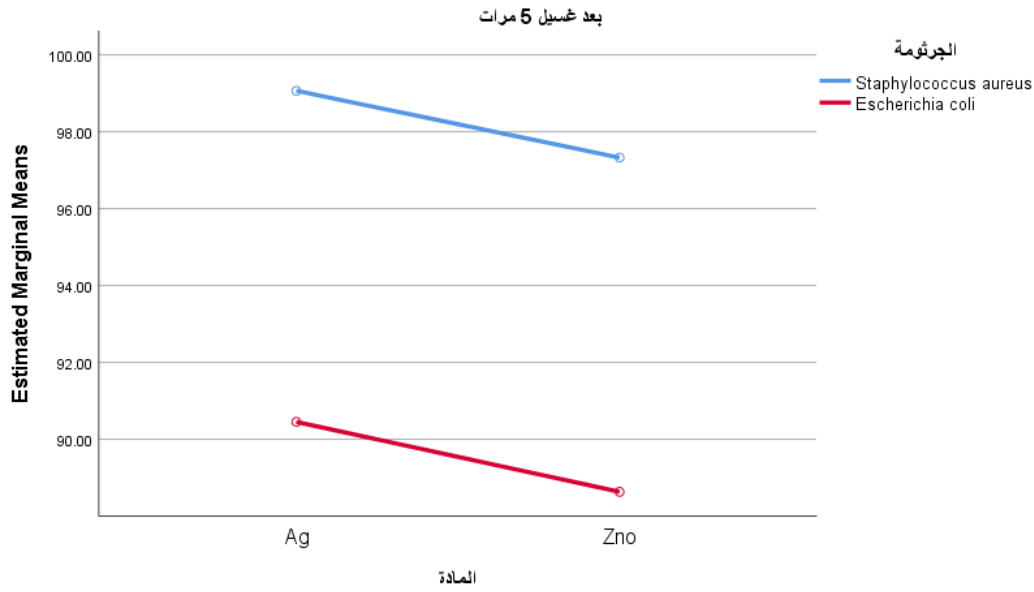
كما وجد تفاعل ثلاثي دال بين الغسيل، المادة، والجرثومة ($\text{Sig} = 0.012$)، ما يدل على وجود علاقة متبادلة معقدة بين هذه العوامل الثلاثة تؤثر على النتائج النهائية.

بصورة عامة، تظهر النتائج أن عدد دورات الغسيل ونوع الجرثومة هما العاملان الأكثر تأثيراً، مع وجود اختلاف واضح في الأداء بين المادتين النانويتين عبر أنواع الجراثيم المختلفة.



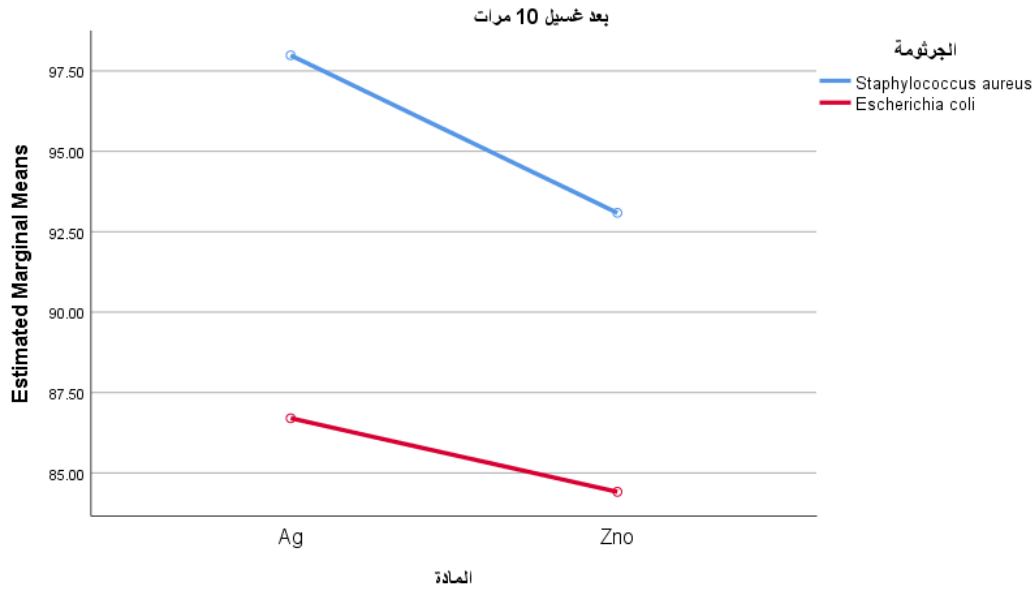
شكل (4-24): تأثير نوع المادة النانوية على الجرثومة قبل الغسيل

يمثل الشكل (4-24) التغير في متوسط النسبة المئوية لتثبيط الجراثيم قبل الغسيل باختلاف نوع المادة النانوية الفعالة Ag أو ZnO ونوع الجرثومة. يظهر أن Ag حققت فعالية أعلى من ZnO ضد كلٍّ من *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli*، حيث أن أيونات الفضة النشطة تتفاعل مباشرة مع مكونات الخلايا الجرثومية، مسببة أضراراً كبيرة في الأغشية والبروتينات، مما يؤدي إلى تثبيط نمو الجراثيم وموتها، مقارنةً بآلية ZnO المعتمدة أساساً على إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية ROS الأبطأ نسبياً في إظهار تأثيرها.



شكل (4-25): تأثير نوع المادة النانوية على الجرثومة بعد غسيل 5 دورات غسيل

يمثل الشكل (4-25) التغير في متوسطات نسبة تثبيط الجراثيم بعد 5 دورات غسيل باختلاف نوع المادة الفعالة Ag أو ZnO ونوع الجرثومة. يظهر أن الفعالية المضادة للجراثيم بقيت أعلى في الأقمشة المعالجة بالفضة مقارنةً بأكسيد الزنك لكل من *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli*، مع انخفاض طفيف في القيم بعد الغسيل يعكس حدوث تآكل تدريجي في الطبقة النانوية البوليمرية نتيجة التأثير الميكانيكي للغسيل كما تستمر Ag بإطلاق أيونات Ag^+ بكفاءة حتى بعد عدة دورات غسيل، في حين يعتمد تأثير ZnO بصورة أكبر على إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية ROS الأبطأ تأثيراً، مما يجعل فقدان جزء من المادة أثناء الغسيل ينعكس مباشرة على انخفاض فعاليتها.



شكل (4-26): تأثير نوع المادة النانوية على الجرثومة بعد غسيل 10 دورات غسيل

يمثل الشكل (4-26) التغير في المتوسطات المقدرة لنسبة تثبيط الجراثيم بعد 10 دورات غسيل باختلاف نوع المادة الفعالة Ag-NPs أو ZnO-NPs ونوع الجرثومة لكل من *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* للغسيل المتكرر. يتضح أن الفعالية المضادة للجراثيم بقيت أعلى في الأقمشة المعالجة بـ Ag مقارنة بـ ZnO، مما يشير إلى ثباتية أفضل للجسيمات الفضة ضمن الطبقة والبوليمرية رغم التعرض لعشر دورات غسيل. في المقابل، أدى الغسيل المتكرر إلى انخفاض نسب تثبيط الجراثيم في العينات المعالجة بـ ZnO، ما يعكس تآكلاً أو انفصالاً أسرع لجسيمات ZnO، ويتوافق مع آلية عملها المعتمدة على إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية ROS التي تتأثر بشدة بفقدان جزء من الجسيمات خلال الغسيل مقارنة بإطلاق أيونات Ag^+ المستمر في حالة الفضة.

2.3.4 الدراسة الاحصائية للقطرة السائلة:

جدول (4-8): الإحصاءات الوصفية للقطرة السائلة

التركيز 50ppm									المجموعة	
بعد 10 دورات غسيل			بعد 5 دورات غسيل			قبل الغسيل				
olive oil	water	blood	olive oil	water	blood	olive oil	water	blood		
122.80	124.00	120.17	126.60	127.30	123.90	132.80	131.57	126.87	Mean	Ag
2.03	1.56	2.10	2.34	2.76	1.35	3.21	2.43	2.90	Std. Deviation	
125.47	129.47	131.20	131.83	135.10	135.77	145.43	140.97	144.33	Mean	zn o
2.65	3.23	2.75	1.80	2.01	1.50	2.46	2.32	1.69	Std. Deviation	
التركيز 75ppm										
بعد 10 دورات غسيل			بعد 5 دورات غسيل			قبل الغسيل			المجموعة	
olive oil	water	blood	olive oil	water	blood	olive oil	water	blood		
132.50	131.83	130.83	133.50	129.47	132.70	137.07	141.77	139.83	Mean	Ag
2.78	3.00	1.40	2.76	3.09	2.41	3.50	2.54	2.57	Std. Deviation	
129.43	131.83	132.93	135.23	136.90	137.13	146.60	143.57	147.50	Mean	zn o
2.86	3.00	2.85	2.10	2.35	2.17	2.51	3.06	2.75	Std. Deviation	
التركيز 100ppm										
بعد 10 دورات غسيل			بعد 5 دورات غسيل			قبل الغسيل			المجموعة	
olive oil	water	blood	olive oil	water	blood	olive oil	water	blood		
134.73	137.87	135.20	135.60	139.47	136.80	137.97	142.07	140.77	Mean	Ag
2.48	2.47	2.65	3.41	3.02	2.35	4.12	2.68	2.31	Std. Deviation	

133.70	134.57	133.77	138.87	138.40	138.30	147.43	146.30	148.63	Mean	zn o
3.48	3.45	3.21	2.81	3.06	2.63	2.48	3.20	3.13	Std. Deviation	
التركيز 200ppm									المجموعة	
بعد 10 دورات غسيل			بعد 5 دورات غسيل			قبل الغسيل				
olive oil	water	blood	olive oil	water	blood	olive oil	water	blood		
137.67	139.87	138.17	141.43	140.90	140.00	144.17	146.83	144.53	Mean	Ag
3.10	3.60	2.80	2.45	3.50	2.88	3.45	3.73	2.12	Std. Deviation	
134.30	136.53	136.67	140.67	140.00	141.60	148.00	147.57	149.50	Mean	zn o
3.51	4.55	2.74	3.30	2.86	2.76	2.98	3.56	3.21	Std. Deviation	
التركيز 300ppm									لمجموعة	
بعد 10 دورات غسيل			بعد 5 دورات غسيل			قبل الغسيل				
olive oil	water	blood	olive oil	water	blood	olive oil	water	blood		
142.57	145.57	144.90	144.17	147.13	146.10	146.90	147.93	149.07	Mean	Ag
3.21	4.12	1.49	1.85	3.71	1.51	2.92	4.05	3.79	Std. Deviation	
137.23	136.63	137.50	141.17	141.67	144.10	151.03	151.13	152.37	Mean	zn o
4.44	4.47	2.96	3.05	3.45	3.46	1.34	4.42	3.85	Std. Deviation	

يبين الجدول (4-8) الإحصاءات الوصفية لزوايا التماس للقطرة السائلة (الدم، الماء، وزيت الزيتون) عند استخدام $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ و $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ بتركيزات مختلفة (50-75-100-200-300ppm) قبل الغسيل وبعد خمس مرات غسيل وبعد عشر مرات غسيل.

تشير النتائج إلى ما يلي:

أظهرت العينات المعالجة بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ زوايا تماس أكبر مقارنةً بالعينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ عند التركيزات المنخفضة للمادة النانوية (50-75ppm) في معظم السوائل، مما يشير إلى سطح أكثر طرداً للسوائل. حيث أن طبقة ZnO النانوية تجعل السطح أكثر خشونة.

