



اجهورية العراق  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة ميسان  
كلية التربية الأساسية  
قسم العلوم العامة

التصنيع الأخضر وتوصيف جسيمات أكسيد الزنك النانوي باستخدام  
مستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي وتقييم توافقها الحيوي وخصائصها  
المضادة للاكسدة والميكروبات

رسالة مقدمة الى مجلس كلية التربية الأساسية – جامعة ميسان  
وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في العلوم العامة  
( علوم عامة تخصصية )

من قبل الطالب

حسين علي مسلم

إشراف

أ.د سالم نعمة صالح البخاتي

أ.د وسن جعفر إبراهيم

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿هُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً لَكُمْ مِنْهُ شَرَابٌ وَمِنْهُ شَجَرٌ فِيهِ تُسِيمُونَ (10) يُنْبِتُ لَكُمْ بِهِ  
الزَّرْعَ وَالزَّيْتُونَ وَالنَّخِيلَ وَالْأَعْنَابَ وَمِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ ۗ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَةً لِقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ﴾

صدق الله العلي العظيم

سورة النحل، الآيتان 10-11

## اقرار المشرف

اشهد ان إعداد هذه الرسالة الموسومة ( التصنيع الأخضر وتوصيف جسيمات اوكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص اوراق اليوكالبتوس المائي وتقييم توافقها الحيوي وخصائصها المضادة للاكسدة والميكروبات ) والمقدمة من قبل الطالب ( حسين علي مسلم ) تمت تحت إشرافي في كلية التربية الأساسية جامعة ميسان وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في علوم عامة تخصصية .

التوقيع :

التوقيع :

اسم المشرف : أ.د. وسن جعفر إبراهيم

اسم المشرف : أ.د. سالم نعمة صالح

التاريخ : / / 2026/

التاريخ : / / 2026/

بناء على التعليمات ارشح الرسالة المناقشة

التوقيع :

الاسم : أ.د. هاشم حنين كريم

رئيس قسم العلوم العامة

رئيس لجنة الدراسات العليا

التاريخ : / / 2026/

## اقرار لجنة المناقشة

نشهد اننا أعضاء لجنة المناقشة قد اطلعنا على الرسالة الموسومة ( التصنيع الأخضر وتوصيف جسيمات اوكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي وتقييم توافقها الحيوي وخصائصها المضادة للاكسدة والميكروبات ) المقدمة من قبل الطالب ( حسين علي مسلم ) وقد ناقشنا الطالب في محتوياتها وفيما له علاقة بها بتاريخ ( 2026/6/11 ) فوجدناها جديرة بالقبول لنيل درجة الماجستير في العلوم العامة ( علوم عامة تخصصية )

التوقيع :	التوقيع :
الاسم : هاشم حنين كريم	الاسم : أ.د حسن خلف عليوي
التاريخ : 2026 / /	التاريخ : 2026 / /
رئيس اللجنة	عضوا اللجنة
التوقيع :	التوقيع :
الاسم : أسوان كاظم جبر	الاسم : أ.د سالم نعمة صالح
التاريخ : 2026 / /	التاريخ : 2026 / /
عضوا اللجنة	عضوا ومشرفا
التوقيع :	
الاسم : أ.د وسن جعفر إبراهيم	
التاريخ : 2026 / /	
عضوا ومشرفا	

صادق مجلس الكلية على قرار اللجنة في جلسته المرقمة ( ) والمنعقدة بتاريخ / / 2026

عميد كلية التربية الاساسية

التوقيع :

الاسم : أ.د غسان كاظم جبر

التاريخ : / / 2026

## الإهداء

إلى روح المصطفى وآله الأطهار... حبًا وتقربًا...  
إلى رمز العزة والافتخار... من علمني حب الفضيلة وزرع فيّ الأمل...  
ليصلني إلى ما أنا عليه الآن... والدي...  
إلى ينبوع العطف والحنان... مصدر قوتي ودعمي...  
من غرستني بحنانها واحتضنتني... والدتي...  
إلى سندي وأنساب بصري... إختوتي... أخواتي... أهدي ثمرة جهدي.  
إلى الذين أناروا دروب روعي... أصدقائي...  
إلى كل من عشق العلم والعلماء...  
إلى شهدائنا الأبرار الذين ضحوا بدمائهم الطاهرة من أجل الوطن،  
وإلى الأرواح الطاهرة والمضحية في سبيل الإسلام وفي سبيل الكرامة...  
أهدي جهدي هذا بكل اعتزاز...

## شكر وتقدير

أتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى جامعة ميسان، وكلية التربية الأساسية، وقسم العلوم العامة، لما قدموه من دعم علمي وتسهيلات أسهمت في إنجاز هذه الرسالة، كما أعرب عن امتناني لجميع الأساتذة والعاملين في القسم لجهودهم وتعاونهم الكريم.

وأنتدّم بخالص الشكر والتقدير إلى مشرفتي الفاضلة الأستاذة الدكتورة وسن جعفر، على ما بذلته من جهد وعطاء، وما قدّمته لي من توجيهات سديدة ونصائح علمية قيّمة كان لها الأثر الكبير في إنجاز هذه الرسالة وإخراجها بهذا الشكل.

وأنتدّم بخالص الشكر وعظيم الامتنان والتقدير إلى الاستاذ الدكتور الفاضل سالم نعمه البخاتي، لما أولاه لي من رعاية علمية كريمة وتوجيهات سديدة ومتابعة مستمرة طوال مدة إنجاز هذا العمل، فقد كان لدعمه وتشجيعه وملاحظاته القيّمة الأثر الكبير في إتمام هذه الرسالة وإخراجها بالصورة المطلوبة.

ولا يفوتني أن أتقدّم بجزيل الامتنان إلى لجنة المناقشة الموقرة على قبولهم مناقشة هذا العمل وتقديم ملاحظاتهم القيّمة التي تثري الرسالة وتزيد من قيمتها العلمية.

كما أتقدم بجزيل الشكر والتقدير والامتنان إلى الأستاذ أحمد عبد الواحد محمد، التدريسي في معهد النفط، والأستاذ عباس في مختبر الصحة، والأستاذ كرار أكرم كامل، التدريسي في كلية الزراعة / قسم وقاية النباتات ، وذلك لتعاونهم معي في الجانب العملي من رسالتي، وما قدموه من دعم علمي كان له الأثر في إتمام هذا العمل.

كما أخصّ بالشكر زملائي وأصدقائي في القسم، وعائلتي العزيزة التي كانت الداعم الأول والركيزة الأساسية في مسيرتي الدراسية، فلولا مساندتهم ودعاؤهم لما وصلت إلى ما أنا عليه اليوم.

## الخلاصة

شهدت الكيمياء الخضراء في السنوات الأخيرة اهتمامًا متزايدًا بوصفها نهجًا مستدامًا وفعالًا في تحضير الجسيمات النانوية. هدفت هذه الدراسة إلى تحضير وتوصيف جسيمات أكسيد الزنك النانوية ( ZnO NPs). باستخدام المستخلص المائي لأوراق نبات اليوكالبتوس كعامل اختزال طبيعي، مع توصيف الجسيمات النانوية وتقييم خصائصها البيولوجية المتمثلة في السمية الخلوية، والنشاط المضاد للأكسدة، والفعالية المضادة للبكتيريا.

تم تشخيص المركبات الوظيفية الفعالة في المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس كيميائياً وكذلك بواسطة تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه **Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy** حيث أظهرت النتائج وجود الفلافونويدات، والتانينات، والصابونينات، والتربينويدات، والكومارينات والتي يعزى لها الدور المهم كعوامل مختزلة ومثبتة حيوية عند تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية .

وشخصت جسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضرة حيويًا بواسطة المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس بطرق توصيف مختلفة شملت التحليل الطيفي للأشعة فوق البنفسجية المرئية **Ultraviolet–Visible (UV–Vis) Spectroscopy** و **(FTIR)** وحيود الأشعة السينية **(XRD) X-ray Diffraction** والتبعثر الضوئي الديناميكي **(DLS) Dynamic Light Scattering** وقياسات جهد زيتا والمجهر الإلكتروني الماسح ذي الانبعاث الحثي **Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)** .

أظهرت بيانات امتصاص الأشعة فوق البنفسجية المرئية ذروة امتصاص مميزة عند 364 نانومتر كما أكدت نتائج تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء **FTIR** تكون **Zno** بشكله البلوري نتيجة لظهور اهتزازات **Zn-o** عند طول موجي **(585 – 725 Cm-1)** . كما بينت النتائج أن الجسيمات المحضرة ذات نقاوة عالية وطبيعة بلورية شبة كروية ومتوسط حجم قطر جسيمي بلغ نحو **22.09 nm** وبلغت قيمة زيتا **-11.8 ± 7.30** ملي فولت . وبلغ المتوسط الهيدروديناميكي وفق قياسات **DLS** حوالي **131.5 nm** .

درست فعالية الجسيمات أكسيد الزنك النانوية والمستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي المحضرة الفعالية المضادة للأكسدة باستخدام فحص **(DPPH) Diphenyl-1-picrylhydrazyl-2,2** وفعاليتها المضادة لكل من البكتريا الموجبة لصبغة كرام **Staphylococcus aureus** والسالبة لصبغة كرام **Escherichia coli** وأظهرت الجسيمات النانوية فعالية أعلى من المستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي على اصطياد الجذور الحرة وفعالية عالية مضادة لكل من البكتريا الموجبة والسالبة لصبغة كرام . كما تبين أن الفعاليات البيولوجية الحيوية للجسيمات النانوية تزداد بزيادة التركيز .

اظهرت نتائج تقييم السمية الخلوية باستخدام اختبار 3-(4,5)-2,5-bis(4-methylthiazol-2-yl) diphenyltetrazolium bromide (MTT) ان التراكيز القليلة من جسيمات اوكسيد الزنك النانوية ليس لها تأثير سام على خلايا جلد الإنسان الليفية إلا أن التراكيز العالية اظهرت سمية منخفضة تزداد بزيادة التركيز .

ختامًا، تؤكد نتائج هذه الدراسة أن المستخلص المائي لنبات اليوكالبتوس يُعد مصدرًا غنيًا بالمركبات الحيوية الفعالة، ويمكن استخدامه بنجاح في التحضير الأخضر لجسيمات أوكسيد الزنك النانوية. كما أظهرت الجسيمات النانوية المحضرة كفاءة عالية في النشاط المضاد للبكتيريا، والنشاط المضاد للأكسدة، مع مستوى منخفض من السمية الخلوية، مما يعزز من إمكاناتها التطبيقية في المجالات الطبية والحيوية.

## المحتويات

الصفحة	الموضوع
<b>3-1</b>	<b>الفصل الاول – المقدمة</b>
1	1-1 المقدمة
<b>29-4</b>	<b>الفصل الثاني – استعراض المراجع</b>
4	1-2 تكنولوجيا النانو
5	2-2 المواد النانوية
6	3-2 تصنيف المواد النانوية
6	1-3-2 التصنيف على اساس الأبعاد
8	2-3-2 تصنيف المواد النانوية على أساس تركيبها الكيميائي
8	3-3-2 تصنيف المواد النانوية على أساس أشكالها
10	4-2 خواص المواد النانوية <b>Properties of Nanomaterials</b>
12	5-2 طرق تحضير الجسيمات النانوية
12	1-5-2 الطرق الفيزيائية <b>Physical Methods</b>
15	2-5-2 الطرق الكيميائية <b>Chemical Methods</b>
17	3-5-2 الطرق البيولوجية <b>Biological Methods</b>
21	6-2 التصنيع الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك النانوية
23	7-2 طرق تشخيص الجسيمات النانوية
24	1-7-2 مطيافية الأشعة تحت الحمراء
25	2-7-2 حيود الاشعة السينية
25	3-7-2 مطيافية الاشعة فوق البنفسجية – المرئية
26	4-7-2 تقنيات التوصيف المورفولوجي والحجمي
27	8-2 أهمية وتطبيقات تقنية النانو
<b>42-30</b>	<b>الفصل الثالث المواد وطرائق العمل</b>
30	1-3 المواد والاجهزة المستخدمة
30	1-1-3 الاجهزة المستخدمة والمستلزمات
31	2-1-3 المواد الكيميائية
33	2-3 طرائق العمل
33	1-2-3 استخلاص اليوكالبتوس
34	2-2-3 الدراسة الكيميائية لمستخلص اليوكالبتوس
34	1-2-2-3 الكشف عن الفلافونويدات
34	2-2-2-3 الكشف عن التانينات
34	3-2-2-3 الكشف عن الصابونديينات
35	4-2-2-3 الكشف عن التربيويدات
35	5-2-2-3 الكشف عن الكومارينات
35	6-2-2-3 الكشف عن القلويدات

الصفحة	الموضوع
35	3-2-3 تحضير الجسيمات اوكسيد الزنك النانوية
37	3-3 توصيف الجسيمات اوكسيد الزنك النانوية
37	1-3-3 تحليل طيف الامتصاصية للاشعة فوق البنفسجية المرئية
37	2-3-3 تحليل طيف الاشعة تحت الحمراء
38	3-3-3 حيود الاشعة السينية
38	4-3-3 المجهر الالكتروني الماسح
39	5-3-3 تحليل تشتت الضوء الديناميكي وجهد الزيتا
39	4-3 التقييم البيولوجي لجسيمات اوكسيد الزنك النانوية والمستخلص اليوكالبتوس
39	1-4-3 اختبار السمية الخلوية
40	2-4-3 تقييم الخصائص المضادة للاكسدة
40	3-4-3 الفعالية المضادة للبكتيريا
40	1-3-4-3 عزلات البكتيريا
41	2-3-4-3 تحضير وسط مولر هنتون
41	3-3-4-3 تنشيط البكتيريا
41	4-3-4-3 اختبار نشاط الجسيمات النانوية والمستخلص النباتي
42	5-3 التحليل الاحصائي
67-43	<b>الفصل الرابع النتائج والمناقشة</b>
43	1-4 تصنيف اوراق اليوكالبتوس
44	2-4 تحضير مستخلص اوراق اليوكالبتوس
44	3-4 الدراسة الكيميائية لبعض المكونات الاساسية في اوراق اليوكالبتوس
46	4-4 تحضير جسيمات اوكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص اوراق اليوكالبتوس العراقي
47	5-4 توصيف جسيمات اوكسيد الزنك النانوية المحضرة باستخدام المستخلص المائي لاوراق اليوكالبتوس
47	1-5-4 فحص الاشعة فوق البنفسجية - المرئية
49	2-5-4 نتائج تحليل جهد الزيتا
51	3-5-4 تحليل حجم الجسيمات بتقنية التشتت الضوئي الديناميكي
52	4-5-4 فحص حيود الاشعة السينية
55	5-5-4 تحليل طيف الاشعة تحت الحمراء
57	6-5-4 المجهر الالكتروني الماسح
59	4-6 التقييم البيولوجي لجسيمات اوكسيد الزنك النانوي
59	4-6-1 اختبار السمية الخلوية
60	2-6-4 تقييم الخصائص المضادة للاكسدة
63	3-6-4 اختبار الفعالية المضادة للبكتيريا
69-68	<b>الفصل الخامس الاستنتاجات والتوصيات</b>
68	1-5 الاستنتاجات

الصفحة	الموضوع
69	2-5 التوصيات
96-70	المصادر
a-b	الخلاصة باللغة الأنكليزية

## قائمة الجداول

الصفحة	الجدول
43	1 تصنيف شجرة اليوكالبتوس
45	2 المكونات الأساسية لمستخلص اوراق اليوكالبتوس المائي
54	3 معلمات حيود الاشعة السينية
64	4 الفعالية المضادة للبكتيريا للجسيمات والمستخلص

## قائمة الاشكال

الصفحة	الشكل
	<b>الفصل الثاني مراجعة المصادر</b>
7	شكل 1-2 تصنيف المواد النانوية وفق أبعادها
9	شكل 2-2 لقطاتٍ من المجهر الإلكتروني الماسح توضّح أصنافاً مختلفة من الرقائق النانوية .
10	شكل 3-2 الالياف المتجانسة وغير متجانسة
18	شكل 4-2 مزايا التخليق الأخضر
20	شكل 5-2 مخطط التخليق الحيوي الاخضر للجسيمات النانوية المعدنية
	<b>الفصل الثالث المواد وطرائق العمل</b>
33	شكل 1-3 اوراق نبات اليوكالبتوس A قبل التجفيف B مسحوق الأوراق
34	شكل 2-3 Aالمستخلص بعد التسخين B بداية عملية تحضير مستخلص اليوكالبتوس
36	شكل 3-3 مراحل تكوين جسيمات اوكسيد الزنك النانوية باستخدام المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس
36	شكل 4-3 Aالراسب الناتج من جسيمات اوكسيد الزنك النانوية بعد الغسل باستخدام الماء منزوع الايونات والايثانول. B عملية فصل الراسب الناتج من تحضير اوكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص اوراق اليوكالبتوس .
37	شكل 5-3 مسحوق جسيمات اوكسيد الزنك النانوية المحضر باستخدام مستخلص اليوكالبتوس بعد التكليل والطحن
42	شكل 6-3 صورة توضيح تحضير سلسلة من التراكيز المتدرجة لجسيمات اكسيد الزنك النانوية والمستخلص النباتي
	<b>الفصل الرابع النتائج والمناقشة</b>
43	شكل 1-4 A شجرة اليوكالبتوس B يمثل صورة لورقة اليوكالبتوس
44	شكل 2-4 المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس
45	شكل 3-4 الكشف عن مركبات الايض الثانوي في مستخلص اوراق اليوكالبتوس المائي
46	شكل 4-4 المزيج التفاعلي أثناء التحضير الحيوي لجسيمات أوكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس
48	شكل 5-4 يوضح طيف UV-Vis لجسيمات النانوية مقارنة بطيف مستخلص اليوكالبتوس
50	شكل 6-4 قياس جهد زيتا لجسيمات الزنك النانوية المحضرة بالطريقة الخضراء
51	شكل 7-4 يوضح توزيع حجم الجسيمات المقاسة بتقنية DLS.
53	شكل 8-4 نمط حيود الأشعة السينية XRD للجسيمات النانوية
56	شكل 9-4 طيف FTIR لمستخلص اليوكالبتوس قبل التفاعل وجسيمات الزنك النانوي المحضرة.

الصفحة		الشكل
58	A صورة للمجهر الالكتروني الماسح FESEM لجسيمات الزنك النانوية B مخطط توزيع احجام جسيمات الزنك النانوية .	شكل 4-10
60	يوضح تأثير تراكيز مختلفة من جسيمات الزنك النانوية ومستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي على نسبة حيوية خلايا جلد الانسان الليفية .	شكل 4-11
62	يوضح نسبة تثبيط DPPH لمستخلص اليوكالبتوس وجسيمات اوكسيد الزنك النانوية عند تراكيز مختلفة.	شكل 4-12
62	القدرة الكلية المضادة للاكسدة لمستخلص اليوكالبتوس وجسيمات اوكسيد الزنك النانوية عند تراكيز مختلفة	شكل 4-13
65	الفعالية المضادة للبكتريا <i>Staphylococcus aureus</i> A مستخلص اليوكالبتوس B الجسيمات النانوية	شكل 4-14
65	الفعالية المضادة للبكتريا <i>Staphylococcus aureus</i> لمستخلص اليوكالبتوس والجسيمات النانوية	شكل 4-15
66	الفعالية المضادة للبكتريا <i>Escherichia coli</i> A مستخلص اليوكالبتوس B الجسيمات النانوية	شكل 4-16
67	الفعالية المضادة للبكتريا <i>Escherichia coli</i> لمستخلص اليوكالبتوس والجسيمات النانوية	شكل 4-17

## قائمة المختصرات

المعنى	الاختصار
Association of Official Analytical Chemists	AOAC
American Type Culture Collection	ATCC
Carbon atoms الصيغة الجزيئية لمركب الفوليرين	C <sub>60</sub>
Dynamic Light Scattering تحليل تشتت الضوء الديناميكي	DLS
Dulbecco's Modified Eagle Medium	DMEM
Dimethyl Sulfoxide	DMSO
Diphenyl-1-picrylhydrazyl-2,2	DPPH
Fetal Bovine Serum	FBS
Iron(III) chloride كلوريد الحديد الثلاثي	FeCl <sub>3</sub>
Field Emission المجهر الإلكتروني الماسح ذو الانبعاث الحثلي Scanning Electron Microscope	FESEM
Fourier التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء مع تحويل فورييه Transform Infrared Spectroscopy	FTIR
Full Width at Half Maximum	FWHM
Human Foreskin Fibroblasts (Cell line)	HFF-2
Joint Committee on Powder Diffraction Standards	JCPDS
dimethylthiazol-2-yl)-2,5--4,5)-3) (diphenyltetrazolium bromide	MTT
Nanoparticles	NPs
Phosphate Buffered Saline	PBS
Polydispersity Index معامل التشتت الحجمي	PDI

المعنى	الاختصار
Physical Vapor Deposition	PVD
Potential of Hydrogen	pH
Reactive Oxygen Species	ROS
Scanning Electron Microscope	SEM
Statistical Package for the Social Sciences	SPSS
Transmission Electron Microscope	TEM
الأشعة فوق البنفسجية – المرئية Ultraviolet–Visible	UV-Vis
Automated Microbial Identification System	VITEK-2
المركبات العضوية المتطايرة Volatile Organic Compounds	VOC
حيود الأشعة السينية X-ray Diffraction	XRD

# الفصل الأول

## المقدمة

## Introduction

## 1-1 المقدمة

أصبحت تقنية النانو في العقود الأخيرة إحدى أكثر المجالات العلمية تطورًا وتأثيرًا، لما تمتلكه من إمكانات واسعة لإحداث تحولات جوهرية في شتى مجالات العلم والتكنولوجيا ، ويقوم هذا المجال على دراسة المواد والتحكم في خصائصها عند أبعاد متناهية الصغر تقترب من المستوى الذري والجزيئي، حيث تظهر خصائص فيزيائية وكيميائية وسلوكية جديدة لا تلاحظ في المقاييس الأكبر. وقد أتاح هذا التحكم الدقيق فتح آفاق غير مسبوقة في تصميم المواد المتقدمة والأنظمة الوظيفية ذات الكفاءة العالية ( Sharma et al., 2022 ).

وتعود الجذور الفكرية لتقنية النانو إلى محاضرة الفيزيائي ريتشارد فاينمان عام 1959 بعنوان «هناك متسع كبير في القاع»، التي طرح فيها تصورًا ثوريًا لإمكانية التلاعب بالذرات والجزيئات بصورة مباشرة. أما مصطلح «تقنية النانو» فقد استُخدم رسميًا لأول مرة عام 1974 من قبل العالم الياباني نوريو تانيغوتشي لوصف عمليات المعالجة الدقيقة للمواد عند المستوى الذري. ومنذ ذلك الحين تطور هذا المفهوم تدريجيًا ليصبح مجالًا علميًا متكاملًا يجمع بين الفيزياء والكيمياء وعلوم المواد والأحياء ( Zhang et al., 2023 ).

وتتعامل تقنية النانو مع أبعاد تتراوح بين 1 و 100 nm ، أي مع تجمعات ذرية صغيرة للغاية قد تتكون من بضع عشرات إلى آلاف الذرات، وهي أبعاد أقل بكثير من أبعاد الخلايا الحية والبكتيريا (Ahmeda et al., 2022). ومع نهاية القرن العشرين، وبفضل التطور الكبير في أدوات القياس والتوصيف، أصبحت تقنية النانو محورًا رئيسيًا للبحث والتطوير عالميًا، ويُنظر إليها اليوم باعتبارها إحدى الركائز الأساسية لتقنيات القرن الحادي والعشرين، وربما خطوة نحو ثورة صناعية جديدة، على رغم ما صاحبها من توقعات مبالغ فيها أحيانًا (Mcgrail, 2010).

شهدت التطبيقات العملية لتقنية النانو خلال العقود الأربعة الماضية توسعًا ملحوظًا، خاصة في المجال الطبي وصناعة الأغذية. أسهمت الجسيمات النانوية دورًا مهمًا في تصنيع الأدوية الحديثة، وأسهمت في تحسين حفظ المنتجات الغذائية وتعزيز كفاءة إيصال الأدوية إلى الخلايا المستهدفة، بما في ذلك الأدوية الكارهة للماء، إضافة إلى تطوير علاجات موجهة لأمراض معقدة مثل السرطان ( Yusuf et al., 2023 ).

كما حظيت الجسيمات النانوية المعدنية باهتمام خاص لامتلاكها خصائص فعّالة مضادة للميكروبات (Parvin et al., 2025). وتمتاز المواد النانوية بقدرتها على التشخيص والعلاج في آن واحد، نتيجة

قدرتها على دخول الجسم واستهداف الأنسجة والتفاعل مع المكونات البيولوجية مثل البروتينات والإنزيمات (Johnston, 2020).

وفي السنوات الأخيرة، ازداد الاهتمام بتخليق الجسيمات النانوية باستخدام ما يُعرف بالطرق "الخضراء"، نظرًا لكونها أكثر بساطة وأقل تكلفة وصديقة للبيئة مقارنة بالطرق الكيميائية والفيزيائية التقليدية. وقد أثبتت الطرق الحيوية، ولا سيما النباتية منها، عدة مزايا تشمل تقليل المخاطر الصحية على الباحثين، وتوفير الوقت، وتحسين التحكم في حجم وشكل الجسيمات النانوية المنتجة (Fagier, 2021). وبناءً على ذلك، أصبح التخليق الأخضر خيارًا مفضلًا لتجنبه استخدام المواد السامة، فضلًا عن توافقه مع مبادئ الاستدامة البيئية (Fakhari et al., 2019).

وتُعد النباتات من أهم المصادر البيولوجية المستخدمة في التخليق الأخضر للجسيمات النانوية، حيث استُخدمت أجزاء مختلفة منها مثل الأوراق والسيقان والجذور والثمار لتحقيق هذا الغرض (Jadoun et al., 2021). ويُعد نبات اليوكالبتوس من النباتات الطبية المهمة لاحتوائه على مركبات فعالة ومواد عضوية طيارة (VOC) تدخل في تركيب زيتة العطري (Vuong et al., 2015). وتشمل هذه المركبات مواد ذات نشاط مضاد للبكتيريا مثل البينوكارفول واللينالول (Jayadi et al., 2023). كما يتميز الزيت بخصائصه المضادة للجذور الحرة والأكسدة (Sebei et al., 2015). إضافة إلى استخداماته التقليدية في علاج أمراض الجهاز التنفسي، وكمطهر ومضاد للفطريات والبكتيريا (Dhakad et al., 2018).

ورغم ما أحدثته الجسيمات النانوية من تطور ملحوظ في مجالي التشخيص والعلاج، إلا أن استخدامها أثار مخاوف متزايدة تتعلق بالسلامة الحيوية، الأمر الذي يجعل تقييم التوافق الحيوي والسمية ضرورة أساسية لتطوير مواد نانوية أكثر أمانًا، خاصةً وأن الحجم والشكل والبنية السطحية تُعد عوامل مؤثرة في التفاعل مع الأنظمة الحيوية (Li et al., 2012). وتمتلك الجسيمات النانوية خصائص مضادة للأكسدة وقابلية لإعادة التوجيه نحو أعراض طبية وصيدلانية متعددة (Daré & Lautenschlager, 2025). فضلًا عن قابليتها للذوبان في الماء، مما يعزز من إمكاناتها التطبيقية (Padmanaban et al., 2023).

ويُعد أكسيد الزنك (ZnO) من أبرز المواد المستخدمة في التطبيقات النانوية، نظرًا لملاءمته لعدد من تقنيات التوصيف الفيزيائي والكيميائي مثل (SEM، XRD، FTIR، DLS، UV) (فوزي وآخرون، 2025). كما يُصنّف ZnO ضمن أشباه الموصلات من النوع السالب، ويمتاز بفجوة طاقة واسعة تبلغ نحو (3.37 eV) وطاقة ترابط أكسيتون مرتفعة (60 meV)، إلى جانب استقراره الكيميائي والحراري الجيد، مما يجعله مناسبًا لطيف واسع من التطبيقات الطبية والبيئية (Ananthi et al., 2022).

وعلى الرغم من توفر العديد من الطرق الكيميائية لتخليق جسيمات أكسيد الزنك النانوية، إلا أن هذه الطرق غالباً ما تتطلب استخدام كواشف ومذيبات كيميائية قد تكون ذات تأثيرات بيئية وصحية غير مرغوبة، فضلاً عن حاجتها إلى ظروف تشغيل خاصة مثل درجات الحرارة المرتفعة أو المعالجات المطولة، مما يزيد من كلفة الإنتاج واستهلاك الطاقة. لذلك، برزت الحاجة إلى تطوير بدائل أكثر أماناً واستدامة وصديقة للبيئة. ورغم الإبلاغ عن استخدام بعض المستخلصات النباتية في تخليق جسيمات ZnO، فإن الدراسات التي توظف مستخلص أوراق اليوكالبتوس مع التركيز على التوافق الحيوي والإمكانات العلاجية لا تزال محدودة.

وبناءً على ما تقدم، تهدف هذه الدراسة إلى تصنيع جسيمات أكسيد الزنك النانوية بطريقة صديقة للبيئة باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس، وتوصيف خصائصها الفيزيائية والكيميائية، وتقييم نشاطها المضاد للأكسدة والميكروبات، إضافة إلى دراسة توافقها الحيوي، وذلك تمهيداً لاستخدامها كعوامل محتملة في مجالات الرعاية الصحية والصناعات الدوائية والغذائية.

الفصل الثاني  
مراجعة المصادر

**Literatures Review**

## 1-2 تكنولوجيا النانو (Nanotechnology)

تُعد تكنولوجيا النانو من التقنيات الحديثة في مجال البحث العلمي، وقد طُرحت فكرتها لأول مرة عام 1959 من خلال محاضرة شهيرة أوضحت أهمية التصغير نحو المقاييس الذرية والنانومترية كمدخل للتقدم العلمي والتكنولوجي (Hulla, J.E Sahu, & Hayes, 2015).

وقد أصبحت تقنية النانو محط اهتمام عالمي واسع وحدثت طفرة كبيرة في مختلف مجالات العلوم والهندسة، لما تمتلكه من إمكانيات واسعة وتطبيقات متعددة تمتد إلى الجوانب الطبية والاقتصادية والإلكترونية والحاسوبية، فضلاً عن مجالات البتروكيماويات والزراعة والبيئة وحتى الاستخدامات العسكرية وغيرها الكثير. وعلى الرغم من أن تقنية النانو حديثة إلى حدٍ ما، فإن وجود أجهزة تحتوي على تراكيب ذات قياسات نانوية ليس بالأمر الجديد؛ إذ إن وجود التراكيب النانوية يعود إلى عمر الأرض وبداية الحياة فيها (Varghese et al., 2019).

يختص علم النانو بدراسة المواد التي يتراوح حجمها بين 1-100 nm ، الجسيمات النانوية وتتميز بزيادة نسبة مساحة السطح إلى الحجم مقارنةً بالمواد كبيرة الحجم مما يجعلها أكثر نشاطاً واستجابةً للتفاعلات الكيميائية والبيولوجية (Singh et al., 2021).

تتضمن تكنولوجيا النانو إنتاج وتوظيف المواد بأبعاد في حدود جزء من مليار متر (10<sup>-9</sup>م)، وعند هذا المقياس تختلف خصائص الجسيمات عن نظيراتها الأكبر حجماً سواء من حيث التركيب الإلكتروني أو التفاعلية أو الخصائص الحرارية والميكانيكية (Hoque & Yao, 2025).

لقد أصبح مجال تقنية النانو واحداً من أكثر المجالات نمواً وتوسعاً في السنوات الأخيرة، وذلك لما يمتلكه من تطبيقات واسعة في مجالات الصناعات الكيميائية والطب والهندسة وصناعة الأغذية، مما يجعله محوراً رئيسياً في تطوير مواد ومعدات ذات خصائص محسنة وفعالية عالية (Shah et al., 2021; Rahman & Lu, 2022; Harish et al., 2022).

ومن المتعارف عليه أن الأنظمة الحيوية في جسم الإنسان تصنع بعض المكونات صغيرة الحجم جداً، والتي تصل إلى نطاق مقياس النانو. فالخلايا الحية تمثل مثلاً مهماً لتقنية النانو؛ إذ تعد الخلية مخزناً لعدد كبير من العضيات الحيوية الدقيقة بحجم النانو (Alberts et al., 2015).

ومن أبرزها الرايبوسومات التي يتراوح حجمها بين 20-30 nm ، وتقوم بإنتاج البروتينات داخل الخلية عبر مسارات منظمة يتم تشكيلها بواسطة مكّون نانوي آخر هو جهاز كولجي (أجسام كولجي)، الذي تتراوح أبعاده تقريباً بين 20-200 nm. كما تُعد الإنزيمات ذاتها وحدات نانوية فعّالة تقوم بتنشيط التفاعلات

الكيميائية حسب احتياجات الخلية، وبناءً على ذلك يمكن للأنظمة النانوية المصنّعة أن تتفاعل داخل الخلية وتنفيذ وظائف متنوعة مثل تحليل مكونات الخلية، أو إيصال الدواء إليها، أو إتلافها عندما تصبح ضارة (Ahmeda et al., 2017).

## 2-2 المواد النانوية (Nanomaterials)

يُستمد مصطلح "نانو" من كلمة يونانية تعني "قزم" أو شيء صغير جداً؛ ويُستخدم للإشارة إلى جزء من مليار جزء من المتر (10<sup>-9</sup> متر). يُعتبر علم النانو (Nanoscience) مجالاً بحثياً متعدد التخصصات، يهتم بدراسة التركيبات والمكونات على المستوى النانوي الذي يتراوح بين 1-100 nm، حيث تكتسب المواد خصائص فيزيائية وكيميائية وبيولوجية تختلف بشكل كبير عن خصائصها عند المقاييس الأكبر. أما تقنية النانو (Nanotechnology) فهي تطبيق هذه المبادئ العلمية لتصنيع مواد وأنظمة وأجهزة تعمل عند أبعاد تقل عن 100 nm (Hulla et al., 2015).