مع زيادة التركيز إلى (100-200ppm)، زادت زوايا التماس للعينتين مما يعكس تحسناً في خاصية الطرد المائي للسطح.

وعند التركيز الأعلى (300ppm) أظهرت العينات المعالجة بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ خصائصاً فائقة الكره للماء حيث كانت قيمة زاوية التماس ($\text{WCA} > 150^\circ$)، مما يدل على تأثير قوي للتركيز العالية على تحسين مقاومة امتصاص السوائل.

لوحظ بعد الغسيل المتكرر، تناقص تدريجي في قيم زاوية التماس لكلا المادتين، إلا أن العينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ أظهرت استقراراً أكبر نسبياً مقارنةً بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ ، خاصةً في زيت الزيتون. كانت الانحرافات المعيارية منخفضة، مما يدل على تجانس النتائج وثباتها التجريبي.

بشكل عام، تظهر النتائج أن التركيزات العالية من المواد النانوية حسنت زاوية التماس (WCA) بشكل ملحوظ، وأن العينات المعالجة بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ تفوقت نسبياً في الطرد المائي، بينما العينات المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$

حافظت على ثبات أدائها بعد الغسيل، ويعود ذلك إلى ارتباط أقوى لجزيئات الفضة مع الألياف القطنية مقارنةً بأوكسيد الزنك، مما يقلل من فقدان المادة النانوية أثناء الغسيل الميكانيكي.

جدول (4-9): نتائج اختبار التأثيرات داخل المجموعات لعامل التركيز وتفاعلاته مع المجموعة والمادة ونوع القطرة

Tests of Within-Subjects Effects						
Measure						
Sig.	F	Mean Square	df	Type III Sum of Squares	Source	
0.000	577.935	2795.848	2.196	6139.955	Greenhouse-Geisser	التركيز
0.005	3.891	18.825	4.392	82.682	Greenhouse-Geisser	التركيز * الغسيل
0.000	97.384	471.111	2.196	1034.606	Greenhouse-Geisser	التركيز * المادة
0.091	2.035	9.843	4.392	43.234	Greenhouse-Geisser	التركيز * القطرة
0.030	2.750	13.305	4.392	58.439	Greenhouse-Geisser	التركيز * الغسيل * المادة
0.061	1.930	9.337	8.784	82.024	Greenhouse-Geisser	التركيز * الغسيل * القطرة
0.002	4.608	22.290	4.392	97.903	Greenhouse-Geisser	التركيز * المادة * القطرة
0.099	1.723	8.336	8.784	73.227	Greenhouse-Geisser	التركيز * الغسيل * المادة * القطرة
		4.838	79.060	382.463	Greenhouse-Geisser	Error (التركيز)

يبين الجدول (4-9) نتائج اختبار التأثيرات داخل المجموعات باستخدام تحليل القياسات المتكررة (Repeated Measures ANOVA) لعامل التركيز وتفاعلاته مع عدد دورات الغسيل، نوع المادة النانوية، ونوع القطرة السائلة.

أظهرت النتائج ما يلي:

يوجد تأثير دال إحصائياً للتركيز ($\text{Sig} = 0.000$)، مما يشير إلى أن التغير في تركيز المادة النانوية يؤثر بشكل واضح في زاوية التماس للقطرة.

تبين أيضاً تفاعل معنوي بين التركيز وعدد مرات الغسيل ($\text{Sig} = 0.005$)، أي أن تأثير التركيز يختلف باختلاف عدد دورات الغسيل.

كما لوحظ تفاعل دال بين التركيز ونوع المادة ($\text{Sig} = 0.000$)، ما يعني أن استجابة زاوية التماس تختلف باختلاف مادة المعالجة وذلك للتركيزات المختلفة لـ Ag و ZnO .

لم يظهر تأثير معنوي لتفاعل التركيز ونوع القطرة ($\text{Sig} = 0.091$)، مما يدل على أن نوع السائل (دم، ماء، زيت) لم يغير بشكل كبير من تأثير التركيز.

وجد تفاعل معنوي بين التركيز والغسيل والمادة ($\text{Sig} = 0.030$)، ما يشير إلى أن عدد دورات الغسيل ونوع المادة معا يؤثران في العلاقة بين التركيز وزاوية التماس.

بينما لم يظهر تفاعل معنوي بين التركيز والغسيل والقطرة ($\text{Sig} = 0.061$).

في المقابل، ظهر تفاعل دال بين التركيز والمادة ونوع القطرة ($\text{Sig} = 0.002$)، أي أن نوع السائل يتفاعل مع نوع المادة لتحديد استجابة زاوية التماس عند تغير التركيز.

أما التفاعل الرباعي بين جميع العوامل (التركيز، الغسيل، المادة، القطرة) فلم يكن معنوياً ($\text{Sig} = 0.099$). بشكل عام، يتضح أن التركيز ونوع المادة وعدد دورات الغسيل هي العوامل الأكثر تأثيراً على زاوية التماس، بينما تأثير نوع القطرة كان محدوداً نسبياً.

تتحكم البنية السطحية الكيميائية والفيزيائية (نوع المادة، خشونتها، الطبقة النانوية/البوليمرية) في قيمة زاوية التماس (WCA)، إضافةً إلى تركيز المادة المعالجة ومدى تماسكها مع الألياف بعد الغسيل المتكرر.

لذلك، يظهر تأثير واضح لكل من: التركيز، نوع المادة، وعدد دورات الغسيل؛ حيث تحسن زيادة تركيز المادة النانوية التغطية السطحية والطرء المائي، بينما يحدد نوع المادة طاقتها السطحية، والغسيل يؤثر تآكلاً تدريجياً يغير WCA.

في المقابل، تكون فروق البلل بين السوائل (ماء، دم، زيت زيتون) أقل وضوحاً مقارنةً بفروق تغير الطوبوغرافيا السطحية، لذا يبدو تأثير نوع القطرة محدوداً نسبياً، لأنه يتفاعل مع سطح محدّد مسبقاً، بينما تغير التعديلات السطحية (مادة، تركيز، غسيل) أساس التفاعل مع جميع السوائل.

جدول (4-10): نتائج اختبار التأثيرات بين المجموعات للعوامل التجريبية (الغسيل، المادة، ونوع القطرة)

Tests of Between-Subjects Effects					
Measure: MEASURE_1					
Transformed Variable: Average					
Sig.	F	Mean Square	df	Type III Sum of Squares	Source
.000	157730.572	5176880.961	1	5176880.961	Intercept
.000	71.207	2337.094	2	4674.189	الغسيل
.001	13.307	436.754	1	436.754	المادة
.511	.683	22.423	2	44.846	القطرة
.000	10.642	349.294	2	698.588	الغسيل * المادة
.962	.149	4.875	4	19.499	الغسيل * القطرة
.234	1.513	49.654	2	99.309	المادة * القطرة
.849	.340	11.146	4	44.585	الغسيل * المادة * القطرة
		32.821	36	1181.557	Error

يبين جدول رقم (4-10) نتائج اختبار التأثيرات بين المجموعات للعوامل التجريبية الثلاثة: الغسيل، المادة،

ونوع القطرة، باستخدام تحليل التباين بين المجموعات (Between-Subjects Effects).

أوضحت النتائج ما يلي:

يوجد تأثير دال إحصائي للغسيل ($Sig = 0.000$)، مما يعني أن عدد مرات الغسيل أثر بشكل واضح على المتغير المقاس.

كذلك ظهر تأثير معنوي للمادة ($Sig = 0.001$)، ما يدل على أن نوع المادة المستخدمة يغير النتائج بشكل مهم.

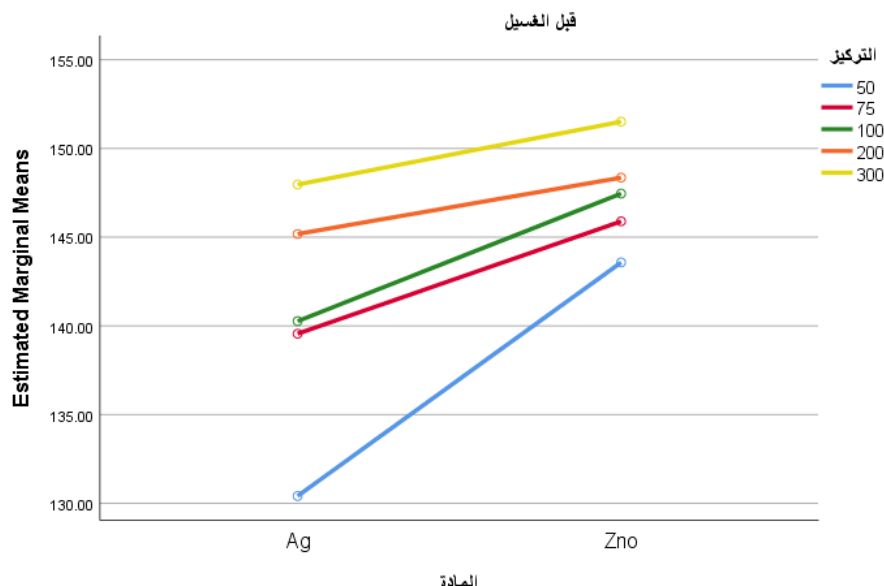
لم يظهر تأثير معنوي للقطرة ($Sig = 0.511$)، أي أن نوع القطرة لا يؤثر بشكل كبير على النتائج.

لم يظهر تفاعل معنوي بين الغسيل والقطرة ($Sig = 0.962$) أو بين المادة والقطرة ($Sig = 0.234$)، ما يعني أن أثر الغسيل والمادة مستقل عن نوع القطرة في هذين التفاعلين.

بالمقابل، وجد تفاعل معنوي بين الغسيل والمادة ($Sig = 0.000$)، ما يشير إلى أن تأثير الغسيل يختلف حسب نوع المادة المستخدمة.

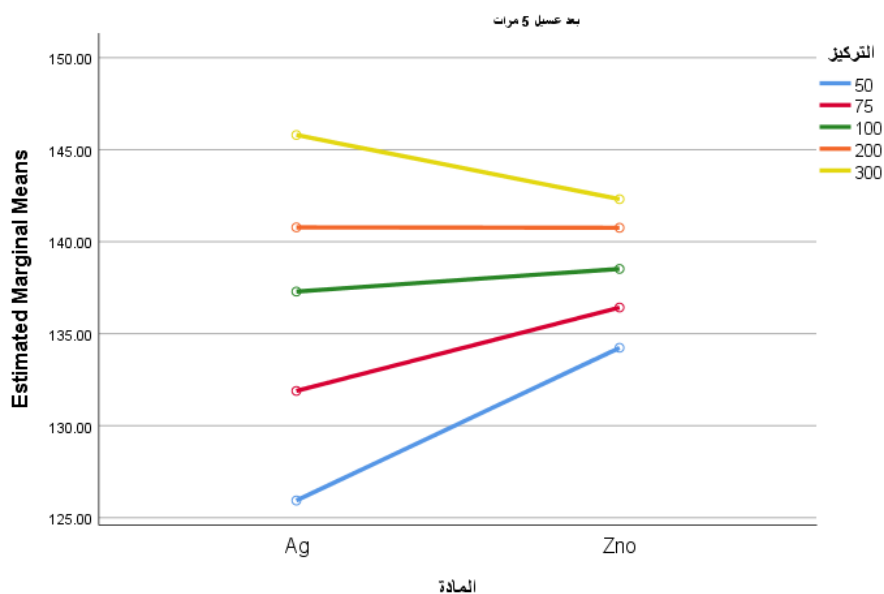
التفاعل الثلاثي بين الغسيل والمادة والقطرة غير معنوي ($Sig = 0.849$)، أي أن العلاقة بين العوامل الثلاثة لا تؤثر بشكل كبير على النتائج النهائية.