يركز علم النانو على دراسة المادة على المستويات الذرية والجزيئية ودون الذرية، بينما تهتم تقنية النانو بكيفية التحكم والمراقبة والتصنيع عند هذا المقياس. ويكتسب هذا المجال أهمية كبيرة بسبب قدرة المواد النانوية على إظهار خصائص جديدة، مثل زيادة المساحة السطحية، وتحسين الفعالية الكيميائية، وتعزيز التوصيل الكهربائي والحراري، فضلاً عن قدرتها على التفاعل مع الجراثيم والفيروسات ذات الأحجام المماثلة تقريباً. (Rahman & Lu, 2022)

ولتقريب مفهوم حجم النانو، يمكن مقارنته بأحجام تراكيب مألوفة في الطبيعة. إذ يتراوح الطول الموجي للضوء المرئي بين 400-700 nm، بينما يبلغ حجم خلية الدم البيضاء نحو 10,000 نانومتر، وتتراوح أحجام الجراثيم بين 1,000-10,000 nm. في المقابل، تكون الفيروسات أصغر بكثير، إذ يتراوح حجمها بين 75-100 nm، في حين يتراوح حجم البروتينات بين 5-50 نانومتر، ويبلغ قطر جزيء الحمض النووي (DNA) حوالي 2 نانومتر فقط. وعند هذه المقاييس المتناهية الصغر، تبدأ المواد بإظهار خصائص فيزيائية وكيميائية وحيوية غير متوقعة مقارنة بحالتها الكبيرة، مما يجعلها ذات أهمية كبيرة في تطبيقات متعددة مثل الطب، والإلكترونيات، والطاقة، والكشف عن العوامل الممرضة (Harish et al., 2022).

وقبل 4500 سنة استعملت الألياف النانوية الطبيعية (الأسبستوس) لتدعيم المواد الفخارية. وقبل 4000 سنة، قام المصريون القدماء بأعداد جسيمات بقياس 5 نانومتر واستعملوها كملون للشعر. كما قام المصريون والبابليون في القرن 14-13 قبل الميلاد بإنتاج الزجاج مستخدمين جسيمات نانوية معدنية.

وفي القرن الرابع الميلادي، الرومان صنعوا كأس Lycurgus ، الذي يبدل لونه بفضل وجود جسيمات نانوية من الذهب والفضة (Jetha , et al2024) .

والجسيمات النانوية تُعرّف بأنها جسيمات بالغة الصغر ذات مقاييس في حجم النانومتر، غالبًا من 1 إلى 100 نانومتر في بُعد واحد على الأقل. في هذا النطاق، تعرض المواد سمات فيزيائية وكيميائية وحيوية مميزة تختلف بصورة كبيرة عن مثيلاتها في الحالة الكبيرة، وذلك بسبب التأثيرات الكمية والنسبة المرتفعة بين السطح والحجم (Yameny, 2024).

### 3-2 تصنيف المواد النانوية (Nanomaterials Classification)

تكتسب المواد النانوية أهمية متزايدة نتيجة خواصها الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المحسنة، التي تمنحها أداءً متفوقًا مقارنةً بنظيراتها الكبيرة . وأن التنوع الكبير للمواد النانوية المستخدمة في التطبيقات الصناعية والبحثية يستلزم وجود تصنيفات واضحة تُسهّم في تنظيمها وفهم خصائصها بدقة، وعادةً ما يتم تصنيفها وفق أسس رئيسية. (Siyalu & Santhoshkumar, 2024) . وتشمل

### 1-3-2 التصنيف على أساس الأبعاد ) Classification Based on (Dimensions)

حظيت المواد النانوية عديمة الأبعاد (0D) مثل النقاط الكمومية الغرافينية والكربونية، والجسيمات النانوية المغناطيسية، وجسيمات المعادن الثمينة، باهتمام علمي كبير في مجال التحسس الحيوي خلال السنوات الأخيرة، ويعود ذلك إلى صغر حجمها الشديد الذي يمنحها خصائص بصرية مميزة .

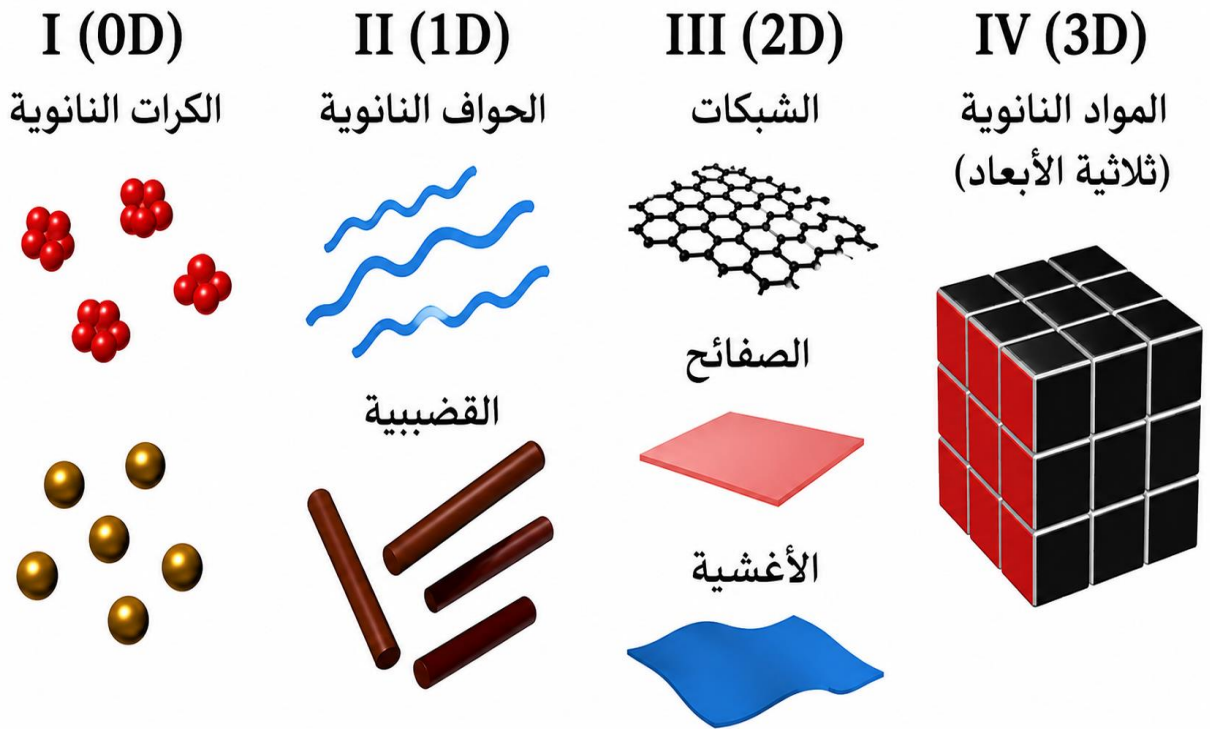
إضافةً إلى خواص فيزيائية وكيميائية فريدة وتوافق حيوي جيد، مما ساعد على استخدامها بكفاءة عالية في كشف الأيونات والجزيئات الحيوية وتشخيص الأمراض (Wang et al., 2020) .

أما المواد النانوية أحادية البعد (1D) فهي تلك التي يكون أحد أبعادها ضمن النطاق النانوي، بينما يكون البعد الثالث أكبر من مدى النانو ، وتشمل الليفيات والأنابيب والشرائط والقضبان والأسلاك النانوية والأغشية الرقيقة، وقد تكون متبلورة أو غير متبلورة، نقية أو مشوبة، وقائمة بذاتها أو مدمجة ضمن مواد أخرى، ويمكن تصنيعها من خامات معدنية أو خزفية أو بوليمرية (Mekuye & Abera, 2023) .

وتُعرّف المواد النانوية ثنائية الأبعاد (2D) بأنها مواد تتكوّن من طبقات رقيقة جداً قد يصل سُمكها إلى طبقة ذرية واحدة، وتمتلك مساحة سطحية عالية، وترتبط طبقاتها بروابط فان دير فالس ضعيفة، مما يسهل فصلها، وغالبًا ما تأخذ شكل رقائق أو أغشية نانوية، ومن أشهر أمثلتها الغرافين و نتريد البورون السداسي (Sannino, 2021) .

وشهدت السنوات الأخيرة تقدماً ملحوظاً في تطوير المواد النانوية المجسّمة (ثلاثية الأبعاد) المعتمدة على ألياف الكربون النانوية، والتي تتميز بانخفاض الكثافة وارتفاع المسامية والقدرة على التحمّل والانضغاط، مما يجعلها ملائمة لتطبيقات حساسات الإجهاد المرنة . كما أظهرت هذه المواد شبكات توصيل مترابطة وبُنِي مسامية داخلية تعزز وظائفها وتوسّع تطبيقاتها (Zhang et al., 2022) .

وتُعدّ المواد النانوية الغرافينية ثلاثية الأبعاد من أكثر المواد الواعدة كعوامل مساعدة لاختزال الأكسجين في خلايا الوقود، لما تمتلكه من مساحة سطح كبيرة، ومتانة ميكانيكية جيدة، وكفاءة عالية في انتقال الكتلة إلكترونات (Ji et al., 2015) .



الشكل (1-2): تصنيف المواد النانوية وفق أبعادها (Darweesh, 2018) .

يُوضّح الشكل التصنيف العام للمواد النانوية اعتماداً على عدد أبعادها النانوية، حيث تُقسّم إلى أربع فئات رئيسية: مواد عديمة الأبعاد (D0) مثل العناقيد والكرات النانوية، ومواد أحادية البعد (D1) كالألياف والأسلاك والقضبان النانوية، ومواد ثنائية الأبعاد (D2) مثل الشبكات والصفائح والأغشية، بالإضافة إلى المواد ثلاثية الأبعاد (D3) التي تمتلك بناءً نانويًا متكاملًا في جميع الاتجاهات (Darweesh, 2018) .

**2-3-2 تصنيف المواد النانوية على أساس تركيبها الكيميائي .**

يُعدّ التصنيف القائم على التركيب الكيميائي الهيكلي من أهم الأسس المعتمدة لتمييز أصناف المواد النانوية، نظرًا لتنوعها الكبير وتباين خصائصها تبعًا لطبيعة المادة المكوّنة لها. ويعتمد هذا التصنيف على البنية الكيميائية ونوع الروابط والعناصر الداخلة في التركيب، حيث تُصنّف المواد النانوية كيميائيًا إلى أربع فئات رئيسية: المواد النانوية الكربونية، وغير العضوية، والعضوية، والمختلطة ( Mekuye & Abera, 2023; Sannino, 2021 ).

1 . المواد النانوية الكربونية تشمل جميع المواد التي يدخل الكربون في بنيتها، مثل الفوليرينات (C60) ، والأنابيب النانوية الكربونية، والخيوط النانوية، والكربون الأسود، والغرافين، وتُحضّر هذه المواد بطرائق صناعية متعددة، من أبرزها التسامي بالليزر، والتفريغ القوسي، وترسيب البخار الكيميائي ( Manawi et al., 2018 ).

2 . المواد النانوية العضوية تتكوّن من جزيئات عضوية تكون ضمن تراكيب نانوية، مثل الليبوسومات، والمايسيل . وتمتاز بعض هذه المواد بقابليتها للتحلّل الحيوي، وانخفاض سميتها، وقدرتها على حمل وإيصال المواد العلاجية، إضافةً إلى استجابتها لعوامل خارجية كالحرارة والضوء والمجالات المغناطيسية ( Mekuye et al., 2023 ).

3 . المواد النانوية المعدنية : تتكوّن من فلزات مثل الذهب والفضة والبلاتين والنحاس، وتتميّز بظاهرة الرنين البلازموني السطحي، التي تمنحها خصائص بصرية وفوتونية مميزة، مما يجعلها ذات أهمية في التطبيقات الطبية والتحفيزية والتشخيصية. (Eker et al., 2024).

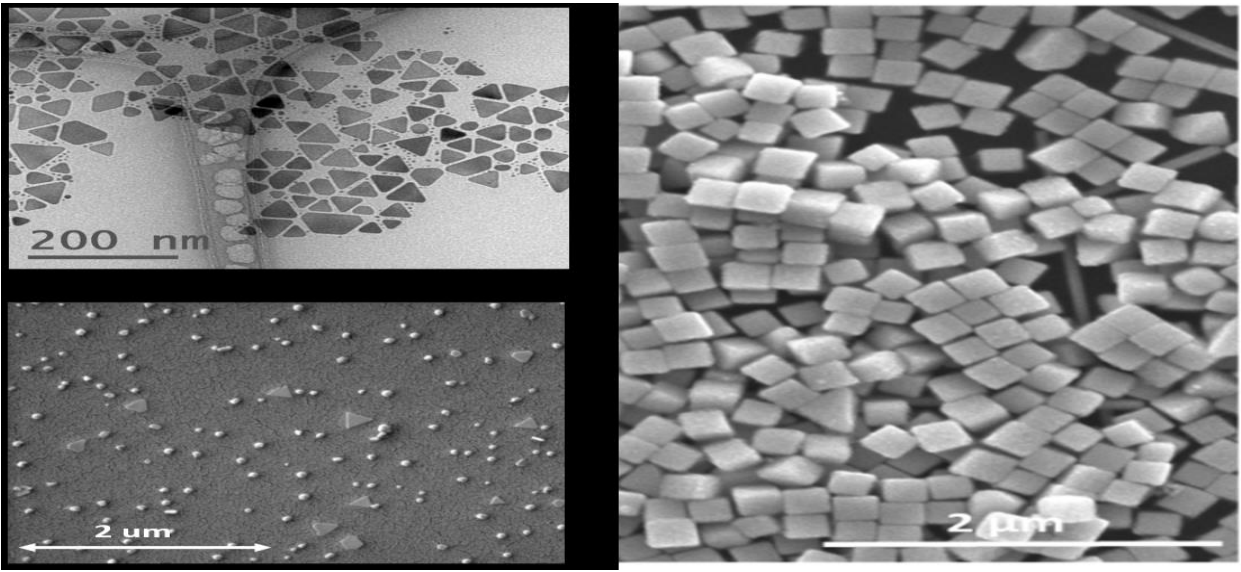
4 . المواد النانوية المختلطة : تتكوّن من دمج خامات مختلفة مثل البوليمرات، أو الدهون مع البوليمرات، أو مكوّنات حيوية مع مواد غير حيوية كالمعادن أو السيليكا أو الجسيمات الكربونية. وتُستخدم هذه التراكيب في إيصال العلاجات، والمركّبات المضادة للبكتيريا، والمواد الوراثية، والتطبيقات العلاجية والتشخيصية، مع الإشارة إلى أن تغليف الجسيمات النانوية بالبوليمرات لا يُعدّ بالضرورة تركيبًا مختلطًا بالمعنى الدقيق (Lembke & Klemke, 2025).

**2-3-3 تصنيف المواد النانوية على أساس أشكالها**

تُصنّف المواد النانوية حسب شكلها المورفولوجي، وتشمل الأشكال الشائعة: الكروية، العصوية، المكعبة، الأنبوبية، الصفائحية، والنجمية. ويُعدّ الشكل عاملاً حاسماً في تحديد نسبة السطح إلى الحجم وتأثيره في الخصائص البصرية والميكانيكية والتفاعلية. فالجسيمات العصوية تخترق الخلايا بكفاءة أعلى من الكروية،

بينما تمتلك الجسيمات النجمية أو الزهرية مواقع سطحية أكثر نشاطاً، مما يزيد فعاليتها في التطبيقات التحفيزية (Eker et al., 2024).

تتباين الجسيمات المتناهية الصغر في أبعادها، وأشكالها، وخصائصها، بغض النظر عن طبيعة المادة المكوّنة لها. ويمكن أن تظهر هذه الجسيمات في مجموعة واسعة من التكوينات الهيكلية؛ فقد تكون كروية، أو أسطوانية، أو أنبوبية، أو مخروطية، أو أجوفة من الداخل، أو لولبية، أو صفحية، أو حتى ذات أشكال غير منتظمة (Ealias & Saravanakumar, 2017).



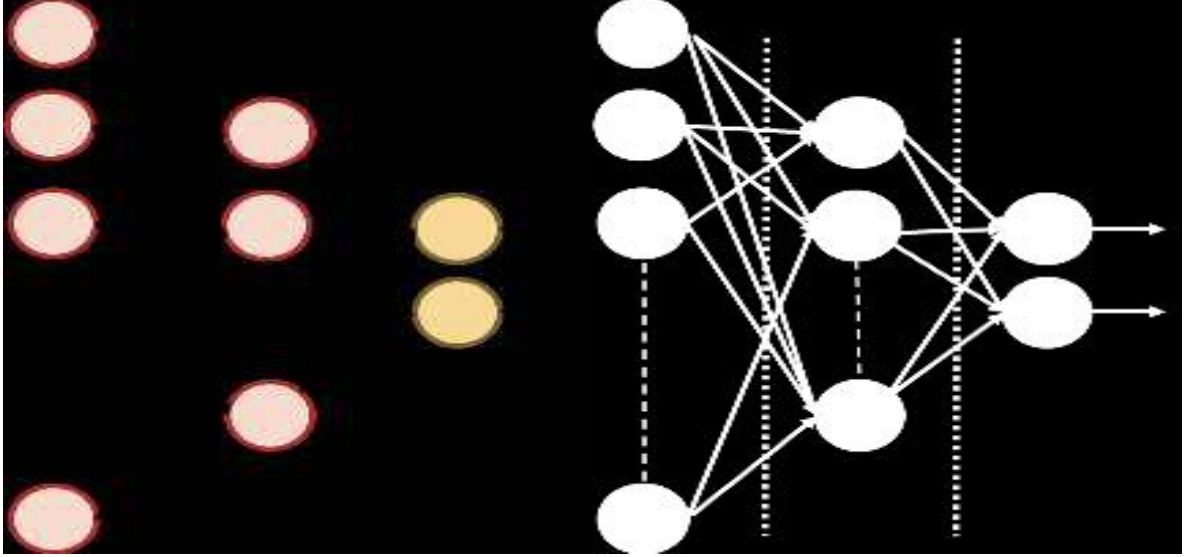
الشكل ( 2-2 ) اصناف مختلفة من الدقائق النانوية (Barnatan et al., 2025).