بصورة عامة، تظهر النتائج أن الغسيل والمادة هما العاملان الأكثر تأثيراً على المتغير، مع تأثير متبادل بينهما، بينما نوع القطرة ليس له تأثير ملحوظ.

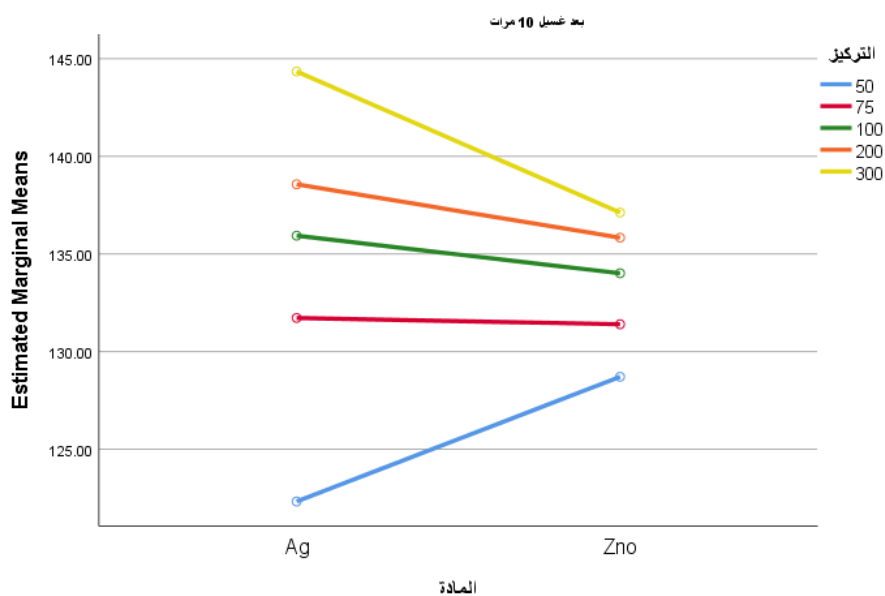


شكل (4-27): تأثير نوع المادة النانوية والتركيز على زاوية التماس قبل الغسيل

يلاحظ من الشكل (4-27) أن معالجة القماش بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$ تزيد من خشونة السطح وتكون بنية ميكروية نانوية تعزز من تكوين حالة كاسي-باكستر، حيث تستقر القطرات على سطح القماش بدلاً من أن تنتشر عليه. كما يظهر أكسيد الزنك النانوي تأثيراً أكبر من تأثير الفضة النانوية بسبب تحسين توزيع وترابط جزيئات ZnO مع مركب الفلوروكربون الذي يخفض طاقة السطح بشكل أكثر فعالية، مما يؤدي إلى ترسيب أفضل لطبقة طرد الماء بكثافة وفعالية أعلى.



شكل (4-28): تأثير نوع المادة النانوية والتركيز على زاوية التماس بعد 5 دورات غسيل



شكل (4-29): تأثير نوع المادة النانوية والتركيز على زاوية التماس بعد 10 دورات غسيل

يلاحظ من الشكل (4-28) ومن الشكل (4-29) أنه بعد خمس أو عشرة دورات غسيل تظهر الأقمشة المعالجة بـ $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ استقراراً أعلى في زوايا التماس مقارنة بالأقمشة المعالجة بـ $\text{ZnO-C}_6\text{F}_6$. يعود ذلك إلى أن الغسيل المتكرر يسبب تآكلاً جزئياً للطبقة البوليمرية C_6F_6 التي يحتجز أكسيد الزنك، وعند تآكل هذه الطبقة تغادر المادة النانوية عينة القماش، مما يؤدي إلى انخفاض زوايا التماس (M. Z. Khan et al., 2018).

بالمقابل، تظهر الفضة النانوية ترابطاً أقوى مع ألياف القطن، خاصة عندما توجد طبقة الفلوروكربون التي تساهم في تحسين تثبيت الجزيئات على الألياف، مما يقلل فقدانها أثناء الغسيل المتكرر. هذا الترابط القوي يعزز من مقاومة الفضة للنواقل والبقاء على السطح لفترات أطول، بالتالي يحافظ القماش على الخصائص الطاردة للماء وثبات زوايا التماس. كما أن الروابط القوية بين جسيمات الفضة والطبقات الفلوروكربونية تحسن من ثباتية مادة المعالجة على الغسيل، بينما طبقات أكسيد الزنك تكون أقل قدرة على الحفاظ على هذه الثباتية (Nam et al., 2020).

جميع المواد الكيميائية والجسيمات النانوية طبقت في شكل تركيبة واحدة مستخدمة عملية تشطيب أقمشة تقليدية، ما يجعلها فعالة من حيث التكلفة دون التضحية بخاصية الطرد المائي للأقمشة.

4.4 دراسة الجدوى الاقتصادية

تهدف الدراسة إلى تقييم الجدوى الاقتصادية لإنتاج القماش القطني المعالج نانويًا عند التركيز الأمثل 300 ppm (جزء في المليون)، وهو التركيز الذي حقق أفضل توازن بين الأداء الوظيفي والثباتية بعد الغسيل في التجارب المخبرية. وتقوم الدراسة على تقدير تكلفة إنتاج المتر الواحد من القماش المعالج، من خلال حساب:

تكاليف المواد الخام (القماش، المواد النانوية، البوليمر، والمواد المساعدة).

تكاليف التشغيل والطاقة.

ثم مقارنة التكلفة الإجمالية مع سعر البيع المقترح في السوق، لتحديد هامش الربح وتقييم الجدوى التنافسية للمنتج مقارنة بالأقمشة التقليدية أو المستوردة ذات الخواص المماثلة.

جدول (4-11): تكاليف تحضير أكسيد الزنك النانوي المختبري

المادة	وحدة القياس	السعر (\$)	الكمية المستخدمة	التكلفة (\$)
أسياتات الزنك	كيلوغرام	3	1 كغ	3
حمض الأوكساليك	كيلوغرام	1	1 كغ	1
الإيثانول	لتر	0.5	10 لتر	5
الإجمالي				9

ملاحظة: نتيجة التخليق المختبري، تم الحصول على 300 غرام من أكسيد الزنك النانوي، بمردود 30% .

- التكلفة الإجمالية للمواد: 9 دولارات.
- تكلفة الغرام الواحد = 9 دولارات / 300 غرام = 0.03 دولار/غرام.

▪ تكلفة الكيلوغرام الواحد = 30 دولار/كغ.

جدول (4-12): تكلفة متر قماش معالج بأكسيد الزنك النانوي (300ppm)

المادة	وحدة القياس	السعر (\$)	الكمية للمتر المربع الواحد	التكلفة (\$)
أكسيد الزنك النانوي	غرام	0.03	0.090 غرام	0.0027
الفلوروكربون (C6)	لتر	2.24	0.300 لتر (مل)	0.672
القماش القطني (غير معالج)	متر	3	1 متر مربع	3
إجمالي تكلفة المواد				3.6747

حساب التكلفة الإجمالية :

- تكلفة التشغيل والطاقة (تقدر بنسبة 2% من سعر القماش) : 3 دولارات $\times 0.02 = 0.06$ دولار.
- التكلفة الإجمالية للمتر المربع = $3.6747 + 0.06 \approx 3.73$ دولار.
- بالعملة المحلية (افتراض سعر صرف \$1 = 11000 ل.س) : $3.73 \times 11000 \approx 41030$ ليرة سورية.

جدول (4-13): تكلفة متر قماش معالج بالفضة النانوية (300ppm)

المادة	وحدة القياس	السعر (\$)	الكمية للمتر المربع الواحد	التكلفة (\$)
الفضة النانوية	غرام	1.5	0.102 غرام	0.153
الفلوروكربون (C6)	لتر	2.24	0.244 لتر (مل)	0.54656
القماش القطني (غير معالج)	متر	3	1 متر مربع	3
إجمالي تكلفة المواد				3.69956

حساب التكلفة الإجمالية:

- تكلفة التشغيل والطاقة (2% من سعر القماش) : 0.06 دولار.
- التكلفة الإجمالية للمتر المربع = 0.06 + 3.69956 ≈ 3.76 دولار.
- بالعملة المحلية: 3.76 × 11000 ≈ 41360 ليرة سورية.

تظهر التحاليل الأولية أن إضافة المعالجة النانوية البوليميرية المدروسة ترفع تكلفة المتر الواحد بنحو 0.73 إلى 0.76 دولار فقط عن سعر القماش الخام (3 دولارات). في المقابل، يكتسب القماش خصائص وظيفية عالية القيمة (طارد للماء، مضاد للجراثيم، وثابت بعد الغسيل)، مما يجعله منتجاً ذا قيمة مضافة مرتفعة وبسعر تنافسي محتمل، خاصة في الاستخدامات الطبية والوظيفية. من المتوقع أن تنخفض هذه التكاليف بشكل أكبر في حالة الإنتاج الصناعي واسع النطاق بسبب اقتصاديات الحجم وشراء المواد بكميات كبيرة.

يبين الجدول (4-14) مقارنة الجدوى الاقتصادية والتقنية للمواد النانوية للقماش القطني الوظيفي.

جدول (4-14): مقارنة الجدوى الاقتصادية والتقنية للمواد النانوية للقماش القطني الوظيفي

المعيار / المادة	القماش التقليدي غير المعالج (مرجعي)	القماش المعالج بـ ZnO- NPs (300 ppm)	القماش المعالج بـ Ag-NPs (300 ppm)	القماش المعالج بـ TiO ₂ -NPs (جديد افتراضي) (300ppm)
التكلفة الإجمالية للمتر (\$)	3.00	3.73	3.76	3.85 (تقديري)
الزيادة في التكلفة (\$)	0.00	+0.73	+0.76	+0.85
الزيادة في التكلفة (%)	0%	+24%	+25%	+28%
الخصائص الوظيفية	لا يوجد	- مضاد للجراثيم (99.8%) - طارد ممتاز للماء والزيت والدم - ثبات بعد الغسيل	- مضاد للجراثيم (100%) - طارد للماء والزيت والدم - ثبات بعد الغسيل	- فعالية فائقة مضادة للفيروسات والفطريات - خواص تحفيز ضوئي (تكسير الملوثات العضوية ذاتياً) - طارد للماء
الميزة التنافسية الأساسية	السعر المنخفض	توازن ممتاز بين التكلفة والأداء الوظيفي	الفعالية المضادة للميكروبات الأعلى	أداء متعدد الوظائف وذكي (تقنية ذاتية للتهواء/السطح)
المنفعة المضافة	لا يوجد	خفض مخاطر العدوى، زيادة راحة المريض	حماية قصوى ضد مسببات الأمراض المقاومة	بيئة علاجية أنظف، تقليل استخدام المطهرات الكيميائية
السعر المقترح للمتر (\$)	3.00 - 4.00	5.50 - 6.50	5.80 - 6.80	6.50 - 7.50 (تقديري)

هامش الربح التقريبي (%)	0% - 33%	47% - 74%	54% - 81%	69% - 95%(تقديري)
الجدوى من حيث القيمة	منخفضة (سلعة أساسية)	عالية جداً	عالية جداً	عالية وعصرية(توجه تقني مبتكر)
التطبيقات المقترحة	الاستخدامات العامة	ملءات المستشفيات، الملابس الواقية، مفروشات العناية بالمريض	غرف العمليات، وحدات العناية المركزة، ملابس الجراحين	وحدات العزل، غرف المرضى ذوي المناعة الضعيفة، مرافق الرعاية طويلة الأمد