يُظهر الشكل (2-2) صور من المجهر الإلكتروني الماسح توضح أصنافاً مختلفة من الرقائق النانوية المُصنَّفة اعتماداً على هيئتها، وهي: الرقائق الكروية، والمثلثية، والمكعبة.

تضمّ الصورة الأولى رقائق نانوية مكعبة مع نسبة قليلة من الشوائب الهرمية. أمّا الصورة الثانية فتحتوي رقائق مثلثية ثنائية الأبعاد بدرجات مختلفة من «المثلثية»، وتشمل ثلاث صور: المثلثات، والمثلثات المقطوعة، والأقراص. بينما تتكوّن الصورة الثالثة من رقائق نانوية كروية صغيرة شبيهة بالنقاط، إضافةً إلى عدد محدود من الرقائق غير المطابقة، ولذلك صُنِّفت إلى فئتين: النقطية وغير النقطية (Barnatan et al., 2025).

وتُقسم الألياف النانوية إلى نوعين هما ألياف متجانسة وألياف غير متجانسة. ويعتمد هذا التقسيم على ما يظهر في صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM). إذ تكون الألياف المتجانسة منتظمة في الشكل

وناعمة السطح وخالية من العيوب، بينما تظهر الألياف غير المتجانسة بشكل غير منتظم وقد تحتوي على كريات صغيرة أو فجوات أو طبقات رقيقة، وهو ما يدل على وجود خلل في ظروف التحضير أو التصنيع (Verma & Kuila, 2024).



شكل ( 3-2 ) الاليف المتجانسة وغير متجانسة (Ieracitano et al., 2021) .

## 4-2 خواص المواد النانوية (Properties of Nanomaterials)

تتميز المواد النانوية بخصائص فريدة لا تظهر عادةً في المواد التقليدية ذات الأبعاد الكبيرة. فعلى صعيد التوصيل الحراري والكهربائي، قد تسجل المواد عند المقياس النانوي قيمًا أعلى من نظيراتها الضخمة، ويُعزى ذلك إلى بنيتها المجهرية الدقيقة وانتظام ترتيبها الداخلي. كما تتفوق هذه المواد في خصائصها الميكانيكية، إذ تُظهر قدرة أكبر على تحمل الإجهادات، وتحسُّنًا في الليونة، وارتفاعًا في المتانة مقارنة بالمواد التقليدية (Baig et al., 2021).

وتختلف سلوكيات المواد في الحالة النانوية اختلافاً جوهرياً عن حالتها الاعتيادية نتيجة صغر حجم الجسيمات وارتفاع نسبة الذرات الموجودة على السطح. فمن الناحية الفيزيائية، تنخفض درجة الانصهار كلما تناقص حجم الجسيمات، بسبب ضعف ترابط الذرات السطحية مقارنة بتلك الموجودة في الداخل. أما كيميائياً، فتزداد النشاطية وسرعة التفاعلات نتيجة ازدياد مساحة السطح النوعية. وفي الجانب الكهربائي، يبرز تأثير الكم بوضوح عند المقياس النانوي، حيث يمكن أن تتغير طبيعة المادة من موصلة إلى شبه موصلة أو حتى عازلة، كما هو الحال في الأنابيب الكربونية النانوية. أما مغناطيسياً، فقد تُظهر بعض المواد غير المغناطيسية في حالتها الاعتيادية، مثل الذهب والبلاتين، سلوكاً مغناطيسياً عند بلوغ أحجام نانوية

حرارة. ميكانيكياً، تتحسن الصلابة والقوة والمرونة مع تناقص الحجم، نتيجة انخفاض العيوب البلورية وازدياد عدد حدود الحبيبات.

وفيما يتعلق بالخصائص البصرية، فإن لون الجسيمات يعتمد بشكل مباشر على حجمها؛ إذ يتغير لون الذهب والفضة تبعاً لأبعادها النانوية (Melcuye & Abera, 2023).

وتتميز المواد النانوية بامتلاكها مساحة سطحية عالية جداً، مما يؤدي إلى انخفاض درجة الانصهار، وازدياد المتانة الميكانيكية، إضافةً إلى حدوث تغيير ملحوظ في الخصائص البصرية مثل الامتصاص أو اللون. كما تتبدل الصفات المغناطيسية عند الوصول إلى الأبعاد النانوية لتصبح الجسيمات ذات سلوك فائق الحساسية المغناطيسية (Patil & Burungale, 2020).

تتميز المواد النانوية بخصائص سطحية كيميائية فريدة تعكس طبيعة تركيبها. إذ تحتوي بعض هذه المواد على مجموعات وظيفية غنية بالأكسجين، مما يزيد من حموضة السطح ويؤثر في آلية تفاعلها مع المواد الأولية الأخرى. وفي المقابل، توجد جسيمات نانوية تخلو أسطحها من هذه المجموعات، فتكون تفاعلاتها أكثر بساطة ومباشرة عند التعامل مع الملوثات. وعند إزالة هذه المجموعات بالمعالجة الحرارية، يصبح السطح أكثر نقاءً وتزداد قابليته لاستقطاب المواد نتيجة تعزز قوى الترابط بين صفائح الكربون. كما يؤثر وجود المجموعات الوظيفية في المسافة البينية بين الصفائح داخل البنية؛ إذ يؤدي ازدياد كثافتها إلى زيادة التباعد بين الصفائح (Carrales-Alvarado et al., 2020).

تُعدّ الخصائص الضوئية للمواد النانوية عنصرًا محوريًا في كفاءتها ضمن التطبيقات البيولوجية، حيث تعتمد فعاليتها على مجموعة من العوامل المتداخلة. ومن أبرز هذه العوامل نطاق الامتصاص والانبعاث الطيفي، الذي يُفضّل أن يتجه نحو الأطوال الموجية الحمراء لتعزيز عمق النفاذ وتقليل الأضرار الضوئية. كما يُعدّ الاستقرار الضوئي العالي ضروريًا لضمان امتصاص عدد أكبر من الفوتونات وتحسين جودة التصوير. إضافةً إلى ذلك، تمثل ظاهرة الوميض عاملاً مهماً؛ إذ يُستحسن تقليلها لتسهيل التتبع المستمر، أو التحكم بها عند استخدامها في تقنيات الرصد فائق الدقة (Klymchenko, 2023).

تُظهر المواد النانوية صلابة ومعامل مرونة أعلى مقارنةً بالمواد التقليدية، مما يمنحها قدرة أكبر على تحمّل الإجهادات الميكانيكية. ويسهم صغر حجم الجسيمات وتجانس توزيعها داخل البنية في تعزيز مقاومة التآكل والحد من نشوء الشقوق وانتشارها.

كما تسهم هذه الجسيمات في تحسين مقاومة الكسر عبر آليات متعددة، مثل انحراف مسار الشقوق وتشتيتها، الأمر الذي ينعكس في زيادة المتانة والقوة تحت ظروف تشغيل مختلفة (Peskersoy & Culha, 2017).

وتتجلى الخصائص الميكانيكية للمواد النانوية في قدرتها الواضحة على تعزيز صلابة ومتانة الفلزات والسبائك، بحيث تصبح أكثر مقاومة لإجهادات الشد والضغط مقارنة بالمواد التقليدية. فضلاً عن ذلك، قد تُظهر بعض المواد النانوية سلوك "المرونة الفائقة"، أي قابليتها للتمدد بدرجات كبيرة دون حدوث كسر، وهي خاصية غير شائعة في المواد الاعتيادية (Citakovic, 2019).

## 2-5 طرق تحضير الجسيمات النانوية .

تُصنع المواد النانوية من خلال طريقتين رئيسيتين. الأولى هي الأسلوب من الأسفل إلى الأعلى، بينما الثانية هي الطريقة من الأعلى إلى الأسفل. تركز الطريقة من الأسفل إلى الأعلى على تجميع الذرات أو الجزيئات أو الأيونات بشكل تدريجي لإنشاء الجسيمات النانوية. هذه الطريقة تبدأ عادة من محلول متجانس أو من حالة غازية، وتتم عبر تفاعلات كيميائية. من بين التقنيات المعروفة في هذا المجال الاختزال الكيميائي، والترسيب المشترك، والطرق الكهروكيميائية، والسول-جيل، والطرق الحرارية المائية، والأساليب البيئية. تعتبر هذه الطريقة مفيدة لأنها تنتج جسيمات نانوية تتميز بتجانس عالٍ وعيوب بلورية قليلة، بالإضافة إلى توفير تحكم جيد في الحجم والشكل. أما الطريقة من الأعلى إلى الأسفل، فهي تعتمد على تقسيم المواد الكبيرة إلى جسيمات نانوية مع الحفاظ على الخصائص الأصلية للمادة. تبدأ هذه الطريقة من الحالة الصلبة، وتستخدم تقنيات مثل الطحن الكروي، والاستئصال بالليزر، والتفريغ القوسي، والانفجار السلكي. تتميز هذه الطريقة بسهولة التطبيق وإمكانية إنتاج كميات كبيرة، لكنها قد تسبب ظهور عيوب على سطح الجسيمات الناتجة (Sajid & Plotka-Wasyłka, 2020).

تحضير الجسيمات النانوية يُعد خطوة أساسية في علوم النانو، حيث تحدد الطريقة المستخدمة حجم الجسيمات، شكلها، وخصائصها الفيزيائية والكيميائية. يمكن تصنيف طرق التحضير إلى طرق فيزيائية، كيميائية، وبيولوجية .

## 2-5-1 الطرق الفيزيائية (Physical Methods) .

تعتمد الطرق الفيزيائية على تفتيت المواد الكبيرة أو تبخيرها أو استئصالها للحصول على جسيمات نانوية، وتُعد من الطرق التدميرية التي لا تستخدم مذيبات كيميائية، مما يجعلها أكثر صداقة للبيئة مقارنة بالطرق الكيميائية. وتتميز بكفاءتها في إنتاج جسيمات نانوية عالية النقاء، إلا أن تشغيلها قد يتطلب طاقة عالية وتجهيزات مكلفة (Abady et al., 2025). وتشمل أهم هذه الطرق ما يأتي:

## 1. الطحن الميكانيكي والطحن الكروي (Mechanical / Ball Milling)

يُعد الطحن الميكانيكي، وبشكل خاص الطحن الكروي، من أكثر الطرق الفيزيائية شيوعًا لإنتاج الجسيمات النانوية. تقوم هذه التقنية على التصادم المستمر بين كرات الطحن والمادة المراد تقليل حجمها، مما يؤدي إلى الحصول على جسيمات نانوية متجانسة. وتمتاز هذه الطريقة ببساطتها وكلفتها المنخفضة وإمكانية استخدامها على نطاق واسع، إضافة إلى كونها طريقة صديقة للبيئة (Ijaz et al., 2020).

وقد تمكن (Damonte et al (2004) في تحضير جسيمات ZnO نانوية باستخدام الطحن الميكانيكي، حيث كانت الجسيمات شبه كروية ومتجانسة الحجم، كما أظهر المسحوق الناتج نقاءً بلوريًا مرتفعًا.

كما تمكن (Carneiro et al (2014) في تصنيع جسيمات (ثاني أكسيد التيتانيوم) الملوثة بالحديد عبر الطحن الكروي، وحصلوا على جسيمات شبه كروية ذات توزيع حجمي ضيق وأبعاد نانوية منتظمة.

## 2. الاستئصال بالليزر (Laser Ablation)

تُعد تقنية الاستئصال بالليزر إحدى الطرق الفيزيائية الملائمة لإنتاج الجسيمات النانوية دون الحاجة إلى أي مواد كيميائية، إذ تعتمد على توجيه نبضات قوية من ليزر نيوديميوم: ياج Nd:YAG نحو سطح مادة صلبة لإزالة طبقة رقيقة منها، مما يؤدي إلى تكوّن سحابة بلازمية تبدأ بالاندماج والتكاثف لتشكل جسيمات نانوية دقيقة.

وفي الوسط السائل يساعد السائل على تبريد هذه الجسيمات بسرعة ومنع تكتلها، بينما في الوسط الغازي تتكاثف الذرات المتبخرة فوق ركيزة مناسبة لتكوين طبقات نانوية نقية ومنتظمة (Khan et al., 2021).

وقد تمكن (Abdulateef et al (2016) من إنتاج جسيمات أكسيد النحاس (CuO) نانوية كروية فائقة النعومة باستخدام الاستئصال الليزري في السائل. كذلك تمكن (Al-Azawi and Bidin (2015) من إنتاج جسيمات الذهب النانوية (AuNPs) متجانسة الحجم عبر الاستئصال الليزري في الماء منزوع الأيونات، مما يؤكد قدرة هذه الطريقة على التحكم الدقيق في الخصائص المورفولوجية.

وقد تمكن (Jebur و Shehab (2025)، من تصنيع جسيمات نانوية من أكسيد الزنك بواسطة تقنية الاستئصال بالليزر النبضي. تم استخدام ليزر Nd:YAG بطول 1064nm مع زمن نبضة يبلغ 9 نانوثانية. تعرضت صفيحة من الزنك النقي، التي كانت مغمورة في الماء منزوع الأيونات، لحزمة الليزر، مما أدى إلى إنتاج جسيمات ZnO نانوية على شكل محلول غروي.

### 3 . التكتيف والتجمع الغازي (Gas Condensation and Aggregation)

تُعد طريقة التكتيف والتجمع الغازي من الوسائل الفعّالة لإنتاج جسيمات نانوية عالية النقاء وبأحجام مضبوطة، حيث تبدأ العملية بتحويل المادة إلى ذرات أو جزيئات عن طريق الرش الكهربائي في غاز خامل، ثم تتكاثف هذه الذرات بسرعة لتشكّل نوى تنمو إلى جسيمات نانوية. ويتيح التحكم في الضغط ودرجة الحرارة ونوع الغاز في ضبط حجم الجسيمات وشكلها وبلوريتها بدقة، كما يمكن إضافة مراحل أخرى مثل ترسيب الأغلفة أو اختيار أحجام محدّدة عبر مرشح كتلي ( Grammatikopoulos et al., 2016).

وقد تمكن Xing et al. (2016) من تحضير جسيمات أكسيد الحديد(III) نانوية باستخدام التكتيف بالغاز دعالي الضغط، حيث كانت الجسيمات شبه كروية وموحدة الحجم.

وقد تمكن Grammatikopoulos et al., 2023 من إنتاج جسيمات نانوية من أكسيد الزنك (ZnO) بدواسطة تقنية التكتيف والتجمع في الطور الغازي. تم الحصول على هذه الجسيمات النانوية من خلال عملية تبخير المادة في بيئة غازية خاملة، حيث يتم تكثيفها وتنميتها في الحالة الغازية. ووجدت الدراسات أن الجسيمات التي تم إنتاجها كانت بحجم نانوي متجانس يتراوح تقريباً بين 5 إلى 20 نانومتر، وكان هناك توزيع حجمي متوازن ونقاء مرتفع، مما يدل على كفاءة هذه التقنية في التحكم في خصائص الجسيمات النانوية الناتجة.

### 4. التبخير والترسيب الفيزيائي للبخار (Physical Vapor Deposition, PVD)

يُستخدم التبخير الحراري أو الترسيب الفيزيائي للبخار لإنتاج جسيمات أو طبقات نانوية عبر تبخير المواد تحت درجات حرارة عالية ثم تكثفها على ركيزة مناسبة (Green Nanoparticles, 2021).

وقد صنّعت جسيمات الحديد النانوية باستخدام تقنية الحزمة الإلكترونية والترسيب الفيزيائي للبخار حيث يُسخّن الحديد مع NaCl كلوريد الصوديوم (ملح الطعام) ليعمل الملح كمصفوفة تمنع تكثف الجسيمات. وتُعد هذه الطريقة قادرة على إنتاج جسيمات نانوية بأبعاد صغيرة جداً وبأشكال مضبوطة (Al-Harbi & Abd-Elrahman, 2025).

وقد تمكن Toma et al., 2025 من تحضير أغشية نانوية من أكسيد الزنك عن طريق تقنية التبخير والترسيب الفيزيائي للبخار. وقد أظهرت النتائج أن البنية البلورية التي تشكلت هي سداسية، وكانت درجة التبلور جيدة. كما تراوح حجم الجسيمات النانوية الناتجة تقريباً بين 25 و 80 nm، مع تحقيق شفافية بصرية عالية وخصائص كهربائية تناسب التطبيقات في المجالات الإلكترونية والبصرية.

تعد الطريقة الفيزيائية أسلوبًا سهلًا، وتسمح بإنتاج جسيمات نانوية ذات أبعاد وأشكال مضبوطة تصل إلى بضعة نانومترات، وذلك بالاعتماد على أجهزة ميكانيكية متباينة تساعد في ضبط مقاييس الجسيمات ونوعيتها (Al-Harbi & Abd-Elrahman, 2020).

تتميز الطرائق الفيزيائية في تحضير المواد النانوية بأنها صديقة للبيئة ولا تُسبب تلوثًا، لكونها لا تعتمد على المذيبات الكيميائية. كما أنها قادرة على إنتاج جسيمات نانوية متجانسة وذات جودة عالية (Wirunchit et al., 2021).