جدول (4-15): ملخص التوصيات بناء على الجدول

المادة	التوصية	المبرر الأساسي
1 Zno- NPs	اقتصادي	يوفر أعلى قيمة مقابل التكلفة مع أداء وظيفي ممتاز وثباتية لكون المبادرات الأساسية المستخدمة لتصنيع أكسيد الزنك رخيصة الثمن، مما يجعله مناسباً للتطبيق على نطاق واسع في المستشفيات.
2 Ag-NPs	الأمثل ضد الجراثيم	الفعالية المضادة للجراثيم الأعلى (100%) مثالية للمناطق الحرجة في المستشفى رغم التكلفة الأعلى قليلاً.
3 مادة أخرى (مثل TiO ₂)	الأمثل للمحفزات الضوئية ومواد التجميل	أداء وظيفي فريد ولكنه غالي الثمن لأن المبادرة الأساسية لتصنيع أكسيد التيتانيوم غالية الثمن

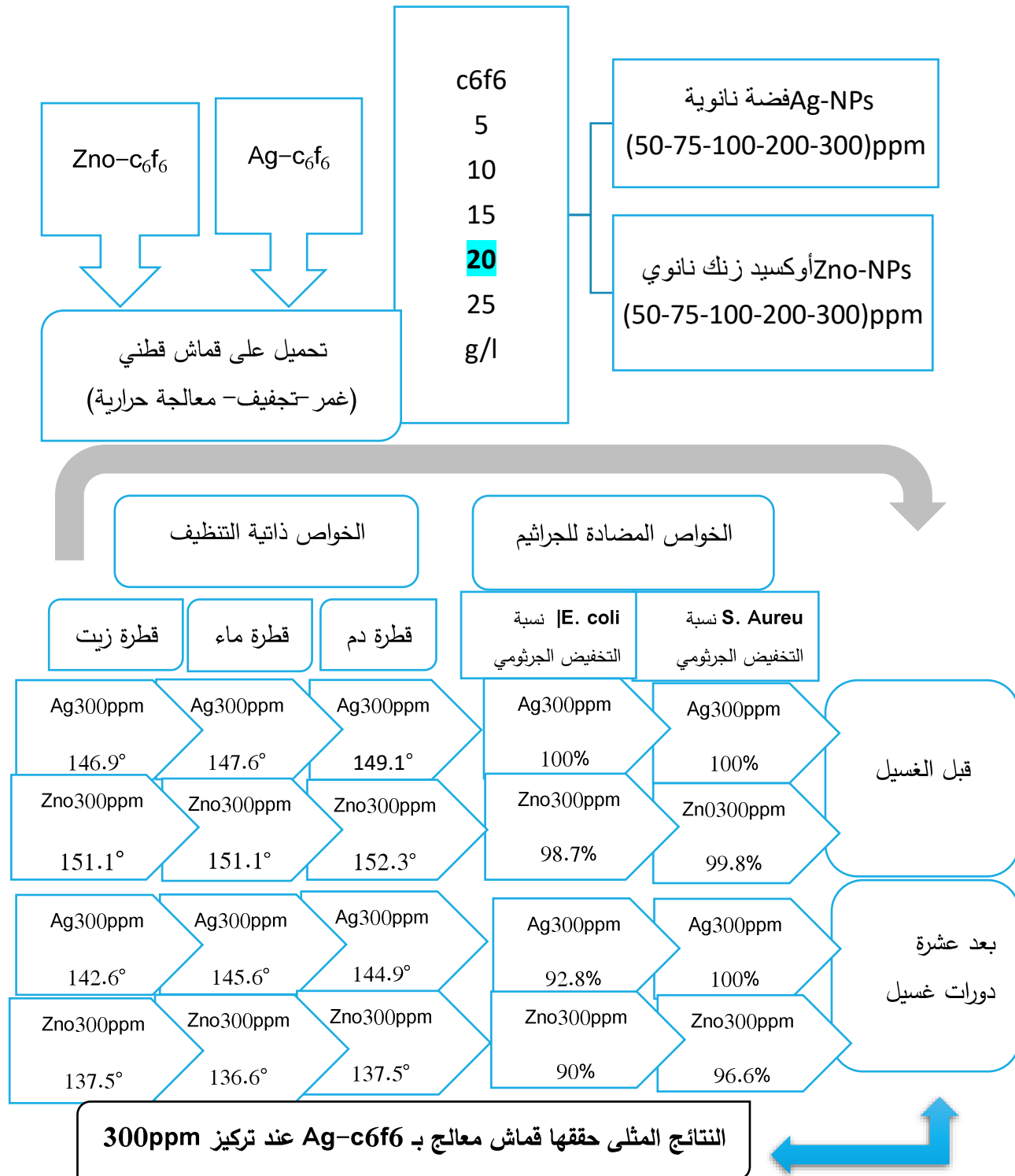
توضح المقارنة أن الاستثمار في المعالجة النانوية يحول القماش من سلعة أساسية إلى منتج عالي القيمة المضافة بهامش ربح مقبول، مع فوائد جوهرية في تحسين النتائج الصحية وخفض التكاليف الطبية طويلة الأمد المرتبطة بالعدوى المكتسبة من المستشفيات.

5. الفصل الخامس: الخاتمة

الخاتمة:

في الختام، لم يكن هذا البحث مجرد تجربة علمية، بل كان جسراً يربط بين المختبرات البحثية والتطبيقات الصناعية، السورية، حيث تم تحضير قماش طبي (غطاء سرير مشفى) يوفر راحة لمرضى قرح الفراش ومرضى العناية المشددة ومرضى الكسور الذين يصعب تحريكهم بما يقلل من العدوى المكتسبة في المستشفيات عن طريق المنسوجات ويخفض من تكلفة التنظيف والتعقيم المتكرر وكذلك يقلل عدد مرات تبديلها.

يلخص الشكل (1-5) المتغيرات الأساسية والنتائج المثلى للبحث، حيث أظهر المخطط التفصيلي تفوق تركيز 300ppm من الفضة النانوية Ag مع الفلوروكربون بتركيز 40 غ/ل كأفضل مركب، محققاً فعالية مضادة للجراثيم عالية بلغت 92.8% لجراثيم E.coli و 100% لجراثيم بعد S.aureus مع زاوية التماس على $^{\circ}(135-138)$ درجة بعد 10 دورات غسيل.



شكل (5-1): مخطط تفصيلي يوضح المتغيرات الأساسية في البحث المدروس والنتائج المثلى

1.5 الاستنتاجات:

- ❖ أظهرت نتائج هذا العمل إمكانية تطوير أقمشة قطنية وظيفية متعددة الخصائص اعتماداً على المعالجة النانوية البوليميرية منخفضة الكلفة، مع تحقيق توازن فعال بين النشاط المضاد للجراثيم، والخواص الكارهة للماء والدم، والثباتية العالية تجاه الغسيل المتكرر، مما يؤكد جدوى التطبيق العملي لهذه المواد في الاستخدامات الطبية.
- ❖ تمّ بنجاح تحضير الفضة النانوية الغروية بطريقة خضراء وبأبعاد نانوية منتظمة تراوحت بين 30-60 نانومتر مع درجة عالية من النقاوة والتجانس البلوري، وهو ما أكدته نتائج التحليل العنصري (EDX) كما تبين أن ضبط قيمة PH المحلول عند $pH = 9$ يعد عاملاً حاسماً للحصول على جسيمات ذات أبعاد أصغر وتوزيع حجمي أكثر تجانساً.
- ❖ جرى تحضير مسحوق أكسيد الزنك النانوي بطريقة السول-جل بمتوسط قطر بلغ 54nm، وبتركيب ستوكيومترى قريب من المثالي، مع غياب أي شوائب، في حين أظهر تحليل الانعراج بالأشعة السينية (XRD) بنية بلورية مستقرة بمتوسط بعد بلوري قدره 37nm، مما يعكس جودة عالية في عملية التحضير.
- ❖ أثبتت الدراسة أن التركيز الأمثل لراتنج الفلوروكربون سداسي الفلور (C_6F_6) يساوي 20 غ/ل، حيث شكّل تركيزاً حدياً يحقق أفضل توازن بين الخواص السطحية والفيزيائية للأقمشة المعالجة. وقد أظهرت عينات القماش ذات الكثافة النسيجية الأعلى باتجاه السداء واللحمة أداءً متفوقاً من حيث مقاومة نفاذية الماء وزاوية التماس، نتيجة لتحسن البنية السطحية الدقيقة.
- ❖ تم بنجاح دمج جسيمات الفضة النانوية وأكسيد الزنك النانوي مع راتنج C_6F_6 للحصول على مركبات نانوية بوليميرية، وتم تطبيقها على الأقمشة باستخدام تقنية (Pad-Dry-Cure) التقليدية، والتي تمتاز بانخفاض كلفتها وسهولة تطبيقها صناعياً، دون التأثير السلبي على الخصائص الميكانيكية الأساسية للنسيج.

- ❖ أظهرت الاختبارات الحيوية النوعية وفق المواصفة القياسية (AATCC 147:2004) قدرة الأقمشة المعالجة على تثبيط نمو الجراثيم على سطحها، رغم غياب هالة تثبيط واضحة، ويعزى ذلك إلى الارتباط القوي للمواد النانوية ببنية القماش ووجود طبقة بوليمرية عازلة من C_6F_6 تحد من انتشارها إلى الوسط المحيط.
- ❖ أما الاختبارات الحيوية الكمية وفق المواصفة (AATCC 100:2004)، فقد بينت أن الأقمشة المعالجة بـ $ZnO-C_6F_6$ حققت نسب تثبيط مرتفعة لنمو الجراثيم، ازدادت بزيادة تركيز أكسيد الزنك، مع ملاحظة انخفاض تدريجي في الفعالية بعد دورات الغسيل المتكررة. في المقابل، أظهرت الأقمشة المعالجة بـ $Ag-C_6F_6$ تفوقاً واضحاً من حيث شدة التثبيط الجرثومي والثباتية العالية بعد الغسيل، ويعزى ذلك إلى آلية الإطلاق البطيء لأيونات الفضة، التي تضمن استمرار النشاط المضاد للجراثيم لفترات أطول مقارنة بأكسيد الزنك النانوي.
- ❖ تبين أن مقاومة الأقمشة المعالجة كانت أعلى تجاه الجراثيم موجبة الغرام (*Staphylococcus aureus*) مقارنة بالجراثيم سالبة الغرام (*Escherichia coli*)، نتيجة الاختلاف البنيوي في جدار الخلية الجرثومية، وهو ما يتوافق مع ما ورد في الأدبيات العلمية.
- ❖ أظهرت معالجة الأقمشة بجسيمات ZnO النانوية، وبالاشتراك مع C_6F_6 ، قدرة ملحوظة على تعزيز خشونة السطح وتشكيل بنية نانوية-ميكروية مركبة تدعم نموذج كاسي-باكستر (Cassie-Baxter)، مما أدى إلى تحسين واضح في الخواص الطاردة للماء والدم. وقد لوحظ أن ZnO النانوي يسهم بفعالية أكبر في تعزيز الخشونة السطحية قبل الغسيل، في حين أظهرت الفضة النانوية ثباتاً أعلى لهذه الخواص بعد الغسيل.
- ❖ سجلت زوايا تماس مرتفعة لقطرات الدم على الأقمشة المعالجة، تجاوزت 150° عند تراكيز 300 ppm لكل من ZnO و Ag ، مما يؤكد تحقيق خاصية الطرد الفائق للسوائل الحيوية. كما أظهرت الدراسة الإحصائية أن نوع المادة النانوية، وتركيزها، وعدد دورات الغسيل تمثل العوامل الأكثر تأثيراً في كل من النشاط المضاد للجراثيم وزاوية التماس، مع وجود تفاعلات مشتركة ذات دلالة إحصائية عالية بين هذه العوامل.

- ❖ خلصت الدراسة إلى أن أفضل أداء متكامل من حيث الخصائص المضادة للجراثيم، والخواص ذاتية التنظيف، والثباتية العالية تجاه الغسيل تحقق عند استخدام القماش المعالج بمركب $\text{Ag-C}_6\text{F}_6$ بتركيز 300 ppm، مما يجعله المرشح الأمثل للتطبيقات الطبية المتقدمة.
- ❖ وأخيرا، أظهرت دراسة الجدوى الاقتصادية أن المعالجة النانوية البوليمرية المقترحة تؤدي إلى زيادة طفيفة في تكلفة المتر الواحد من القماش (نحو 0.73-0.76 دولار)، مقابل اكتساب خصائص وظيفية عالية القيمة، مما يجعل المنتج النهائي ذا جدوى اقتصادية وتنافسية مرتفعة، خاصة في مجال المنسوجات الطبية.

2.5 التوصيات:

- نوصي بالمركبات الهجينة بين مادة بوليميرية ومادة نانوية والتي ترفع من كفاءة الأقمشة المعالجة في مقاومة الماء والجراثيم بشكل متوازن ومستدام.
- نوصي باستخدام المركبات البوليميرية النانوية المحضرة في هذا البحث كمواد مضادة للجراثيم تكسب الأقمشة القطنية خصائص مضادة للجراثيم لتكون بديل واعد في مجال الأقمشة الطبية وعوضاً عن الأقمشة المستوردة.
- نوصي باستخدام المركبات البوليميرية النانوية المحضرة في هذا البحث كمواد طاردة للماء تكسب الأقمشة القطنية المعالجة بها خصائص ذاتية التنظيف تحسن من جودة ونوعية الأقمشة الطبية وتكون بديلاً واعداً عن الأقمشة المستوردة.
- تأسيس وإحداث شعبة مختصة بتطبيقات تقانة النانو في الصناعات النسيجية وتكون هذه الشعبة تابعة لقسم هندسة ميكانيك الصناعات النسيجية وتقاناتها.
- السعي لعقد اتفاقية توءمة أو تعاون مع قسم مختص بتطبيقات تقانة النانو في الصناعات النسيجية في إحدى الدول الصديقة والمتقدمة عالمياً في هذا المجال
- التشجيع على اجراء أبحاث حول التأثيرات البيولوجية والصحية للمواد النانوية المستخدمة في هذه الأطروحة على الإنسان.

3.5 مقترحات البحث المستقبلية:

- إن تركيبة مشتركة بين جسيمات الفضة وجسيمات أكسيد الزنك يمكن أن تحقق استفادة متبادلة من خصائصهما المميزة، حيث توفر الفضة النانوية نشاطاً مضاداً للجراثيم وثباتية عالية على الغسيل، بينما يقدم أكسيد الزنك نمط تحلل ضوئي يعزز من التنظيف الذاتي.
- البحث عن مواد بوليميرية طاردة للماء وصديقة للبيئة كبداية للفلوروكربونات التقليدية، ممكن أن توفر خصائص طرد ممتازة مع تقليل الأثر البيئي وتكون بأسعار مقبولة تلبي متطلبات السوق.
- دراسة طرق تصنيع اقتصادية تسمح بإنتاج أقمشة وظيفية على نطاق واسع بجودة مقبولة تحقق متانة الأداء عبر دورات غسيل متعددة.
- تقييم السمية البيئية والصحية للأقمشة المعالجة ضرورة لضمان سلامة الاستخدام على المستويين الفردي والمجتمعي، مع الالتزام بالمعايير الدولية المعمول بها.
- تطوير أقمشة وظيفية للاستخدام في الملابس الرياضية، الملابس الواقية ، المنسوجات المنزلية باستخدام مواد نانوية.

4.5 الأعمال المرافقة للبحث

1- دراسة تأثير المعالجة النهائية الطاردة للماء بمركب الفلوروكربون C_6F_6 على الخواص الفيزيائية للأقمشة القطنية المنسوجة. قبول النشر بتاريخ 2024/6/30 - مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية. سلام محمود، د.باسل يونس، د. إبراهيم الغريبي.

2- تحسين الخصائص المضادة للبكتيريا للأقمشة القطنية المعالجة باستخدام جسيمات أكسيد الزنك النانوي للتطبيقات الطبية. قبول النشر بتاريخ 2025/3/6 - مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية. سلام محمود، د.باسل يونس، د. إبراهيم الغريبي.

3- Development of antibacterial and hydrophobic cotton fabrics using zinc oxide and fluorocarbon nanocomposite -The Journal of The Textile Institute - 11 Jun 2025 - Salam Mahmoud, Ibrahim Alghoraibi, Basel Younes & Raghad Zein DOI: 10.1080/00405000.2025.2515624

4- مشاركة بملصق علمي في المعرض الأول لطلاب وباحثون في خدمة المجتمع ٢٠٢٥ جامعة دمشق

a. المراجع:

1. Abdelbaky, A. S., Mohamed, A. M. H. A., Sharaky, M., Mohamed, N. A., & Diab, Y. M. (2023). Green approach for the synthesis of ZnO nanoparticles using *Cymbopogon citratus* aqueous leaf extract: characterization and evaluation of their biological activities. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 63. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00432-5>
2. Adeyemi, O. S., Shittu, E. O., Akpor, O. B., Rotimi, D., & Batiha, G. E. S. (2020). Silver nanoparticles restrict microbial growth by promoting oxidative stress and DNA damage. *EXCLI Journal*, 19, 492–500. <https://doi.org/10.17179/excli2020-1244>
3. Afzal, S., Daoud, W. A., & Langford, S. J. (2014). Superhydrophobic and photocatalytic self-cleaning cotton. *J. Mater. Chem. A*, 2(42), 18005–18011. <https://doi.org/10.1039/C4TA02764G>
4. Alshammari, B. H., Lashin, M. M. A., Mahmood, M. A., Al-mubaddel, F. S., Ilyas, N., Rahman, N., Sohail, M., Khan, A., Abdullaev, S. S., & Khan, R. (2023). *Organic and inorganic nanomaterials: fabrication, properties and applications*. 13735–13785. <https://doi.org/10.1039/d3ra01421e>
5. Amer, S. I. I. M. (2024). Attaining Sustainable development by using Treatment with Titanium Dioxide to produce protective Clothing fabrics for Workers in the field of Self-Cleaning Inks. *International Design Journal*, 14(5), 85–96. <https://doi.org/10.21608/idj.2024.372639>
6. Anaya-Zavaleta, J. C., Ledezma-Pérez, A. S., Gallardo-Vega, C., Rodríguez-Hernández, J., Alvarado-Canché, C. N., García-Casillas, P. E., de León, A., & Herrera-May, A. L. (2025). ZnO Nanoparticles by Hydrothermal Method: Synthesis and Characterization. *Technologies*, 13(1), 18. <https://doi.org/10.3390/technologies13010018>
7. Anita, S., Ramachandran, T., Rajendran, R., Koushik, C. V., & Mahalakshmi, M. (2010). Preparation and characterization of zinc oxide nanoparticles and a study of the anti-microbial property of cotton fabric treated with the particles. *Journal of*

- Textile and Apparel, Technology and Management*, 6(4).
8. Ashour, M. A., & Abd-Elhalim, B. T. (2024). Biosynthesis and biocompatibility evaluation of zinc oxide nanoparticles prepared using *Priestia megaterium* bacteria. *Scientific Reports*, 14(1), 4147. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54460-8>
 9. Asmat-Campos, D., Delfín-Narciso, D., & Juárez-Cortijo, L. (2021). Textiles functionalized with zno nanoparticles obtained by chemical and green synthesis protocols: Evaluation of the type of textile and resistance to uv radiation. *Fibers*, 9(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/fib9020010>
 10. Audenaert, F., Lens, H., Rolly, D., & Vander Elst, P. (1999). Fluorochemical Textile Repellents—Synthesis and Applications: A 3M Perspective. *Journal of the Textile Institute*, 90(3), 76–94. <https://doi.org/10.1080/00405009908659480>
 11. Babayevska, N., Przysiecka, Ł., Iatsunskyi, I., Nowaczyk, G., Jarek, M., Janiszewska, E., & Jurga, S. (2022). ZnO size and shape effect on antibacterial activity and cytotoxicity profile. *Scientific Reports*, 12(1), 8148. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12134-3>
 12. Babu, B. S., Srinivasan, R., Potnuru, B. K., Ramanan, N., Gopikrishnan, P., Vijayandrahari, A. P., Sripragash, M., Santhosh, M., & Yuthith Venkatesh, K. P. (2021). Synthesis of zinc oxide nanoparticles and its applications in the surface modification of textile materials. *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials*, 13(4), 171–176. <https://doi.org/10.15251/jobm.2021.134.171>
 13. Bacciarelli-Ulacha, A., Rybicki, E., Matyjas-Zgondek, E., Pawlaczyk, A., & Szynkowska, M. I. (2014). A new method of finishing of cotton fabric by in situ synthesis of silver nanoparticles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(11), 4147–4155. <https://doi.org/10.1021/ie4011113>
 14. Bapan Adak, S. M. (2023). *Smart and Functional Textiles* (B. Adak & S. Mukhopadhyay (eds.)). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110759747>
 15. Barthlott, W., Mail, M., Bhushan, B., & Koch, K. (2017). Plant Surfaces : Structures and Functions for Biomimetic Innovations. *Nano-Micro Letters*, 9(2), 1–40. <https://doi.org/10.1007/s40820-016-0125-1>

16. Basavaraju, M., & Gunashree, B. S. (2023). *Escherichia coli : An Overview of Main Characteristics . Escherichia Coli - Old and New Insights, November*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105508>
17. Beek, L., Skirde, J. E., Akdere, M., & Gries, T. (2024). Bio-Inspired Textiles for Self-Driven Oil–Water Separation—A Simulative Analysis of Fluid Transport. *Biomimetics*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/biomimetics9050261>
18. Belay, A., Mekuria, M., & Adam, G. (2020a). Incorporation of zinc oxide nanoparticles in cotton textiles for ultraviolet light protection and antibacterial activities. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 10, 184798042097005. <https://doi.org/10.1177/1847980420970052>
19. Belay, A., Mekuria, M., & Adam, G. (2020b). Incorporation of zinc oxide nanoparticles in cotton textiles for ultraviolet light protection and antibacterial activities. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 10(October). <https://doi.org/10.1177/1847980420970052>
20. Borkowicz, A., Analyst, M. I., & Analyst, M. I. (2017). *Towards Sustainable Water-repellent Solutions in Outdoor Textiles*. 1–32.
21. Bormashenko, E., Pogreb, R., Whyman, G., & Erlich, M. (2007). Cassie-Wenzel wetting transition in vibrating drops deposited on rough surfaces: Is the dynamic Cassie-Wenzel wetting transition a 2D or 1D affair? *Langmuir*, 23(12), 6501–6503. <https://doi.org/10.1021/la700935x>
22. Bracco, G., & Holst, B. (2013). Surface science techniques. In *Springer Series in Surface Sciences* (Vol. 51, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1>
23. Çakır, B. A., Budama, L., Topel, Ö., & Hoda, N. (2012). Synthesis of ZnO nanoparticles using PS-b-PAA reverse micelle cores for UV protective, self-cleaning and antibacterial textile applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 414, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.08.015>
24. Chakrabarty, S., & Jasuja, K. (2022). Applications of Nanomaterials in the Textile Industry. In *Nanoscale Engineering of Biomaterials: Properties and Applications*