تواجه الطرق الفيزيائية في تحضير الجسيمات النانوية عددًا من التحديات التي تُقلل من كفاءتها واستدامتها. فهي تتطلب غالبًا قدرًا كبيرًا من الطاقة وتجهيزات متخصصة مرتفعة التكلفة، مما يجعلها أقل جدوى من الناحية الاقتصادية. كما تتسم مُخرجات هذه الأساليب بانخفاض المردود، مع صعوبة تحقيق ضبط دقيق لشكل الجسيمات وحجمها، الأمر الذي يؤدي في كثير من الأحيان إلى عدم تجانس التوزيع أو حدوث تكسّر وفقدان للاستقرار. إضافةً إلى ذلك، تحتاج الطرق الفيزيائية إلى كميات كبيرة من المواد الأولية للحصول على ناتج محدود، ولا تُعدّ بالفعالية أو الملاءمة البيئية نفسها التي توفرها الطرق النظيفة أو الحيوية الحديثة (Raza & Pervaiz, 2025).

## 2-5-2 الطرق الكيميائية (Chemical Methods)

تُعد الجسيمات النانوية الفلزية من أبسط وأكثر الهياكل النانوية استخدامًا في الصناعات المختلفة. معظم أملاح الفلزات قابلة للذوبان في الماء، ويمكن الحصول على جسيمات نانوية صلبة بإضافة عوامل مختزلة مثل الهيدروجين، الهيدرازين، أو البوروهيدريد، التي تحول أيونات المعادن المذابة إلى صورة معدنية صلبة. على سبيل المثال، يمكن تحويل أيونات الذهب في محلول مائي إلى جسيمات نانوية ذهبية باستخدام عامل مختزل مناسب. يُعتبر الهيدروجين عامل اختزال فعال ورخيص للعديد من الأملاح المعدنية، بينما يمتاز الهيدرازين والبوروهيدريد بقدرة اختزال أعلى (حوالي -230 و -480 mV). يمكن استخدام الكحول أحيانًا كعامل مساعد، ويؤثر اختيار العامل المختزل بشكل مباشر على حجم وشكل وخصائص الجسيمات الناتجة (Hachem et al., 2022).

تعتبر طريقة الترسيب الكيميائي واحدًا من أكثر الأساليب الشائعة في إنتاج الجسيمات النانوية، وذلك لأنه سهل وغير مكلف. تستند هذه الطريقة إلى إنشاء راسب نانوي دون الحاجة إلى ضغوط مرتفعة أو درجات حرارة عالية، ويمكن بسهولة إزالة الشوائب بواسطة الترشيح والغسل. تتيح هذه التقنية الحصول على جسيمات نانوية نقية ومتجانسة في الحجم والشكل. كما أنها مناسبة للاستخدام في مختبرات عادية دون الحاجة إلى ظروف خاصة. خلال الدراسة، تم استخدام الموجات فوق الصوتية لتعزيز التجانس ومنع تجمع

الجسيمات أثناء التحضير. تظهر النتائج أن الترسيب الكيميائي يعد وسيلة فعالة لإنتاج مواد نانوية ذات جودة عالية باستخدام أبسط الأدوات المتاحة (Tazikeh et al., 2014).

ذكر (Robinson, etal (2015) أن زيادة نسبة بيكربونات الأمونيوم إلى المنغيز ثنائي الشحنة أثناء عملية الترسيب المشترك أدت إلى تحول ملحوظ في شكل الجسيمات من مكعبات إلى كريات، ويُعزى هذا التغير إلى اختلاف أحجام الجسيمات الأولية، حيث تميل الجسيمات الصغيرة إلى الالتصاق معًا لتكوين أشكال كروية أكثر انتظامًا.

كما وجد (Dahn و Van Bommel (2009) أن قيمة الأس الهيدروجيني (pH) تؤثر مباشرة على حجم الجسيمات أثناء ترسيب هيدروكسيدات المعادن، إذ يؤدي ارتفاع الأس الهيدروجيني إلى تسريع نمو الجسيمات وتقليل حجمها، بالإضافة إلى تحسين نعومة السطح وزيادة الكثافة الظاهرية للجسيمات المتكونة. وأوضح أن تطور الجسيمات الكروية يصبح أكثر وضوحًا خلال الساعات الأولى من التفاعل، حيث تزداد نعومتها واستدارتها مع مرور الوقت، مما يفسر الزيادة التدريجية في الكثافة الظاهرية خلال الساعات العشر الأولى من عملية الترسيب.

كما أوضحت نتائج توصل لها (Lee,etal (2002) أن التحكم في تركيز الأمونيا ومعدل الخلط يساعد في تكوين كرويات من الجسيمات ويقلل من تشتت حجمها، مما يساهم في تحسين انتظام البنية وزيادة الكثافة الظاهرية للمادة المنتجة.

وتعد طريقة السول-جل (Sol-gel) من أبسط وأشمل الطرق الكيميائية لإنتاج جسيمات أكسيد الزنك النانوية. تعتمد على إذابة أملاح الزنك، مثل خلات الزنك، في الكحوليات مثل الميثانول، الإيثانول، أو الإيزوبروبانول، ثم إضافة قاعدة مثل هيدروكسيد الصوديوم، هيدروكسيد البوتاسيوم، أو هيدروكسيد الأمونيوم. يلعب المذيب دورًا رئيسيًا في التحكم بتفاعلات التحلل المائي، ويؤثر على حجم وشكل وثبات الجسيمات النانوية المتكونة (Arya et al 2021).

تتميز الطرق الكيميائية في تحضير المواد النانوية بميزة جوهرية تتمثل في قدرتها العالية على ضبط قطر الجسيمات النانوية أثناء عملية التصنيع، مما يسمح بالحصول على أحجام دقيقة ومتجانسة. كما تتيح هذه الأساليب التحكم في شكل الجسيمات الخارجي (morphology)، وهو عامل مهم في تثبيت خصائصها وسلوكها الوظيفي. إضافة إلى ذلك، تمتاز الطرق الكيميائية بقدرتها على إنتاج مواد نانوية ذات ثبات عالي، مما يجعلها أقل عرضة للتكتل أو التغير أثناء الاستخدام أو التخزين (González García & Cantu, 2022).

وتُعاني الطرق الكيميائية لتجهيز المواد النانوية من عدة صعوبات، أبرزها تشكّل ملوثات على سطح الحُبيبات النانوية المُصنَّعة، الأمر الذي يُنقص من صفاتها وقيمتها. كما تستلزم هذه المقاربات ظروف إعداد دقيقة وشديدة، سواءً فيما يخصّ الضبط الدقيق للحرارة أو المواد الكيميائية المستعملة، وهذا يجعل الإجراء أكثر استهلاكاً للطاقة والموارد، وأقل فاعلية من منظور التكلفة والزمن (Yuan et al., 2021).

أظهرت دراسة (Kartini et al. (2004) الى تطوير طريقة سول-جيل ثنائية الخطوة لتحضير جسيمات (ثاني أكسيد التيتانيوم) ذات طبيعة مسامية، حيث اعتمدت العملية على تحلّل أيزوبروبوكسيد التيتانيوم بوجود مادة خافضة للتوتر السطحي، مما أدى إلى تكوين شبكة نانوية منتظمة. وتوضح هذه الدراسة قابلية تقنية السول-جيل للتحكم في البنية النانوية من خلال ضبط ظروف التحضير الكيميائي.

أفاد (Kale et al. 2016) أن دمج جزيئات الصبغة داخل شبكة جيلاتينية ثلاثية الأبعاد باستخدام تقنية السول-جيل منح الأقمشة ثباتاً لونياً أعلى، بالإضافة إلى تحسين الخصائص الوظيفية مثل مقاومة الأشعة فوق البنفسجية. وتعد هذه الدراسة مثلاً على قدرة السول-جيل على إكساب المواد خصائص جديدة من خلال التفاعل الكيميائي الرطب.

كما ذكر (Franco et al. (2018) أنهم تمكنوا من تصنيع ألياف نانوية من بوليمر النايلون باستخدام تقنية السول-جيل مع الغزل الكهربائي، حيث تبين أن متوسط قطر الألياف الناتجة تراوح بين 117 و660 نانومتر، مما يؤكد قدرة هذه التقنية على إنتاج تراكيب نانوية دقيقة ومتجانسة.

### 3-5-2 الطرق البيولوجية (Biological Methods).

يُعدّ التصنيع الأخضر جزءاً أساسياً من مفهوم التصنيع المستدام، إذ ظهر هذا التوجّه في ألمانيا خلال أوائل التسعينات تلبيةً لمتطلبات الأسواق التي بدأت تميل نحو الاستدامة. ويهدف التصنيع الأخضر إلى تطبيق مبدأ الإنتاج بأقل هدر ممكن للمواد والطاقة، مع التركيز على تقليل التلوث والأضرار البيئية، وتحسين كفاءة استخدام الموارد الطبيعية والطاقة، والحد من المخاطر الصحية المرتبطة بالمواد الخام (Gungor & Gupta, 2011). ويشير التصنيع الأخضر، بعد اكتمال عملية الإنتاج، إلى إلزام المنتجين بتقديم منتجات لا تُشكّل تهديداً على البيئة أو صحة الإنسان طوال فترة استخدامها، مع الحفاظ على الجودة وتقليل استخدام المكونات الخطرة قدر الإمكان (2025 الحلاجي ومال الله). كما يُعرّف بأنه عملية إنتاج تهدف إلى تقليل الآثار البيئية الضارة واستهلاك الطاقة والموارد الطبيعية، مع ضمان سلامة العاملين والمجتمعات والمستهلكين، إضافةً إلى قابليته للاستمرار اقتصادياً (Adhikari et al., 2025).



#### الشكل (4-2) مزايا التخليق الأخضر

من هنا، يُعد دمج مبادئ التصنيع الأخضر مع طرق التحضير الفيزيائية والكيميائية خطوة أساسية لتطوير جسيمات نانوية عالية الكفاءة، صديقة للبيئة، ومستدامة اقتصاديًا (الخطيب وآخرون، 2022) (أحمد الطويل وآخرون، 2024).

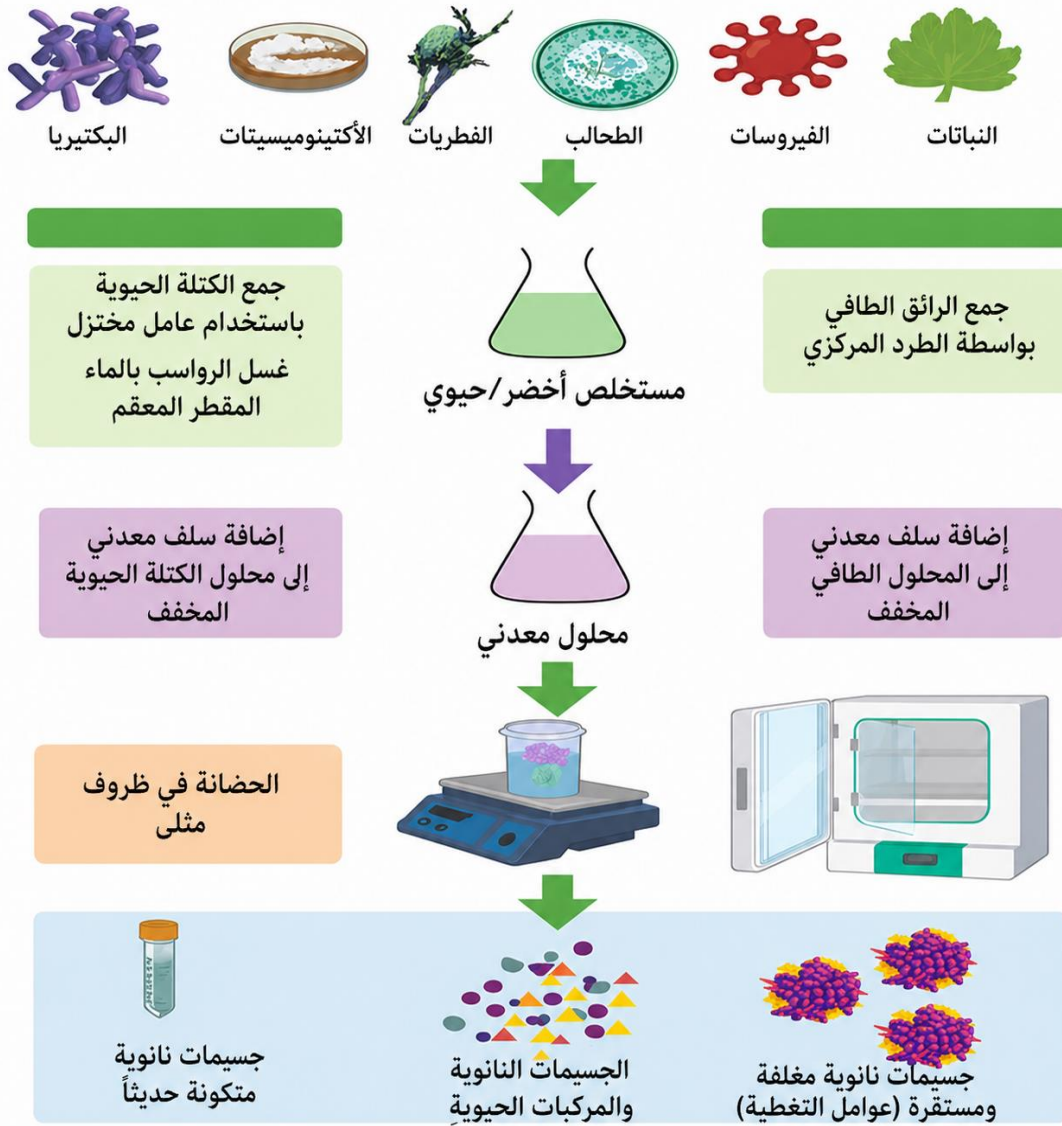
تمتاز الجسيمات النانوية باستخدام مستخلصات نباتية بسمات محسنة مقارنة بالطرق التقليدية، حيث أظهرت بيانات حيود الأشعة السينية أن حجمها البلوري أصغر (7.84 nm) مقارنة بالجسيمات المحضرة كيميائيًا (13.41 nm). وأكدت نتائج المجهر الإلكتروني الماسح والنافذ دقة أكبر في الحجم وتوزيعًا أكثر انتظامًا للجسيمات، كما أظهرت دراسات التحليل الحراري التفاضلي والمسعر الحراري التفاضلي أن هذه الجسيمات تتمتع بثبات حراري أعلى، إضافةً إلى نشاط مضاد للميكروبات أقوى ضد مجموعة متنوعة من الكائنات الحية. وتؤكد هذه النتائج على فعالية هذه الطريقة في إنتاج جسيمات  $Fe_3O_4$  النانوية بخصائص محسنة. (Piro, N.S., 2022).

تواجه الطريقة الخضراء لإعداد المواد النانوية عدة قيود تُحد من توظيفها الواسع، إذ غالبًا ما تُنتج جسيمات غير متجانسة ويصعب ضبط حجمها وشكلها بدقة لتأثر المركبات الحيوية بالعناصر المحيطة كدرجة الحموضة. كما أن إجراءات الإعداد تكون بطيئة وتتطلب فترة أطول بالمقارنة مع الأساليب الكيميائية، فضلًا عن صعوبة تكرار النتائج نتيجة تباين مكونات المستخلصات النباتية أو الكائنات الحية المستعملة.

وتعد الإجراءات البيولوجية كزرع البكتيريا أو الفطريات مُتعبة وباهظة الثمن وتستدعي مراحل فصل مُتشابكة، ما يجعل تفعيلها الصناعي محصورًا ويحتاج إلى تحسينات إضافية لزيادة فعاليتها وثباتها ( Bhardwaj et al., 2020 ).

ومن الطرق البيولوجية استخدام البكتيريا في تصنيع المواد النانوية وقد تتميز بعض أنواع البكتيريا في تقليل أيونات المعادن وتحويلها إلى جسيمات نانوية داخل أو خارج الخلايا بحجم متساوي. تتميز هذه الطريقة بإمكانية التحكم النسبية في حجم الجسيمات وتوزيعها، فضلًا عن فعاليتها العالية في إنتاج المعادن النانوية (Iravani, 2014). وتُعتبر الفطريات من بين الكائنات الحية الأكثر استخدامًا في تخليق المواد النانوية، بسبب قدرتها الكبيرة على الإفراز الخارجي وسهولة فصل الجسيمات الناتجة. كما أن الفطريات تتحمل التسمم بشكل جيد وتستطيع إنتاج كميات كبيرة من الجسيمات النانوية المستقرة ( Mathur & Pillai, 2025 ). وتُستخدم أيضًا الخمائر في تحضير المواد النانوية بسبب سهولة المعالجة وإنتاجها خارج الخلية بكفاءة جيدة. علاوة على ذلك، يمكن استخدام الجزيئات الحيوية مثل الفيروسات والبروتينات والإنزيمات كقوالب طبيعية فعالة في تخليق المواد النانوية والتحكم في شكلها وحجمها ( Ingale & Chaudhari, 2013 ).

وتعد النباتات من المصادر الحيوية المهمة لإنتاج الجسيمات النانوية بطريقة صديقة للبيئة، وتعد هذه الطريقة على استخدام مستخلصات نباتية تعمل كعوامل مختزلة ومثبتة في الوقت نفسه. تحتوي أجزاء النباتات المختلفة، مثل الأوراق والسيقان والجذور والثمار والبذور، على مركبات نباتية فعالة مثل الفلافونويدات والفينولات والقلويات والتربينويدات والسكريات والبروتينات، والتي تساعد على تحويل أيونات المعادن (مثل  $Ag^+$ ) إلى جسيمات نانوية معدنية مستقرة (Shahzadi et al., 2025).



الشكل (5-2): مخطط التخليق الحيوي (الأخضر) للجسيمات النانوية المعدنية (Altammar, 2023).

استطاع (Hanafy et al (2020) من استخدام مستخلص نبات الصبار في تحضير جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم. فقد بينت النتائج أن زيادة قيمة pH تساعد على تقليل حجم الجسيمات وزيادة نقائها البلوري، مما يجعل الجسيمات المتكونة في الوسط القلوي أكثر ملاءمة للاستخدامات الطبية والحيوية مقارنة بتلك المحضرة في الأوساط المتعادلة أو الحمضية .

أشارت الدراسة التي أجراها (Siripreddy (2017) و Mandal إلى أن مستخلص أوراق نبات اليوكالبتوس (Eucalyptus globulus) تم استخدامه بنجاح في عملية التخليق الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك النانوية، حيث تمكن الباحثان من تحضير جسيمات نانوية ذات شكل كروي وبحجم متوسط يبلغ 11.6 نانومتر. كما أظهرت الجسيمات النانوية المحضرة قدرة مضادة للأكسدة ، مما يبرهن على فاعلية

مستخلص اليوكالبتوس كمصدر نباتي مناسب لتحضير جسيمات ZnO النانوية التي تتمتع بخصائص وظيفية متميزة.

## 6-2 التصنيع الأخضر لجسيمات اكسيد الزنك النانوية (Green Synthesis of Zinc Nanoparticles) .

في السنوات الأخيرة، ازداد الاهتمام بالتصنيع الأخضر لإنتاج جسيمات أكسيد الزنك النانوية، إذ تُعد بديلاً مستدامًا وأكثر أمانًا مقارنة بالطرق الكيميائية والفيزيائية التقليدية. وقد أثبتت التقنيات الحيوية التي تعتمد على النباتات والطحالب والبكتيريا والفطريات قدرتها على تصنيع جسيمات نانوية بكفاءة عالية وبأسعار معقولة، دون الحاجة إلى مواد كيميائية خطيرة أو استهلاك طاقة مرتفع قد يسبب ضررًا بيئيًا. وتعتمد هذه الأساليب على المركبات الحيوية الموجودة في الكائنات الحية، مثل الإنزيمات والمركبات الحيوية الثانوية والبروتينات، والتي تعمل كعوامل مختزلة ومثبتة في الوقت ذاته، مما يتيح إنتاج جسيمات أكسيد الزنك بطريقة آمنة وصديقة للبيئة. وتُعد الطرق المعتمدة على النباتات الأكثر كفاءة، نظرًا لقدرة المستخلصات النباتية على اختزال الأملاح المعدنية وتنظيم شكل وحجم الجسيمات النانوية تبعًا لعوامل مختلفة مثل درجة الحرارة والرغم الهيدروجيني. وتشير الأبحاث الحديثة أيضًا إلى أن الطرق الحيوية قد تسمح بإنتاج جسيمات أصغر حجمًا وأكثر نقاءً، بالإضافة إلى تقليل الانبعاثات وتخفيض التكاليف التشغيلية، مما يجعلها خيارًا متقدمًا للاستخدامات الطبية والبيئية التي تتطلب مواد آمنة وخالية من الملوثات (El-Saadony et al., 2024) .

وتُعد نترات الزنك من أكثر أملاح الزنك استخدامًا في تحضير الجسيمات النانوية، ولاسيما أكسيد الزنك النانوي، وذلك لذوبانها العالي في الماء وقدرتها على تحرير أيونات الزنك ( $Zn^{2+}$ ) بسهولة، مما يجعلها مادة أولية فعالة في عمليات التخليق. في طريقة التخليق الأخضر، تُستخدم نترات الزنك لكونها متوافقة مع المستخلصات النباتية، حيث تعمل المركبات الحيوية مثل الفلافونويدات والفينولات كمختزلات وعوامل تثبيت، فتُسهل في تكوين جسيمات نانوية مستقرة وبأحجام منتظمة. كما تتميز هذه الطريقة بانخفاض السمية وقلة التأثيرات البيئية مقارنة بالطرق الكيميائية التقليدية، إضافة إلى بساطة التنفيذ وانخفاض الكلفة، مما يجعل نترات الزنك خيارًا مناسبًا وصديقًا للبيئة في تخليق الجسيمات النانوية ذات التطبيقات الطبية والبيئية والزراعية (Iravani, 2011) .

وتعد طرق التخليق الأخضر لجسيمات ZnO من الأساليب الواعدة حاليًا، لأنها توفر استقرارًا جيدًا، وتتميز بانخفاض التكاليف، كما أنها صديقة للبيئة، فضلًا عن إمكانية إجراء التفاعل في مرحلة واحدة فقط. وتعتمد هذه الطرق غالبًا على مستخلصات نباتية تحتوي على مركبات نشطة تساهم في تحفيز إنتاج جسيمات ZnO

النانوية. وتعمل المركبات العضوية مثل الفينولات والمجموعات الكربوكسيلية والأميدات والكحولات كعوامل اختزال ومساعدة على تكوين الجسيمات. وعادة ما يتم ذلك من خلال إضافة المستخلص النباتي إلى محلول يحتوي على أيونات الزنك مع التحريك المستمر للسماح بتشكّل جسيمات أكسيد الزنك (Molla et al., 2025).

وتتميز جسيمات أكسيد الزنك النانوية بانخفاض مستويات سميتها وارتفاع توافقها الحيوي وسهولة تصنيعها، إلى جانب امتلاكها خواصًا بصرية وفيزيائية فعّالة. كما تُظهر نشاطًا مهمًا كمضاد لسرطان والالتهابات. وقد برزت الطرق البيئية كبديل أفضل من الطرق الكيميائية التقليدية، لأنها نظيفة وآمنة وأقل تكلفة. وتعمل المركبات الطبيعية الموجودة في المستخلصات النباتية أو الميكروبية كعوامل اختزال وتثبيت للجسيمات، مما يؤدي إلى إنتاج جسيمات أكثر تجانسًا وأصغر حجمًا، وهذا يعزز فعاليتها الحيوية مقارنة بالطرق الأخرى (Gomaa, 2022).

وتتميز جسيمات ZnO النانوية بفاعلية مضادة للجراثيم عالية، خاصة ضد المكورات العنقودية الذهبية والإشريشيا كولاي. كما تمتلك هذه الجسيمات سمات مهمة مثل التوافق الحيوي والقدرة الممتازة على التحلل الحيوي، ما يجعلها متفوقة على جسيمات المعادن الأخرى ويزيد من تطبيقاتها في المجالات العلاجية والتجميلية. وقد لوحظ أن الجسيمات ذات الحجم 5 nm تمتلك فاعلية مبيدة للجراثيم وتُعد مأمونة على الخلايا الجلدية البشرية. كما أظهرت الدراسات إمكانية دمج جسيمات ZnO النانوية مع جسيمات ZnO الأكبر حجمًا لتعزيز الخصائص الميكانيكية والمضادة للجراثيم لهياكل تضميد الجروح (Dasilva et al., 2019).

فقد تمكن الباحث (Bhuyan et al. (2015) من استخدام مستخلص أوراق شجرة النيم في تخليق جسيمات نانوية من أكسيد الزنك (ZnO) بطريقة التخليق الأخضر.

حيث أوضحت الدراسة أن المركبات النباتية الموجودة في المستخلص، مثل الفلافونويدات والتربينات والسكريات، تمتلك القدرة على اختزال أيونات الزنك وتثبيت الجسيمات النانوية المتكوّنة، مما يجعل هذه الطريقة صديقة للبيئة وأكثر أمانًا. كما بيّنت النتائج أن أحجام الجسيمات المنتجة تراوحت بين 9.6 nm و25.5 nm. تميزت ببقاء عالٍ وثبات جيد نتيجة تغليفها الطبيعي بالمركبات الحيوية، مما يؤكد أن التخليق الأخضر يُعد وسيلة فعّالة ومنخفضة التكلفة لإنتاج جسيمات ZnO النانوية المناسبة للتطبيقات الطبية والبيئية.

وتعتمد العملية الصديقة للبيئة لتصنيع جسيمات أكسيد الزنك النانوية على تفاعل المركبات النباتية النشطة مثل البوليفينولات مع أيونات الزنك لتكوين معقدات أولية. وبعد ذلك تحدث عملية التحلل المائي التي ينتج

عنها هيدروكسيد الزنك، والذي يتحول لاحقًا عبر التكلس إلى جسيمات أكسيد الزنك النانوية. وتعمل المركبات النباتية كعوامل اختزال وتثبيت في الوقت نفسه، مما يساعد على إنتاج جسيمات مستقرة يمكن التحكم في خصائصها. وتُعد الخصائص مثل الحجم والشكل وعدد الفجوات المحتوية على الأكسجين من العوامل الرئيسية التي تؤثر مباشرة في فعاليتها. إذ تزداد قدرة الجسيمات على التفاعل والنشاط البيولوجي مع انخفاض حجمها وزيادة مساحة سطحها ووفرة مواقع التفاعل عليها ( Ogunyemi et al, 2019 ).

وتتميز جسيمات أكسيد الزنك النانوية بتطبيقات طبية حيوية واسعة، إذ تعمل كمضاد قوي للبكتيريا والفطريات، وتُظهر تأثيرًا مضادًا للسرطان عبر تحفيز موت الخلايا السرطانية. كما تمتلك خصائص مضادة للالتهابات وتساعد في تسريع التئام الجروح من خلال دعم نمو الخلايا وتقليل العدوى. فضلًا عن ذلك، تُستخدم كحاملات فعّال للأدوية بفضل قدرتها على إطلاق الدواء بشكل موجّه داخل الأنسجة المستهدفة ( Hamrayev et al., 2021 ).

ويعد نبات اليوكالبتوس مصدرًا غنيًا بالمركبات النشطة القادرة على لعب دور أساسي في التخليق الأخضر للجسيمات النانوية، إذ تحتوي أوراقها على نسب مرتفعة من الفينولات والفلافونويدات والكاروتينات التي تعمل كعوامل مختزلة ومثبتة للجسيمات أثناء تكوينها. ويسهم وجود هذه المركبات أيضًا في التحكم بحجم الجسيمات وشكلها وزيادة استقرارها، مما يجعل اليوكالبتوس من أهم المصادر النباتية المستخدمة في التحضير الحيوي للمواد النانوية (Ebulue, 2023).

وتتبع أهمية استخدام مستخلصات النباتات ومنها اليوكالبتوس كونها توفر وسيلة صديقة للبيئة وأكثر أمانًا مقارنة بالطرق الكيميائية التقليدية، إذ يؤدي استعمال المركبات النباتية المختزلة والمثبتة إلى إنتاج جسيمات نانوية ذات قابلية عالية للتفاعل الحيوي، نظرًا لزيادة نسبة السطح إلى الحجم، مما يعزز نشاطها المضاد للبكتيريا وقدرتها على التغلغل في الأغشية الخلوية ( Droepenu, 2024 ).

## 7-2 طرق تشخيص الجسيمات النانوية ( Nanoparticle Characterization ) . (Methods)

تشخيص الجسيمات النانوية خطوة أساسية لفهم خصائصها الفيزيائية والكيميائية، مثل الحجم، الشكل، السطح، والتركيب البلوري. تُستخدم تقنيات متعددة مثل المجهر الإلكتروني، التحليل الطيفي، وقياس التشتت الضوئي لضمان جودة وفعالية الجسيمات النانوية في التطبيقات المختلفة.

وأصبحت البنى النانوية مجال اهتمام كبير، نظرًا لأنها تمثل مجموعة متزايدة من المواد التي يمكن الاستفادة منها في العديد من التطبيقات. هناك العديد من التقنيات المستخدمة لتوصيف خصائص هذه الجسيمات، مثل الحجم، التكوين البلوري، والتركيب الذر ( Mourdikoudis et al 2018 ).

في بعض الأحيان، يمكن استخدام أكثر من أسلوب لدراسة خاصية معينة، لكن لكل أسلوب مزاياه وعيوبه التي تختلف عن غيره، مما يجعل أحياناً من الصعب اختيار الطريقة المثلى. لهذا السبب، غالباً ما يكون من الضروري الجمع بين عدة تقنيات للحصول على توصيف شامل ودقيق للجسيمات النانوية. من المهم أن يكون الباحث ملماً بمزايا وقيود كل أسلوب، لتحديد ما إذا كان استخدام أسلوب واحد أو اثنين كافياً للحصول على بيانات موثوقة حول خاصية معينة، أو ما إذا كان من الضروري الدمج بين عدة طرق (Szczyglewska et al., 2023). وتعد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات النانوية عنصراً رئيسياً في تحديد فعاليتها الحيوية. يساعد صغر حجم الجسيمات وشكلها المناسب على اختراق الأغشية الخلوية وزيادة تفاعلها مع الخلايا الميكروبية. كما أن الزيادة في المساحة السطحية والشحنة السطحية تعزز من ارتباطها بالخلايا وتؤثر على نشاطها المضاد للأحياء الدقيقة. تؤثر تركيبة السطح والتفاعلات في قدرة الجسيمات النانوية على التفاعل مع مكونات الخلايا وإحداث تأثيرات حيوية متنوعة. بوجه عام، يجتمع كل هذه الخصائص ليحدد مستوى كفاءة الجسيمات النانوية في التطبيقات الحيوية (Nwankwo et al., 2023).

## 2-7-1 مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) .

تُعد مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) تقنية تحليلية مهمة للكشف عن البنى الجزيئية والوظائف الكيميائية في مختلف المركبات. تعتمد هذه التقنية على امتصاص الجزيئات للأشعة تحت الحمراء ما يسمح بتحديد الروابط والتغيرات داخل البنية الجزيئية، وبفضل بساطة استخدامها ودقتها العالية، أصبحت FTIR أداة أساسية في الكيمياء، علوم البيئة، الأحياء، وعلوم المواد، كما تُستخدم في تحليل البوليمرات، مراقبة جودة المنتجات، ودعم التطبيقات الصناعية، وفي المجال الطبي والصيدلي، تساعد في فهم البروتينات والتغيرات الجزيئية المرتبطة بالأمراض وتطوير العلاجات (Siddique, 2024).

توصل كل من (Alrubaie وKadhim (2019) إلى تحضير جسيمات نانوية من أكسيد الزنك باستخدام مستخلص من أوراق الزيتون. وقد أوضح تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) وجود نطاقات اهتزازية خاصة لمجموعات O-H و C-H و C=C و C-O والأمينات، بالإضافة إلى وجود نطاق Zn-O. هذه النتائج تشير إلى وجود المركبات الحيوية على سطح الجسيمات ودورها في اختزال أيونات الزنك وتثبيتها. تدل هذه الاكتشافات على أن مكونات المستخلص النباتي قد لعبت دوراً مهماً في تكوين وتثبيت ZnO NPs خلال عملية التخليق الحيوي .

## 2-7-2 حيود الأشعة السينية (XRD)

تُعد تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) من أهم الأساليب الملائمة لتحليل البنية البلورية. تعتمد هذه التقنية على تفاعل الأشعة السينية مع التركيب البلوري والسمك والمسافة البينية للمواد، ويتم تحليل البيانات من خلال مطابقتها مع نماذج نظرية باستخدام المحاكاة. وتستخدم XRD لتحديد حجم البلورات والإجهاد الشبكي، إذ يرتبط اتساع قمم الحيود بصغر حجم الجسيمات ووجود تشوهات في الشبكة. وتثبت هذه التقنية كفاءتها في دراسة دقائق أكسيد الزنك النانوية وخصائصها البنيوية. (Grace et al., 2023).

ذكر، (Mallikarjunaswamy, et al (2020) أن الجسيمات النانوية من ZnO التي تم إعدادها باستخدام عصير نبات النيل الهندي (Aegle marmelos) أظهرت تميّزاً في قمم حيود الأشعة السينية، حيث تطابقت هذه القمم مع الهيكل السداسي لطور wurtzite. أظهرت نتائج حيود الأشعة السينية وجود قمم مميزة تؤكد التبلور الجيد للمادة المُحضّرة. كما تم حساب الحجم البلوري للجسيمات باستخدام معادلة Debye–Scherrer، حيث بلغ متوسط الحجم البلوري حوالي 17 nm.

وقد تمكن (Ahmad et al (2020)، من استخدام مستخلص أوراق شجرة اليوكالبتوس (Eucalyptus globulus) لإنتاج جسيمات نانوية من أكسيد الزنك بطرق صديقة للبيئة. حيث عمل المستخلص النباتي كعامل مختزل ومستقر خلال عملية التصنيع. وقد أظهرت نتائج تحليل الأشعة السينية (XRD) أن الجسيمات النانوية التي تم تحضيرها تتمتع بخصائص بلورية واضحة، حيث تطابق نمط الحيود التركيب السداسي (هيكل وورترزيت) المعروف لأكسيد الزنك، مما يدل على نجاح عملية التخليق الحيوي وعدم وجود أي أطوار ثانوية غير مرغوبة.

## 3-7-2 مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis)

تُعد مطيافية الأشعة فوق البنفسجية – المرئية UV-Vis من التقنيات الحديثة التي شهدت توسعاً كبيراً خلال العقدين الماضيين، خصوصاً في الدراسات التي تُجرى فيها التفاعل لفهم آليات عمل المحفزات المتجانسة وغير المتجانسة. وتمتاز هذه التقنية بمرونتها، إذ يمكن استخدامها لدراسة المحفزات في الحالات السائلة والصلبة وتحت ظروف قاسية من الضغط والحرارة. ، مع إمكانية دمجها بالمجهر لفحص البلورات والمحفزات الكبيرة. وغالباً ما تُوظف UV-Vis مع تقنيات أخرى مثل الأشعة السينية وغيرها للحصول على معلومات أكثر تكاملاً. وقد استُخدمت لتحليل جسيمات ZnO النانوية (Vogt et al., 2023; Bulcha et al., 2021).