- (Issue February, pp. 567–587). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3667-7_20
25. Chen, H., Zhang, G., Zhang, W., & Gao, W. (2023). Silver nanoparticles deposited on a cotton fabric surface via an in situ method using reactive hyperbranched polymers and their antibacterial properties. *RSC Advances*, 13(17), 11450–11456. <https://doi.org/10.1039/d3ra00989k>
26. Choi, M., Brabec, C., & Hayakawa, T. (2022). X-ray Diffraction, Micro-Raman and X-ray Photoemission Spectroscopic Investigations for Hydrothermally Obtained Hybrid Compounds of Delafossite CuGaO₂ and Wurtzite ZnO. *Ceramics*, 5(4), 655–672. <https://doi.org/10.3390/ceramics5040048>
27. Danels, D. M. A. (2002). *Textile Terms And Definitions*, 11th Edition. The Textile Institute. <https://doi.org/10.1002/9781870372442>
28. Darmanin, T., & Guittard, F. (2015). Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature. *Materials Today*, 18(5), 273–285. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.01.001>
29. Dastjerdi, R., Montazer, M., & Shahsavan, S. (2010). A novel technique for producing durable multifunctional textiles using nanocomposite coating. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 81(1), 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.06.023>
30. de Romaña, D. L., Brown, K. H., & Guinard, J. (2002). Sensory Trial to Assess the Acceptability of Zinc Fortificants Added to Iron-fortified Wheat Products. *Journal of Food Science*, 67(1), 461–465. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11429.x>
31. Deepa, Ameen, F., Amirul Islam, M., & Dhanker, R. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles from vegetable waste of pea *Pisum sativum* and bottle gourd *Lagenaria siceraria*: Characterization and antibacterial properties. *Frontiers in Environmental Science*, 10(August), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.941554>
32. Derek Heywood (Ed.). (2003). *Textile Finishing*. Sacola Associates, Cheadle

- Hulme, UK,. <https://doi.org/0901956813>
33. Dowling, A., Clift, R., Grobert, N., Hutton, D., Oliver, R., O'neill, O., Pethica, J., Pidgeon, N., Porritt, J., Ryan, J., & Al., E. (2004). Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. *London The Royal Society The Royal Academy of Engineering Report*, 46(July), 618–618. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Nanoscience+and+nanotechnologies+:+opportunities+and+uncertainties#0>
 34. Dr. Charles Tomasino. (1979). *Chemistry & technology of fabric preparation & finishing*. 40–70.
 35. Eberhard, W. G., & Wcislo, W. T. (2012). Plenty of room at the bottom? *American Scientist*, 100(3), 226–233. <https://doi.org/10.1511/2012.96.226>
 36. Elmaaty, T. M. A. (2018). *ZnO and TiO2 Nanoparticles as Textile Protecting Agents against UV Radiation: A Review*. April. <https://doi.org/10.9734/AJOCS/2018/40329>
 37. Eskani, I. N., Astuti, W., Farida, Haerudin, A., Setiawan, J., Lestari, D. W., Isnaini, & Widayatno, T. (2022). Antibacterial activities of synthesised ZnO nanoparticles applied on reactive dyed batik fabrics. *Journal of the Textile Institute*, 113(3), 430–439. <https://doi.org/10.1080/00405000.2021.1883907>
 38. Fluhr, J. W., Breternitz, M., Kowatzki, D., Bauer, A., Bossert, J., Elsner, P., & Hipler, U. C. (2010). Silver-loaded seaweed-based cellulosic fiber improves epidermal skin physiology in atopic dermatitis: Safety assessment, mode of action and controlled, randomized single-blinded exploratory in vivo study. *Experimental Dermatology*, 19(8), 9–15. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0625.2009.00943.x>
 39. Ganesh, V. A., Raut, H. K., Nair, A. S., & Ramakrishna, S. (2011). A review on self-cleaning coatings. *Journal of Materials Chemistry*, 21(41), 16304. <https://doi.org/10.1039/c1jm12523k>
 40. Gao, L., & McCarthy, T. J. (2006). “Artificial Lotus Leaf” Prepared Using a 1945 Patent and a Commercial Textile. *Langmuir*, 22(14), 5998–6000. <https://doi.org/10.1021/la061237x>

41. Gao, Y., & Cranston, R. (2008). Recent Advances in Antimicrobial Treatments of Textiles. *Textile Research Journal*, 78(1), 60–72.
<https://doi.org/10.1177/0040517507082332>
42. Ghayempour, S., & Montazer, M. (2017). Ultrasound irradiation based in-situ synthesis of star-like Tragacanth gum/zinc oxide nanoparticles on cotton fabric. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 458–465.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.019>
43. Ghosh, J., Islam, M. R., & Chakraborty, A. (2020). A Qualitative Analysis of Different Types of Water Repellent Agent Used on Cotton Fabric. *European Scientific Journal ESJ*, 16(6), 471–482.
<https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n6p471>
44. Ghosh, J., Rupanty, N. S., Noor, T., Asif, T. R., Islam, T., & Reukov, V. (2025a). Functional coatings for textiles: advancements in flame resistance, antimicrobial defense, and self-cleaning performance. *RSC Advances*, 15(14), 10984–11022.
<https://doi.org/10.1039/D5RA01429H>
45. Ghosh, J., Rupanty, N. S., Noor, T., Asif, T. R., Islam, T., & Reukov, V. (2025b). Functional coatings for textiles: advancements in flame resistance, antimicrobial defense, and self-cleaning performance. *RSC Advances*, 15(14), 10984–11022.
<https://doi.org/10.1039/D5RA01429H>
46. Gillen, A. L. (2022). The Directed Steps of Hans Christian Gram: How providence played a role in the Gram stain, which illumines the ordered pattern of bacterial cell walls and helps identify pathogens of infectious diseases. *Faculty Publications and Presentations Liberty University*, 1–15.
https://digitalcommons.liberty.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1197&context=bio_chem_fac_pubs
47. Gokarneshan N., S. L. and M. M. (2015). Nano finishing of cotton fabrics. *International Journal of Applied Engineering and Technology*, 5(3), 63–75.
48. Gudkov, S. V., Burmistrov, D. E., Serov, D. A., Rebezov, M. B., Semenova, A. A., & Lisitsyn, A. B. (2021). A Mini Review of Antibacterial Properties of ZnO

- Nanoparticles. *Frontiers in Physics*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.641481>
49. Gulati, R., Sharma, S., & Sharma, R. K. (2022). Antimicrobial textile: recent developments and functional perspective. *Polymer Bulletin*, 79(8), 5747–5771. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03826-3>
50. Hassan, A., Anik, R., & Akter, M. (2023). *Nanotechnology for High-Performance Textiles: A Promising Frontier for Innovation*. 202300205. <https://doi.org/10.1002/cnma.202300205>
51. Haydon, B. (2013). *Nanomaterials and their applications in textiles, standards: domestic standardization for canadian manufacturers and importers and international*.
52. He, Z., & Liu, Y. (2021). Fourier transform infrared spectroscopic analysis in applied cotton fiber and cottonseed research: A review. *Journal of Cotton Science*, 25(2), 167–183. <https://doi.org/10.56454/inbj9899>
53. Hebeish, A., Abdel-Mohdy, F. A., Fouda, M. M. G., Elsaid, Z., Essam, S., Tammam, G. H., & Drees, E. A. (2011). Green synthesis of easy care and antimicrobial cotton fabrics. *Carbohydrate Polymers*, 86(4), 1684–1691. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.086>
54. Hernández-Alonso, M. D., Fresno, F., Suárez, S., & Coronado, J. M. (2009). Development of alternative photocatalysts to TiO₂: Challenges and opportunities. *Energy & Environmental Science*, 2(12), 1231. <https://doi.org/10.1039/b907933e>
55. Hochvaldová, L., Panáček, D., Válková, L., Večeřová, R., Kolář, M., Pruček, R., Kvítek, L., & Panáček, A. (2024). E. coli and S. aureus resist silver nanoparticles via an identical mechanism, but through different pathways. *Communications Biology*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-07266-3>
56. Holmquist, H., Schellenberger, S., van der Veen, I., Peters, G. M., Leonards, P. E. G., & Cousins, I. T. (2016). Properties, performance and associated hazards of state-of-the-art durable water repellent (DWR) chemistry for textile finishing. *Environment International*, 91, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.035>

57. Huang, C., Cai, Y., Chen, X., & Ke, Y. (2022). Silver-based nanocomposite for fabricating high performance value-added cotton. *Cellulose*, 29(2), 723–750. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04257-z>
58. Ibrahim, N. A., Ameen, H. A., & Eid, B. M. (2024). Green synthesized chitosan and ZnO nanoparticles for sustainable use in multifunctionalization of cellulosic fabrics. *Polymer Bulletin*, 81(4), 3621–3640. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04887-2>
59. Ishwarya, R., Rajaganesh, R., Geetha, M., Kalaiarasi, G., Arul, N., Tharani, J., Kavithaa, K., & Sangeetha, D. (2024). Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential biological application as an antimicrobial and anticancer agent. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 62, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103417>
60. Jafari, N., Karimi, L., Mirjalili, M., & Derakhshan, S. J. (2016). Effect of Silver Particle size on color and Antibacterial properties of silk and cotton Fabrics. *Fibers and Polymers*, 17(6), 888–895. <https://doi.org/10.1007/s12221-016-6052-4>
61. Jain, A., Kongkham, B., Puttaswamy, H., Butola, B. S., Malik, H. K., & Malik, A. (2022). Development of Wash-Durable Antimicrobial Cotton Fabrics by In Situ Green Synthesis of Silver Nanoparticles and Investigation of Their Antimicrobial Efficacy against Drug-Resistant Bacteria. *Antibiotics*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/antibiotics11070864>
62. Jongprateep, O., Mani-lata, C., Sakunrak, Y., Audcharuk, K., Narapong, T., Janbooranapinij, K., Pitiphattharabun, S., Lertworasirikul, A., Laobuthee, A., Thengchaisri, N., Ajiro, H., Yoshida, H., & Panomsuwan, G. (2021). Titanium dioxide and fluoropolymer-based coating for smart fabrics with antimicrobial and water-repellent properties. *RSC Advances*, 12, 588–594. <https://doi.org/10.1039/D1RA05634D>
63. Juenger, M., Ladwig, A., Staecker, S., Arnold, A., Kramer, A., Daeschlein, G., Panzig, E., Haase, H., & Heising, S. (2006). Efficacy and safety of silver textile in the treatment of atopic dermatitis (AD). *Current Medical Research and Opinion*, 22(4), 739–750. <https://doi.org/10.1185/030079906X99990>