ذكر (Ibrahim et al. (2024) في بحثهم حول تحضير جسيمات أكسيد الحديد وأكسيد الزنك النانوية باستخدام المستخلصات النباتية، أن قياسات الأشعة فوق البنفسجية والمرئية كانت أساسية في إثبات تكوين

الجسيمات النانوية التي تم إعدادها. وقد أظهرت النتائج وجود قمة رنين البلازمون السطحي لجسيمات أكسيد الحديد النانوية عند طول موجي مقداره 320 nm ، الجسيمات. وأوضحت نتائج قياسات UV-Vis أن جسيمات أكسيد الزنك النانوية أظهرت قمة امتصاص واضحة عند 370 nm، وهو ما يعد دليلاً ملموساً على تكوين واستقرار جسيمات ZnO-NPs ضمن النطاق الطيفي المتوقع .

## 2-7-4 تقنيات التوصيف المورفولوجي والحجمي .

يُعد المجهر من أهم الأدوات التي أسهمت في تطوير العلوم الطبيعية والحياتية، إذ أتاح دراسة التراكيب الدقيقة التي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة. وقد شهدت تقنيات المجهر تطوراً كبيراً عبر الزمن، بدءاً من المجاهر الضوئية التقليدية وصولاً إلى المجاهر الإلكترونية المتقدمة، مما وفر إمكانية فحص المواد والكائنات الحية بدقة عالية ودراسة خصائصها التركيبية والمورفولوجية. ( Ortiz,etal, 2020 ). وتم تحليل الشكل المورفولوجي لجسيمات أكسيد الزنك النانوية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) ، وأظهرت النتائج أن معظم الجسيمات المتكوّنة كانت ذات أشكال غير منتظمة. كما تبين أن درجة حموضة الوسط التفاعلي تؤثر في خصائص الشكل، إذ يؤدي ارتفاع pH إلى زيادة حجم الجسيمات وتغيير شكلها. وبيّنت صور SEM أن المسحوق الناتج يتكون من جسيمات نانوية كروية الشكل ومتجانسة، وعند رفع درجة الحموضة اتخذت الجسيمات هيئة عصوية أو ببيضاوية موزّعة بانتظام (Ullah et al., 2024).

فقد تمكن (Shakorforw et al (2023) من تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية من خلال استخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس . وأظهرت نتائج الفحص بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح SEM- أن الجسيمات الناتجة كانت كروية الشكل وتتمتع بهيكل مسامي، بحيث كانت بأحجام نانوية تتراوح ما بين (22–37 nm). لوحظ أيضاً وجود تجمع بسيط للجسيمات، وهذا يرجع إلى تأثير المركّبات الفينولية في المستخلص النباتي التي ساهمت كعوامل تغطية وساهمت في تقليل التكتل.

أما المجهر الإلكتروني النافذ (TEM) ، فقد استُخدم لتحديد الحجم والهيئة والبنية الداخلية لجسيمات ZnO ، إضافة إلى فحص انتظامها البلوري بدقة عالية (Braidly et al., 2020) .

كما أظهر TEM أن الأسلاك النانوية تكونت نتيجة تراص الجسيمات بشكل متوازي أو عمودي ضمن بنية الـ وورزيت، وامتد نمو الجسيمات على طول محور ZnO دون ملاحظة عيوب بلورية واضحة حتى مع زيادة مدة التفاعل (Cao et al., 2019) .

وقد تمكن (Ahmad et al. 2020) من استخدام المستخلص المائي لأوراق نبات اليوكالبتوس في تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية، أظهرت نتائج الفحص باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ أن هذه الجسيمات كانت ذات أشكال شبه كروية ومتعددة الأشكال، مع توزيع حجم قريب نسبياً.

تراوحت أحجام الجسيمات النانوية من ZnO بين 52 nm و 70 ، مما يدل على نجاح طريقة التخليق الأخضر في إنتاج الجسيمات ضمن هذا النطاق. كما أظهرت صور المجهر الإلكتروني وجود بعض التكتلات المحدودة للجسيمات، وهذا يعود إلى تأثير المركبات الحيوية الموجودة في مستخلص اليوكالبتوس، والتي تعمل كعوامل اختزال وتثبيت خلال عملية التحضير.

فيما يخص تحليل حجم الجسيمات باستخدام التبعثر الضوئي الديناميكي (DLS) ، فقد أجريت قياسات لتقدير القطر المائي وتوزيع أحجام الجسيمات ضمن وسط غير كهربائي. وأظهرت النتائج تأثير المواد الفعالة سطحياً في ثبات حجم جسيمات ZnO النانوية (Krishnakumar & Elansezhian, 2022) .

يتم استخدام تقنية التبعثر الضوئي الديناميكي (Dynamic Light Scattering, DLS) لقياس الحجم الهيدروديناميكي للجزيئات الدقيقة والنانوية في السوائل، وذلك عن طريق دراسة تغيرات شدة الضوء المتبعثر التي تحدث نتيجة الحركة البراونية للجزيئات في السائل (Polonini et al., 2024) .

وقد تمكن (2020)، Barzinjy و Azeez من استخدام مستخلص أوراق نبات اليوكالبتوس (Eucalyptus globulus) في التخليق الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك ، ثم تم قياس حجم الجسيمات وتوزيعها باستخدام تقنية التشتت الضوئي الديناميكي (DLS). كشفت نتائج تحليل DLS أن الحجم الهيدروديناميكي لجسيمات ZnO النانوية كان أكبر من الحجم البلوري الذي تم حسابه بواسطة حيود الأشعة السينية (XRD)، ويفسر ذلك بوجود الغلاف الهيدروديناميكي حول الجسيمات نتيجة لتحلل المركبات الحيوية النباتية على سطح الجسيمات النانوية. كما بينت النتائج أن الجسيمات التي تم إعدادها تتمتع بتوزيع حجمي مناسب، مما يدل على فعالية مستخلص اليوكالبتوس كعامل مختزل ومستقر خلال عملية التصنيع الأخضر، ويعتبر هذا الاختلاف بين نتائج DLS و XRD شائعاً في الجسيمات النانوية التي تم تحضيرها بطرق حيوية بسبب تأثير الطبقة الحيوية الملتصقة وشكل الجسيمات على قياسات DLS.

## 8-2 أهمية وتطبيقات تقنية النانو ( Importance and Applications of Nanotechnology )

تُعد تقنية النانو من أهم التقنيات الحديثة التي أحدثت تحولاً كبيراً في مختلف القطاعات الصناعية والطبية والزراعية والبيئية والغذائية والطاقة والحوسبة . ففي المجال الصناعي، تُستخدم المتحسسات النانوية في صناعات السيارات والنفط والغاز، بينما تمنح المركبات النانوية خصائص ميكانيكية عالية وثباتاً مميزاً،

إضافةً إلى الأغشية الرقيقة المصنوعة من المركبات النانوية البوليمرية التي تمتلك قدرات عالية على الحجز والحماية ( Ragavi & Bagirathy, 2023 ) .

وفي المجال الطبي، تساعد تقنية النانو في تشخيص الأمراض بسرعة ودقة عالية، كما تُستخدم الجسيمات النانوية في تحسين التصوير الطبي وتوصيل الدواء مباشرة إلى موقع المرض لزيادة فعاليته وتقليل آثاره الجانبية. وتُساهم كذلك في ترميم العظام وصناعة مواد حيوية متقدمة، بالإضافة إلى تطوير أجهزة طبية دقيقة جدًا قادرة على أداء مهام داخل الجسم، فضلًا عن ابتكار مواد نانوية لامتصاص الجرعات الزائدة من الأدوية وحماية المريض (Malik, etal, 2023) .

تُعدّ تقنية النانو من أكثر المجالات العلمية الواعدة في تطوير المواد الحيوية والطبية، لما تتميز به الجسيمات النانوية من خصائص فريدة تؤهلها للاستخدام المباشر داخل الجسم دون إحداث استجابات ضارة، مما يجعلها ذات قيمة عالية في الأجهزة الطبية المزروعة والمواد الطبية المتقدمة (Ratner & 2020 Schoen) . وتبرز أهمية هذه التقنية في قدرتها على إنتاج مواد تتفاعل بصورة ملائمة مع الخلايا الحية وتمنع السمية أو الالتهابات، الأمر الذي يضمن نجاح التطبيقات الطبية طويلة الأمد مثل العلاجات الحيوية ( Karakullukcu, et al. 2023) .

كما توفر تقنية النانو حلولًا فعالة لتعزيز شفاء الأنسجة لما تمتلكه من قدرة على تحفيز التكاثر الخلوي ومقاومة الأكسدة، وقد أظهرت جسيمات أكسيد الزنك النانوية دورًا بارزًا في تقليل الندبات وتسريع التئام الجروح بفضل خصائصها المضادة للجذور الحرة ( Toren ,E . 2025 ) .

إضافةً إلى ذلك، فقد أثبتت هذه الجسيمات قدرتها على محاربة البكتيريا عبر آليات متعددة تشمل إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية وتدمير جدار الخلية، مما يجعلها بديلًا واعدًا للمضادات الحيوية التقليدية ومواجهة الجراثيم المقاومة ( Munir, et al 2023) .

وبذلك، يظهر أن تقنية النانو توفر تطبيقات واسعة في المجالات الحيوية والطبية تشمل تعزيز التوافق الحيوي، مكافحة الأكسدة، وتطوير مواد فعّالة مضادة للميكروبات، مما يجعلها من أهم ابتكارات القرن في دعم الصحة العامة والطب المتقدم.

أما في القطاع الزراعي، فتدعم تقنية النانو رفع إنتاجية المحاصيل من خلال تحسين كفاءة استخدام الأسمدة والمبيدات وتقليل الهدر، كما تسهم في الزراعة الدقيقة عبر الحساسات والأنظمة الذكية، وتقدّم حلولًا فعّالة في مراحل الإنتاج وما بعد الحصاد والتخزين والتوزيع، وتساعد تطبيقات مثل المبيدات والأسمدة النانوية والتغليف النانوي في تقليل التلوث، ورفع جودة الغذاء، وإطالة فترة صلاحيته، إضافة إلى دور الحساسات النانوية في كشف الملوثات بدقة عالية ( Manjunatha et al., 2016) .

وفي مجال تغليف الأغذية، توفر تقنية النانو أدوات متقدمة تساعد على إطالة مدة حفظ الطعام وتحسين سلامته، إذ تمنح المواد النانوية العبوات قدرة أكبر على منع الفساد وتقليل التلوث، كما تسمح بتطوير تغليف ذكي قادر على مراقبة حالة الغذاء والكشف عن التلف أو الميكروبات، بالإضافة إلى التغليف النشط الذي يحتوي على مركبات مضادة للميكروبات تُسهم في الحفاظ على الطعام طازجًا لفترة أطول (Silva et al., 2023).

كما تلعب تقنية النانو دورًا مهمًا في حماية البيئة، خصوصًا في تحسين جودة الهواء والماء. وتركز البحوث الحديثة على فهم سلوك المواد النانوية في البيئة، بينما تُستخدم مواد نانوية متقدمة في رفع كفاءة تقنيات معالجة المياه مثل التحفيز الضوئي، والأغشية النانوية، والأكسدة الكهروكيميائية، مما يسهم في إزالة الملوثات بكفاءة عالية وتوفير مياه أكثر نظافة وأمانًا (Ahmeda et al., 2017).

وفي قطاع الطاقة، تتميز البنى النانوية بخواص غير تقليدية في نقل الحرارة وتخزينها وامتصاص الضوء، مما يجعلها عنصرًا أساسيًا في تطوير أنظمة الطاقة الحديثة وإدارة الحرارة.

كما تتيح البنى النانوية تحسين خصائص التحويل الحراري الكهربائي للمساهمة في إنتاج الطاقة وتحويلها بكفاءة أكبر (Zhao et al., 2018).

وأخيرًا، تُعد تقنية النانو ركيزة أساسية في تطور الحوسبة والإلكترونيات الحديثة، إذ مكّنت من تصغير المكونات الإلكترونية وتطوير ترانزستورات أصغر وأسرع وأقل استهلاكًا للطاقة، إضافةً إلى تصنيع ذواكر عالية الكثافة ومعالجات قوية تعتمد على هياكل نانوية. وبفضل هذه التقنيات، أصبح تطوير الأجهزة الصغيرة مثل الهواتف الذكية والأجهزة القابلة للارتداء ممكنًا، كما ساعدت النانو في تحسين أنظمة التبريد داخل المعالجات لرفع كفاءتها (Biagetti et al., 2019).

# الفصل الثالث

المواد وطرائق العمل

Materials and

Methods

## 3. المواد وطرائق العمل Material and Methods :

## 1.3 المواد والاجهزة المستخدمة :

## 1.1.3 الاجهزة المستخدمة والمستلزمات :

ت	اسم الجهاز	الشركة المصنعة	المنشأ
1	Sensitive Balance الميزان الحساس	Kem-ABC220-4	المانيا
2	Water distillatory جهاز التقطير	GFR-2001	المانيا
3	Magnetic Stirrer المحرك المغناطيسي	Hermle Z 307	المانيا
4	Centrifuge جهاز الطرد المركزي	Hermle Z 307	المانيا
5	Electric Oven الفرن الكهربائي	Memert –UN55	المانيا
6	Petri Dishes اطباق بتري	Bio Zek medical	هولندا
7	Test tubes انابيب اختبار	ALS	كندا
8	الماصة الالكترونية Electronic Pipette	Raini	الولايات المتحدة الأمريكية
9	مقياس الرقم الهيدروجيني PH meter	Hermle Z 307	سنغافورا
10	Vortex مازج	Bionex- VM-300	كوريا
11	X-ray جهاز حيود الاشعة السينية diffraction	Philips-PW1730	هولندا
12	المجهر الالكتروني الماسح FESEM	TESCAN	جمهورية التشيك
13	مطياف الاشعة تحت الحمراء (FTIR)	Shimadzu	اليابان
14	مطيافية ضوئي مرئي وفوق بنفسجي UV/Vis	Maufacturer-UV-Vis 6405	بريطانيا
15	الحاضنة Incubator	Binder	المانيا
16	كابينه زرع Inoculation	BIOBASE	الولايات المتحدة الأمريكية

المنشأ	الشركة المصنعة	اسم الجهاز	ت
	Brand-W	Cork borer الثاقب الفليني	17
كوريا	Bio neer	Epindroff ابندروف	18
بريطانيا	Malvern	قياس التشتت الضوئي الديناميكي (DLS) وجهد زيتا	19
الصين	CORONA AMD	مطحنة كهربائية (Electric Grinder)	20
ألمانيا	Systec	الأوتوكليف (Autoclave)	21
الصين	Haier Biomedica	الثلاجة (Laboratory Refrigerator)	22

## 2.1.3 المواد الكيميائية المستخدمة

الشركة المجهزة	المادة الكيميائية	ت
SRL	Sodium Hydroxid هيدروكسيد الصوديوم	1
USA	Mueller Hinton ager وسط مولر هنتون	2
<b>HiMedia Laboratories</b>	Nutrient Broth المرق المغذي	3
MSB Chemical Limited	Ethanol Absolute الايثانول	4
SRL	Zinc nitrate نترات الزنك	5
Gibco – Thermo Fisher Scientific	وسط دولبيكو المعدل عالي الغلوكوز (DMEM) (High Glucose)	6
Gibco – Thermo Fisher Scientific	المصل الجنيني البقري (FBS)	7
Sigma-Aldrich	( MTT ) Tetrazolium salt assay	8

الشركة المصنعة	المادة الكيميائية	ت
Sigma-Aldrich	(DPPH)	9
Gibco – Thermo Fisher Scientific	مضاد البنسلين-ستربتومييسين – Penicillin) ( Streptomycin)	10
Sigma-Aldrich	المحلول المنظم الفوسفات (PBS)	11
Sigma-Aldrich	ثنائي ميثيل السلفوكسيد (DMSO)	12
Sigma-Aldrich	الميثانول (Methanol)	13
Sigma-Aldrich	حمض الأسكوربيك (Ascorbic Acid)	14
Merck, Germany	هيدروكسيد البوتاسيوم ( Potassium ) (hydroxide, KOH)	15
Sigma-Aldrich, USA	كلوريد الحديدك ( Ferric chloride, FeCl <sub>3</sub> )	16
Merck, Germany	أنهيدريد الخل (Acetic anhydride)	17
BDH, UK	الكلوروفورم (Chloroform)	18
Merck, Germany	حمض الكبريتيك المركز ( Concentrated ) (sulfuric acid, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	19
Sigma-Aldrich, USA	هيدروكسيد الأمونيوم ( Ammonium ) (hydroxide, NH <sub>4</sub> OH)	20
BDH, UK	حمض الهيدروكلوريك ( Hydrochloric acid, ) (HCl)	21
Sigma-Aldrich, USA	كاشف ماير (Mayer's reagent)	22
Sigma-Aldrich, USA	كاشف دراغندورف ( Dragendorff's ) (reagent)	23

## 2.3 طرائق العمل Methods

## 1-2-3 استخلاص اليوكالبتوس

تم جمع أوراق اليوكالبتوس من متنزة الشبانة في قضاء العمارة- العراق ، وتم تصنيف النبات اليوكالبتوس كامالدولنسيس *Eucalyptus camaldulensis* من قبل مختصي النبات في جامعة ميسان – كلية الزراعة – قسم الوقاية النباتية .