64. Kafafy, H., Shahin, A. A., Mashaly, H. M., Helmy, H. M., & Zaher, A. (2021). Treatment of cotton and wool fabrics with different nanoparticles for multifunctional properties. *Egyptian Journal of Chemistry*, 64(9), 5257–5269. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.72780.3609>
65. Kalra, K., Chhabra, V., & Prasad, N. (2022). Antibacterial activities of zinc oxide nanoparticles: A mini review. *Journal of Physics: Conference Series*, 2267(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2267/1/012049>
66. Karthikeyan, C., Tharmalingam, N., Varaprasad, K., Mylonakis, E., & Yallapu, M. M. (2021). Biocidal and biocompatible hybrid nanomaterials from biomolecule chitosan, alginate and ZnO. *Carbohydrate Polymers*, 274, 118646. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118646>
67. Kathirvelu, S., D'Souza, L., & Dhurai, B. (2008). Nanotechnology applications in textiles. *Indian Journal of Science and Technology*, 1(5), 1–45. <https://doi.org/10.17485/ijst/2008/v1i5.14>
68. Ke Thanh, N. V., & Phuong Phong, N. T. (2009). Investigation of antibacterial activity of cotton fabric incorporating nano silver colloid. *Journal of Physics: Conference Series*, 187, 1–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/187/1/012072>
69. Khan, I., Amran, A. H., Mou, R. H., & Yeasin, M. (2023). *Performance Evaluation of Water and Oil Repellent Finishes on Plain Weave Cotton Fabrics*. September, 201–214. <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.5281/z enodo.4783454>
70. Khan, M., Saeed, M. A., Ullah, S., Repon, M. R., Pranta, A. D., Yunusov, N., & Hossain, M. M. (2024). Development of self-cleaning and antibacterial properties on cotton fabric using silver nanoparticles and PFOTS. *SPE Polymers*, 5(4), 568–575. <https://doi.org/10.1002/pls2.10143>
71. Khan, M. Z., Baheti, V., Ashraf, M., Hussain, T., Ali, A., Javid, A., & Rehman, A. (2018). Development of UV Protective, Superhydrophobic and Antibacterial Textiles Using ZnO and TiO₂ Nanoparticles. *Fibers and Polymers*, 19(8), 1647–1654. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7935-3>
72. Kiekens, P., Van der Burght, E., Kny, E., Uyar, T., & Milašius, R. (2014).

- Functional Textiles – From Research and Development to Innovations and Industrial Uptake. *Autex Research Journal*, 14(4), 219–225. <https://doi.org/10.2478/aut-2014-0031>
73. Kovács, Z., Molnár, C., Gyulavári, T., Magyari, K., Tóth, Z.-R., Baia, L., Pap, Z., & Hernádi, K. (2022). Solvothermal synthesis of ZnO spheres: Tuning the structure and morphology from nano- to micro-meter range and its impact on their photocatalytic activity. *Catalysis Today*, 397–399, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.03.004>
74. Lee, H. J., & Jeong, S. H. (2005). Bacteriostasis and Skin Innoxiousness of Nanosize Silver Colloids on Textile Fabrics. *Textile Research Journal*, 75(7), 551–556. <https://doi.org/10.1177/0040517505053952>
75. Li, S., Huang, J., Chen, Z., & Lai, Y. (2016). A review on special wettability textiles: theoretical models, fabrication technologies and multifunctional applications. *Journal of Materials Chemistry A: Materials for Energy and Sustainability*, 5, 31–55. <https://doi.org/10.1039/C6TA07984A>
76. Liu, Y., Tang, J., Wang, R., Lu, H., Li, L., Kong, Y., Qi, K., & Xin, J. H. (2007). Artificial lotus leaf structures from assembling carbon nanotubes and their applications in hydrophobic textiles. *Journal of Materials Chemistry*, 17(11), 1071–1078. <https://doi.org/10.1039/b613914k>
77. Lovrić, J., Cho, S. J., Winnik, F. M., & Maysinger, D. (2005). Unmodified Cadmium Telluride Quantum Dots Induce Reactive Oxygen Species Formation Leading to Multiple Organelle Damage and Cell Death. *Chemistry & Biology*, 12(11), 1227–1234. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2005.09.008>
78. Lowy, F. (1998). STAPHYLOCOCCUS AUREUS INFECTIONS. *New England Journal of Medicine*, 339, 520–532. <http://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJM199808203390806>
79. Manbachi, A., Butt, H., Dokmeci, M. R., Angeles, L., & Hinestroza, J. P. (2016). *Nanotechnology in Textiles Nanotechnology in Textiles. February.* <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b08176>

80. Marambio-Jones, C., & Hoek, E. M. V. (2010). A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(5), 1531–1551. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9900-y>
81. Mehta, S. (2020). An experimental investigation on optimizing liquid repellency of fluorochemical urethane finish and its effect on the physical properties of polyester/cotton blended fabric. *Fibers*, 8(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/fib8120072>
82. Mendes, C. R., Dilarri, G., Forsan, C. F., Sapata, V. de M. R., Lopes, P. R. M., de Moraes, P. B., Montagnolli, R. N., Ferreira, H., & Bidoia, E. D. (2022). Antibacterial action and target mechanisms of zinc oxide nanoparticles against bacterial pathogens. *Scientific Reports*, 12(1), 2658. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06657-y>
83. Mikheyeva, I. V., Sun, J., Huang, K. C., & Silhavy, T. J. (2023). Mechanism of outer membrane destabilization by global reduction of protein content. *Nature Communications*, 14(1), 5715. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40396-6>
84. Mondal, I. H. (2021). Fabrication of C6-Fluorocarbon-Dendrimer Based Superhydrophobic Cotton Fabrics for Multifunctional Aspects. *Cellulose*, 30(1), 639-663.
85. Montazer, M., Alimohammadi, F., Shamei, A., & Rahimi, M. K. (2012). In situ synthesis of nano silver on cotton using Tollens' reagent. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1706–1712. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.079>
86. Montazer, M., & Harifi, T. (2018). *Nanofinishing of Textile Materials*. Elsevier.
87. Montes-Hernandez, G., Di Girolamo, M., Sarret, G., Bureau, S., Fernandez-Martinez, A., Lelong, C., & Eymard Vernain, E. (2021). In Situ Formation of Silver Nanoparticles (Ag-NPs) onto Textile Fibers. *ACS Omega*, 6(2), 1316–1327. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04814>
88. N, G. (2017). Application of Nano Silver Particles on Textile Materials for Improvement of Antibacterial Finishes. *Global Journal of Nanomedicine*, 2(3), 42–

45. <https://doi.org/10.19080/gjn.2017.02.555586>
89. Nam, S., Hillyer, M. B., Condon, B. D., Lum, J. S., Richards, M. N., & Zhang, Q. (2020). Silver Nanoparticle-Infused Cotton Fiber: Durability and Aqueous Release of Silver in Laundry Water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46), 13231–13240. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07531>
90. Nasr, A., Khan, T. S., Huang, S.-P., Wen, B., Shao, J.-W., & Zhu, G.-P. (2019). Comparison Among Five Eucalyptus Species Based on Their Leaf Contents of Some Primary and Secondary Metabolites. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 20(7), 573–587. <https://doi.org/10.2174/1389201020666190610100122>
91. Naveas, N., Pulido, R., Torres-Costa, V., Agulló-Rueda, F., Santibáñez, M., Malano, F., Recio-Sánchez, G., Garrido-Miranda, K. A., Manso-Silván, M., & Hernández-Montelongo, J. (2023). Antibacterial Films of Silver Nanoparticles Embedded into Carboxymethylcellulose/Chitosan Multilayers on Nanoporous Silicon: A Layer-by-Layer Assembly Approach Comparing Dip and Spin Coating. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13). <https://doi.org/10.3390/ijms241310595>
92. Neinhuis, W. B., & All, U. T. C. (1997). Planta Purity of the sacred lotus , or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202(1), 1–8.
93. Ni, B., & Zhang, P. (2017). Experimental Study on Fabric Surface Wettability based on Contact Angle and Surface Energy. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, apetc, 428–433. <https://doi.org/10.12783/dtetr/apetc2017/11031>
94. Ogunsona, E. O., Muthuraj, R., Ojogbo, E., Valerio, O., & Mekonnen, T. H. (2020). Engineered nanomaterials for antimicrobial applications: A review. *Applied Materials Today*, 18, 100473. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100473>
95. Ojstršek, A., & Fakin, D. (2019). Washing durability and photo-stability of NanoTiO₂-SiO₂ coatings exhausted onto cotton and cotton/polyester fabrics. *Coatings*, 9(9), 4–7. <https://doi.org/10.3390/coatings9090545>
96. Parkin, I. P., & Palgrave, R. G. (2005). Self-cleaning coatings. *Journal of Materials*

- Chemistry*, 15(17), 1689. <https://doi.org/10.1039/b412803f>
97. Premanathan, M., Karthikeyan, K., Jeyasubramanian, K., & Manivannan, G. (2011). Selective toxicity of ZnO nanoparticles toward Gram-positive bacteria and cancer cells by apoptosis through lipid peroxidation. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 7(2), 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2010.10.001>
 98. Rahal, R., Pigot, T., Foix, D., & Lacombe, S. (2011). Photocatalytic efficiency and self-cleaning properties under visible light of cotton fabrics coated with sensitized TiO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 104(3–4), 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.005>
 99. Rajput, S. K., Singh, M. K., & Shakyawar, D. B. (2023). Herbal Extract-Induced Silver Nanoparticles for Antibacterial Cotton Fabric. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 31(3), 1–8. <https://doi.org/10.2478/ftce-2023-0024>
 100. Ranjbar-Mohammadi, M. (2018). Production of cotton fabrics with durable antibacterial property by using gum tragacanth and silver. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 476–482. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.093>
 101. Raut, S. B., Vasavada, D. A., & Chaudhari, S. B. (2010). Nano particles - Application in textile finishing. *Man-Made Textiles in India*, 38(12), 31–36.
 102. Ren, G., Hu, D., Cheng, E. W. C., Vargas-Reus, M. A., Reip, P., & Allaker, R. P. (2009). Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 33(6), 587–590. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2008.12.004>
 103. Reningtyas, R., Rahayuningsih, E., Kusumastuti, Y., & Kartini, I. (2021). Application of zinc oxide nanoparticles and nanochitosan to enhance the light fastness of cotton dyed with natural indigo. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 25(5), 882–894.
 104. Rezić, I., & Kiš, A. (2020). Design of Experiment Approach to Optimize Hydrophobic Fabric Treatments. *Polymers*, 12(9), 2131.

- <https://doi.org/10.3390/polym12092131>
105. Riaz, M., Ismail, M., Ahmad, B., Zahid, N., Jabbour, G., Sha, M., Mutreja, V., Sareen, S., Ra, A., & Faheem, M. (2020). Characterizations and analysis of the antioxidant , antimicrobial , and dye reduction ability of green synthesized silver nanoparticles. *Green Process. Synth*, 9, 693–705. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0064>
 106. Saleem, H., & Zaidi, S. J. (2020). Sustainable use of nanomaterials in textiles and their environmental impact. *Materials*, 13(22), 1–28. <https://doi.org/10.3390/ma13225134>
 107. Salih, A. M., Al-Qurainy, F., Khan, S., Tarroum, M., Nadeem, M., Shaikhaldein, H. O., Gaafar, A.-R. Z., & Alfarraj, N. S. (2021). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using Phoenix dactylifera and their effect on biomass and phytochemical compounds in Juniperus procera. *Scientific Reports*, 11(1), 19136. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98607-3>
 108. Sari, C., & Arik, B. (2023). *Cotton Fabrics Finished by Natural and Sulfated β -Cyclodextrin Inclusion Complexes of Silver Nanoparticles for Biomedical Applications*. 33(4), 375–387. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1175598>
 109. Sayed, U., & Dabhi, P. (2014). Finishing of Textiles With Fluorocarbons. *International Journal of Advanced Science and Engineering*, 1(2), 1–7.
 110. Schellenberger, S., Gillgard, P., Stare, A., Hanning, A., Levenstam, O., & Roos, S. (2018). Facing the rain after the phase out: Performance evaluation of alternative fluorinated and non-fluorinated durable water repellents for outdoor fabrics. *Chemosphere*, 193, 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.027>
 111. Selvam, S., & Sundrarajan, M. (2012). Functionalization of cotton fabric with PVP/ZnO nanoparticles for improved reactive dyeability and antibacterial activity. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1419–1424. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.025>

112. Shahidi, S., Zarei, L., & Elahi, S. M. (2014). Fabrication of ZnO nano particles using sonochemical method and applying on cotton fabric using in situ and pad-dry-cure methods. *Fibers and Polymers*, 15(12), 2472–2479. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-2472-1>
113. Shamhari, N. M., Wee, B. S., Chin, S. F., & Kok, K. Y. (2018). Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles with small particle size distribution. *Acta Chimica Slovenica*, 65(3), 578–585. <https://doi.org/10.17344/acsi.2018.4213>
114. Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., Hasan, H., & Mohamad, D. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219–242. <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>
115. Stegmaier, T., Von Arnim, V., Scherrieble, A., & Planck, H. (2008). Self-cleaning textiles using the Lotus Effect. In *Biologically Inspired Textiles* (pp. 137–149). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845695088.2.137>
116. Sudeepthi, A., Yeo, L., & Sen, A. K. (2020). Cassie-Wenzel wetting transition on nanostructured superhydrophobic surfaces induced by surface acoustic waves. *Applied Physics Letters*, 116(9). <https://doi.org/10.1063/1.5145282>
117. Tan, L. Y., Sin, L. T., Bee, S. T., Ratnam, C. T., Woo, K. K., Tee, T. T., & Rahmat, A. R. (2019). A review of antimicrobial fabric containing nanostructures metal-based compound. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 25, E3–E27. <https://doi.org/10.1002/vnl.21606>
118. Tan, L. Y., Sin, L. T., Bee, S. T., Tee, T. T., Ratnam, C. T., Woo, K. K., & Rahmat, A. R. (2019). Funtionalization and mechanical propeties of cotton fabric with zno nanoparticles for antibacterial textile application. *Solid State Phenomena*, 290 SSP, 292–297. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.290.292>
119. Tania, I. S., Ali, M., & Akter, M. (2022). Fabrication, characterization, and utilization of ZnO nanoparticles for stain release, bacterial resistance, and UV protection on cotton fabric. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 17. <https://doi.org/10.1177/15589250221136378>

120. Tong, S. Y. C., Davis, J. S., Eichenberger, E., Holland, T. L., & Fowler, V. G. (2015). Staphylococcus aureus infections: Epidemiology, pathophysiology, clinical manifestations, and management. *Clinical Microbiology Reviews*, 28(3), 603–661. <https://doi.org/10.1128/CMR.00134-14>
121. Tortora, P. G., & Merkel, R. S. (2005). *Fairchild's Dictionary Of Textiles 7 Edition*. ,Newyork,.
122. Ummah, M. S. (2019a). Handbook of Nanofibers and Nanocomposites. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
123. Ummah, M. S. (2019b). Smart and Functional Textiles. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
124. Verbič, A., Gorjanc, M., & Simončič, B. (2019). Zinc oxide for functional textile coatings: Recent advances. *Coatings*, 9(9), 17–23. <https://doi.org/10.3390/coatings9090550>
125. Vignesh, K., Nair, A. S., Udhayakeerthana, C., & Kalaivani, T. (2022). Synthesis and characterization ZnO nanoparticles using sol-gel method and their antibacterial study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1219(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1219/1/012019>
126. Vonna, L. (2023). The Barthlott effect. *Quantitative Plant Biology*, 4, e16. <https://doi.org/10.1017/qpb.2023.15>
127. Wang, C., Lv, J., Ren, Y., Zhou, Q., Chen, J., Zhi, T., Lu, Z., Gao, D., Ma, Z., & Jin, L. (2016). Cotton fabric with plasma pretreatment and

- ZnO/Carboxymethyl chitosan composite finishing for durable UV resistance and antibacterial property. *Carbohydrate Polymers*, 138, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.046>
128. Wang, X., Fu, C., Zhang, C., Qiu, Z., & Wang, B. (2022). A Comprehensive Review of Wetting Transition Mechanism on the Surfaces of Microstructures from Theory and Testing Methods. *Materials*, 15(14), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ma15144747>
 129. Wang, Y., Baheti, V., Khan, M. Z., Viková, M., Yang, K., Yang, T., & Militký, J. (2022). A facile approach to develop multifunctional cotton fabrics with hydrophobic, self-cleaning and UV protection properties using ZnO particles and fluorocarbon. *The Journal of The Textile Institute*, 113(10), 2238–2248. <https://doi.org/10.1080/00405000.2021.1975905>
 130. Weber, D. J., Anderson, D., & Rutala, W. A. (2013). The role of the surface environment in healthcare-associated infections. *Current Opinion in Infectious Diseases*, 26(4), 338–344. <https://doi.org/10.1097/QCO.0b013e3283630f04>
 131. Williams, J. (2018). *Waterproof And Water Repellent Textiles And Clothing*. United Kingdom.wp.
 132. Williams, J. (2018). *Waterproof and Water Repellent Textiles and Clothing*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-06037-3>
 133. Wu, L., Zhang, Y., Yang, G., Zhang, S., Yu, L., & Zhang, P. (2016). Tribological properties of oleic acid-modified zinc oxide nanoparticles as the lubricant additive in poly-alpha olefin and diisooctyl sebacate base oils. *RSC Advances*, 6(74), 69836–69844. <https://doi.org/10.1039/c6ra10042b>
 134. Xia, Z. (2016). Self-cleaning Materials and Surfaces. *Biomimetic Principles and Design of Advanced Engineering Materials*, 155–187. <https://doi.org/10.1002/9781118926253.ch7>
 135. Yan, X., He, B., Liu, L., Qu, G., Shi, J., Hu, L., & Jiang, G. (2018). Antibacterial mechanism of silver nanoparticles in: *Pseudomonas aeruginosa*: Proteomics approach. *Metallomics*, 10(4), 557–564.

- <https://doi.org/10.1039/c7mt00328e>
136. Yılmaz, G. E., Göktürk, I., Ovezova, M., Yılmaz, F., Kılıç, S., & Denizli, A. (2023). *Antimicrobial Nanomaterials : A Review*. 269–290. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hygiene3030020>
 137. Yunusov, K. E., Sarymsakov, A. A., Mullajonova, S. V., Turakulov, F. M., & Rashidova, S. S. H. (2020). Antibacterial effect of cotton fabric treated with silver nanoparticles of different sizes and shapes. *Asian Journal of Chemistry*, 32(6), 1335–1342. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2020.22266>
 138. Zeghoud, S., Hemmami, H., Ben Seghir, B., Ben Amor, I., Kouadri, I., Rebiai, A., Messaoudi, M., Ahmed, S., Pohl, P., & Simal-Gandara, J. (2022). A review on biogenic green synthesis of ZnO nanoparticles by plant biomass and their applications. *Materials Today Communications*, 33, 104747. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104747>
 139. Zein, R., Alghoraibi, I., Soukkaieh, C., Ismail, M. T., & Alahmad, A. (2022). Influence of Polyvinylpyrrolidone Concentration on Properties and Anti-Bacterial Activity of Green Synthesized Silver Nanoparticles. *Micromachines*, 13(5), 777. <https://doi.org/10.3390/mi13050777>
 140. Zhang, G., Morikawa, H., Chen, Y., & Miura, M. (2013). In-situ synthesis of ZnO nanoparticles on bamboo pulp fabric. *Materials Letters*, 97, 184–186. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.01.096>
 141. Zhang, X. F., Liu, Z. G., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver nanoparticles: Synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>
 142. Zhao, I. S., & Mei, M. L. (2020). *The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry*. 2555–2562.
 143. Zhu, C., Shi, J., Xu, S., Ishimori, M., Sui, J., & Morikawa, H. (2017). Design and characterization of self-cleaning cotton fabrics exploiting zinc oxide nanoparticle-triggered photocatalytic degradation. *Cellulose*, 24(6), 2657–2667.

<https://doi.org/10.1007/s10570-017-1289-7>

- a. زين.رغد, الغريبي.ابراهيم, & سكرية.شادي. (2022). الاصطناع الحيوي الأخضر لحبيبات الفضة النانوية وتقييم فعاليتها كمضاد حيوي. كلية العلوم، جامعة دمشق

Abstract

Hospital-acquired infections (HAIs) represent a major challenge in global healthcare facilities, significantly contributing to increased patient morbidity and mortality. These infections are often transmitted through contact with contaminated surfaces, including medical textiles such as healthcare worker uniforms, patient gowns, and hospital bed covers. This study aimed to develop medical cotton fabrics—specifically bed covers for bedridden patients with pressure ulcers—with water-repellent and antimicrobial properties by incorporating zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) and silver nanoparticles (Ag-NPs) along with short-chain fluorocarbon resin (C6F6-resin) using the pad-dry-cure technique.

Silver nanoparticles were synthesized via an eco-friendly method using Eucalyptus plant extract, while ZnO-NPs were prepared through the sol-gel technique. The morphological properties of the synthesized nanoparticles were characterized using atomic force microscopy (AFM) and field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM), and their crystalline structures were confirmed by X-ray diffraction (XRD). ZnO-NPs exhibited uniform dimensions ranging from 54 to 66 nm, whereas Ag-NPs measured approximately 30 nm. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analyses confirmed the presence of silver and zinc on the surface of the treated cotton fibers.

The antimicrobial efficacy of the treated fabrics was evaluated against Gram-positive *Staphylococcus aureus* and Gram-negative *Escherichia coli*. Fabrics containing 300 ppm ZnO-NPs achieved 99.8% bacterial growth inhibition, while those treated with 300 ppm Ag-NPs demonstrated 100% inhibition.

Water-repellent properties were assessed by measuring water contact angles (WCA) for both Ag-NP/fluorocarbon and ZnO-NP/fluorocarbon treated samples. The highest ZnO concentration (300 ppm) yielded average WCAs of 152.3° for blood, 151.1° for water, and 151.0° for olive oil. In contrast, Ag-NPs at the same concentration recorded slightly lower pre-wash WCAs of 149.1° for blood, 147.8° for water, and 146.9° for oil. Antimicrobial efficacy and WCAs were also evaluated after laundering. The Ag-NP treat

ed fabrics maintained superior antimicrobial activity and water repellency even after ten wash cycles, outperforming the ZnO-NP treated fabrics, where both properties declined post-washing—a finding supported by statistical analysis.

This work represents a promising advancement in high-performance fabrics that combine antimicrobial and self-cleaning properties through novel polymeric nanocomposites, offering a viable alternative to imported materials in healthcare settings.

Keywords: Silver nanoparticles, zinc oxide nanoparticles, short-chain fluorocarbon resin, antimicrobial cotton fabrics, self-cleaning cotton fabrics.

Syrian Arab Republic
Damascus University
Faculty Mechanical and Electrical Engineering
Department of Mechanical Engineering for
Textile Industries and Their Technologies



Improving The Self-cleaning and Antibacterial Properties of Woven Fabrics by Nanomaterials

*A dissertation submitted in fulfilment of the requirements for the
degree of (PhD) in Weaving technology*

Prepared by

Eng. Salam AK Mahmoud

Supervised by

Supervisor

Prof. Dr. Eng. Basel Youns
FMEE- Damascus University

Co-Supervisor

Assistant Prof. Dr. Ibrahim Alghoraibi
Faculty of Science- Damascus university

2026