حضر مستخلص أوراق اليوكالبتوس اعتمادا على الطريقة المذكورة من قبل (Alyamani et al., 2021) . مع بعض التحويرات حيث جمعت أوراق اليوكالبتوس وغسلت بالماء الاعتيادي ثم بالماء المقطر . بعد ذلك تركت العينات لتجف في الظل لمدة أربعة أيام . ثم طحنت الأوراق المجففة في خلاط كهربائي نظيف للحصول على مسحوق ناعم .

A

B

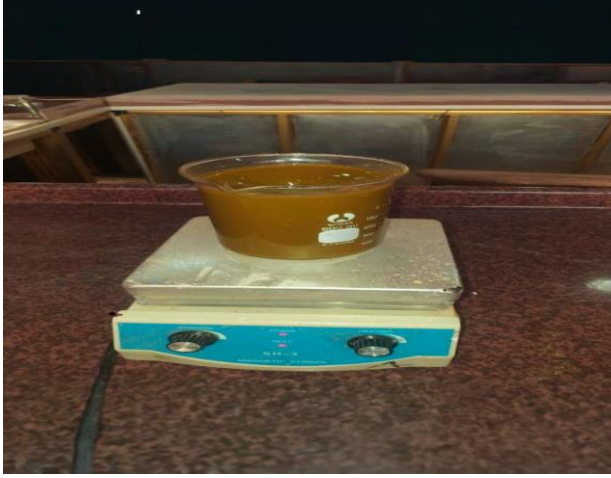


الشكل ( 1-3 ) اوراق نبات اليوكالبتوس A قبل التجفيف B مسحوق الأوراق

اضيف 500 مل من ماء منزوع الأيونات الى 50 غراما من مسحوق اليوكالبتوس ، ثم سخن المزيج لمدة 45 دقيقة عند  $80^{\circ}C$  مع التحريك باستخدام محرك مغناطيسي .

بعدها رشح المستخلص باستخدام ورق ترشيح واتمان A1 بعد تبريدة بدرجة حرارة الغرفة ، وخرن المستخلص عند  $4^{\circ}C$  لإجراء التحاليل اللاحقة .

A



B



شكل ( 2-3 ) A المستخلص بعد التسخين B بداية عملية تحضير مستخلص اليوكالبتوس

### 2.2.3 الدراسة الكيميائية لمستخلص اليوكالبتوس

تم الكشف عن وجود مركبات الايض الثانوي الفعالة بيولوجيا في مستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي حسب الطرق الكيميائية التي ذكرها (Harborne, 1998).

#### 1.2.2.3 الكشف عن الفلافونويدات ( Flavonoids )

تمت معاملة 1 مل من المستخلص المائي مع 2 مل من هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) . والاس الهيدروجيني 12 دلّ ظهور لون أصفر مائل إلى البرتقالي بشكل واضح على وجود الفلافونويدات.

#### 2.2.2.3 الكشف عن التانينات ( Tannins )

لتقدير محتوى التانينات، حُفّف المستخلص المائي عشرة أضعاف باستخدام الماء المقطر ثم رُشّح بواسطة ورق الترشيح. عولج الراشح الناتج بمحلول كلوريد الحديدك المائي بتركيز 1% ( $FeCl_3$ ). ان تحوّل اللون إلى أزرق-أسود أو أخضر مائل إلى البني دلالة إيجابية على وجود التانينات.

#### 3.2.2.3 الكشف عن الصابونينات ( Saponins )

تم تقييم وجود الصابونينات عن طريق تخفيف المستخلص بالماء المقطر 10:1 وتعريض المزيج لرجّ ميكانيكي قوي لمدة 15 دقيقة. بعدُ تكوّن طبقة رغوية مستقرة ومستمرة ذات بنية قرص العسل نتيجة إيجابية.

### 4.2.2.3 الكشف عن التربينويدات ( Terpenoids )

خُط 4 مل من المستخلص مع محلول مكوّن من أنهيدريد الخل والكلوروفورم بنسبة (1:1). بعد ذلك، أضيف حمض الكبريتيك المركز ( $H_2SO_4$ ) بحذر على جدار أنبوب الاختبار. دلّ تكوّن حلقة بنية حمرة أو بنفسجية عند منطقة التماس على وجود التربينويدات.

### 5.2.2.3 الكشف عن الكومارينات ( Coumarins )

وُضعت بقع من مزيج مكوّن من 5 مل من المستخلص المائي و0.5 مل من هيدروكسيد الأمونيوم بتركيز 10% ( $NH_4OH$ ) على ورق ترشيح. ثم فُحصت البقع تحت الأشعة فوق البنفسجية عند طول موجي 365 نانومتر، حيث دلّ ظهور فلورة قوية على وجود مشتقات الكومارين.

### 6.2.2.3 الكشف عن القلويدات ( Alkaloids )

تم تسخين 10 غم من مسحوق أوراق اليوكالبتوس الجافة مع 50 مل من الماء المقطر المحمض ب 4% HCl وذلك لتحويل القلويدات إلى أملاح ذائبة أخذ الراشح وترك ليبرد ثم تم الكشف عن القلويدات بطريقتين ' الأولى بإضافة بضع قطرات من كاشف ماير (يوديد الزئبق واليوتاسيوم ) وأن تكون راسب أبيض أو أصفر يدل على وجود القلويدات . أما الطريقة الثانية فتمت بإضافة 1 مل من كاشف دراغندروف ( يوديد البزموت واليوتاسيوم ) إلى 2 مل من الراشح وان تكون راسب برتقالي محمر يدل عن وجود القلويدات .

### 3-2-3 تحضير الجسيمات النانوية (Nanoparticles Preparation)

تم تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية حسب الطريقة المذكورة من قبل (Shakorfo et al., 2023) . مع إجراء بعض التحويلات. أذيب 1.16 غرام من نترات الزنك في 100 مل من الماء منزوع الأيونات، والتسخين على درجة حرارة ( $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) لمدة عشر دقائق مع التحريك المستمر باستخدام السخان المغناطيسي (Magnetic Stirrer Hotplate) لضمان الذوبان الكامل، ثم ترشيحه باستخدام ورق ترشيح بقطر  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  للحصول على محلول خالي من الشوائب . تم تسخين المحلول على درجة حرارة  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  باستخدام السخان المغناطيسي وبعد مرور 15 دقيقة تمت اضافة 100 مل من المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس المحضر مسبقا في الفقرة ( 1-2-3 ) تدريجيا مع الاستمرار بالتحريك لضمان تجانس المزيج مع تعديل الاس الهيدروجيني pH الى 12 باستخدام NaOH M1 , ويعتبر تغير لون المزيج مع ظهور راسب أصفر دلالة على تكوين جسيمات الزنك النانوية ثم فصل الراسب المتكون في جهاز الطرد المركزي 8000 دورة في الدقيقة لمدة 15 دقيقة ، ثم غسل الراسب ثلاث مرات بواسطة الماء منزوع الأيونات ثم الايثانول 70% .

A



B



شكل ( 3-3 ) مراحل تكوين جسيمات اكسيد الزنك النانوية باستخدام المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس . ' ( A ) تغير اللون بعد فترة من التفاعل مما يدل على تكوين الجسيمات النانوية .

( B ) بداية التفاعل

A



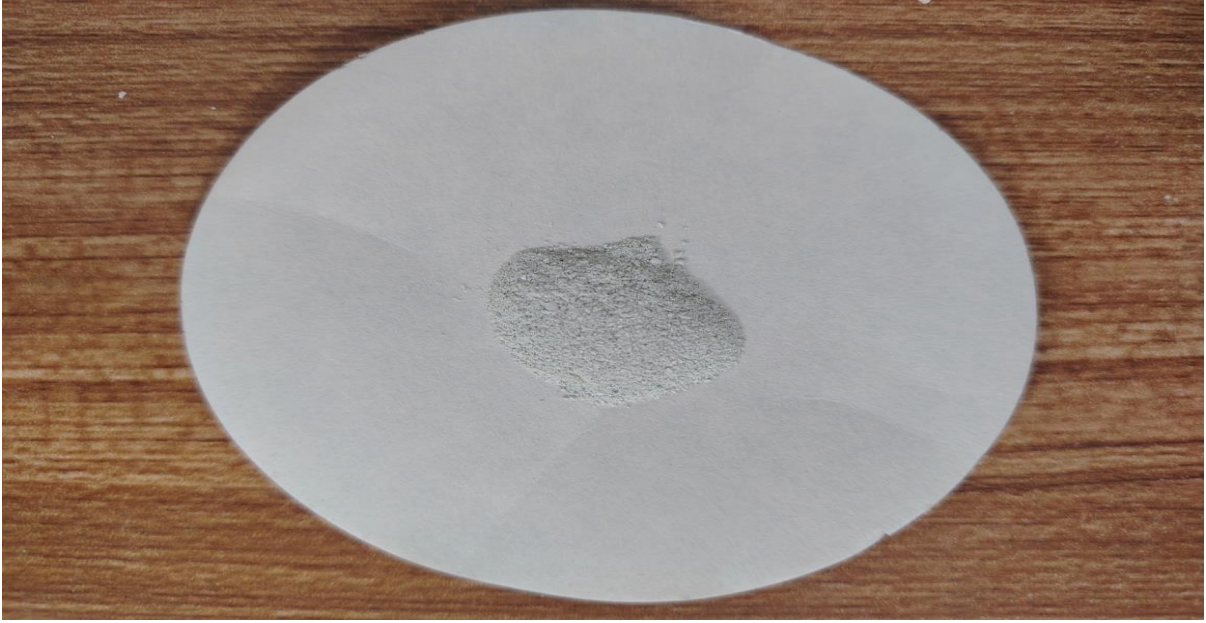
B



شكل ( 4-3 ) . A الراسب الناتج من جسيمات اوكسيد الزنك النانوية بعد الغسل باستخدام الماء منزوع الايونات والايثانول . B عملية فصل الراسب الناتج من تحضير اكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس

ثم جُفف الراسب في فرن بدرجة حرارة  $50^{\circ}\text{C}$  لمدة 16 ساعة للحصول على جسيمات جافة ، ثم جرى تكليس المادة المتكونة باستخدام فرن ترميد عند  $400^{\circ}\text{C}$  لمدة ساعتين لغرض التخلص من المواد العضوية

المتبقية والحصول على جسيمات نقية. وظهر الناتج بلون أبيض يميل إلى الأصفر الفاتح، وهو ما يدل على تكوين جسيمات أكسيد الزنك النانوية بشكل كامل.



الشكل ( 3-5 ) مسحوق جسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضر باستخدام مستخلص اليوكالبتوس بعد التكليل والطحن .

### 3.3 توصيف الجسيمات النانوية

#### 1.3.3 تحليل طيف الامتصاصية للأشعة فوق البنفسجية – المرئية ( UV-Vis )

تم إجراء تحليل طيف الامتصاص للأشعة فوق البنفسجية-المرئية لمستخلص اليوكالبتوس ولجسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضرة باستخدام جهاز UV-Vis Spectrophotometer ضمن المدى الطيفي (250–650 nm) . جرى تجهيز العينة من خلال تخفيف كمية مناسبة من محلول الجسيمات النانوية (1.5 mg) ويذاب في 10 مل من الماء المقطر، ثم وضع المحلول في خلايا كوارتز معيارية لإجراء القياسات مع استخدام الماء المقطر كعينة مرجعية (Blank) . كما تم قياس طيف الامتصاص لمستخلص اليوكالبتوس بعد تخفيفه بالماء المقطر ضمن نفس المدى الطيفي وباستخدام الخلايا نفسها، مع اعتماد الماء المقطر كمرجع طيفي في جميع القياسات. سُجِّل الطيف الامتصاصي لكل من الجسيمات النانوية والمستخلص النباتي للمقارنة .

#### 2.3.3 تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء FTIR

استخدم جهاز FTIR من نوع Shimadzu – Japan لفحص العينات ضمن المجال الموجي 400–4000 سم<sup>-1</sup> بهدف تحديد المجاميع الفعالة الموجودة في المركبات الكيميائية لكل من مستخلص النبات

لوحده وكذلك في جسيمات أكسيد الزنك النانوية، تم خلط (1-2) mg من العينة مع 100 mg من بروميد البوتاسيوم عالي النقاوة . وبعد ذلك تم ضغط المزيج لتكون قرص شفاف وتم ذلك عند درجة حرارة الغرفة

### 3.3.3 حيود الأشعة السينية ( XRD )

استُخدم تحليل حيود الأشعة السينية لدراسة التركيب البلوري لجسيمات أكسيد الزنك النانوية. حيث تم تسليط اشعة X التي ينتجها انبوب الأشعة المهبطية داخل الجهاز ومن خلال نمط حيود الأشعة يتم تحديد التركيب البلوري للجسيمات . وقد تم الفحص عند درجة حرارة الغرفة وبجهد تشغيل 40 kV وتيار 30 mA.

يمكن حساب حجم البلورات باستخدام معادلة ديبي-شيرر:

$$D = (k \times \lambda) / (\beta \times \cos\theta)$$

$$D = \text{متوسط حجم البلورة}$$

$$\beta = \text{توسّع الخط بوحدة الراديان (العرض عند منتصف الارتفاع)}$$

$$\theta = \text{زاوية براج المأخوذة من قيمة } 2\theta \text{ عند أعلى قمة}$$

$$\lambda = \text{طول موجة أشعة CuK}\alpha$$

$$k = \text{ثابت شيرر ويساوي } 0.9 \text{ (Scherrer, 1918)} .$$

### 4.3.3 المجهر الإلكتروني الماسح FESEM

تم إجراء فحص المجهر الإلكتروني الماسح لدراسة مورفولوجيا الجسيمات النانوية، وتحديد حجم الجسيمات باستخدام جهد تسليط مقداره 25 kV ، مع استعمال كاشف الإلكترونات الثانوية ، والمسافة البؤرية 8.4 mm ، في حين بلغ مقياس الصورة 100 nm . استخدام قوة تكبير مقدارها 20000× ، والتي تُمكن من ملاحظة توزيع الجسيمات وشكلها السطحي بدقة عالية. وحجم الحقل المجهرى عند هذه الدرجة من التكبير حوالي 5-6 μm .

### 5.3.3 تحليل تشتت الضوء الديناميكي DLS وجهد الزيتا (DLS and Zeta Potential)

تم فحص جسيمات ZnO النانوية من حيث الحجم والشحنة السطحية باستخدام جهاز محلل حجم الجسيمات (Malvern, UK) من خلال تقنية تشتت الضوء الديناميكي (DLS) وجهد الزيتا عند 25 °م وزاوية تشتت 173 °، بعد تشتيت العينات بالموجات فوق الصوتية. (Bhattacharjee, 2016).

### 4.3 التقييم البيولوجي للجسيمات اكسيد الزنك النانوية والمستخلص اليوكالبتوس

#### 1.4.3 اختبار السمية الخلوية (Cytotoxicity Assay)

اتبعت الطريقة التي وردت في (International Organization for Standardization, 2009) مع بعض التعديلات .

تم استخدام خط الخلايا الليفية لجلد الإنسان (ATCC = SCRC-1042) HFF-2 في تقييم تأثير السمية الخلوية للمواد قيد الدراسة، المجهز من بنك الخلايا في معهد باستور الإيراني (طهران، إيران). زُرعت الخلايا في وسط DMEM عالي الغلوكوز المضاف إليه 10% من المصل الجنيني البقري (FBS) و1% من مضادات البنسلين-ستربتومييسين (Gibco) ، ثم حُضنت عند 37 °C ضمن بيئة رطبة تحتوي على 5% CO<sub>2</sub> للمحافظة على الظروف المناسبة للنمو.

لتقييم تأثير جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) والمستخلص النباتي على حيوية الخلايا، تمت زراعة الخلايا بكثافة 1.2 × 10<sup>4</sup> خلية/حفرة في صفائح مكوّنة من 96 حفرة، ثم تُركت لتنمو طوال الليل. وبعد 24 ساعة من الحضانة، عُرضت الخلايا لتراكيز مختلفة من المواد المختبرة لمدة 6 ساعات .

بعد ذلك، أُزيل الوسط المعالج وُغسلت الخلايا باستخدام محلول PBS لإزالة أي بقايا غير مرغوبة، ثم أُضيف وسط جديد وطازج واستمرت الخلايا في الحضانة لمدة 24 ساعة إضافية.

لاحقاً، تمت إضافة 20 µL من محلول MTT بتركيز 5 mg/mL إلى كل بئر، وحضنت الأطباق لمدة 4 ساعات في الظلام حتى تتكون بلورات الفورمازان. ثم أُضيف 100 µL من مادة DMSO لإذابة البلورات، وتم قياس الامتصاصية عند 570 nm لتحديد نسبة حيوية الخلايا، حيث تعكس زيادة الامتصاصية ارتفاع معدل بقاء الخلايا.

### 2.4.3 تقييم الخصائص المضادة للأكسدة (Antioxidant Activity Evaluation).

اتبعت الطريقة التي ذكرها (Brand-Williams et al., 1995). مع بعض التعديلات

تم تحضير محلول بتركيز 160 ميكروغرام / مل من ال DPPH في الميثانول من خلال اذابة 40 ملغم من ال DPPH في دورق حجمي سعة 250 مل ثم اكمال الحجم بالميثانول. بالإضافة إلى ذلك تم تحضير محلول قياس من حمض الأسكوربيك بتركيز 0.75 mg/mL في الماء المقطر.

تم انشاء منحي معياري باستخدام خمس تراكيز مختلفة من المحلول القياسي لحمض الأسكوربيك (0.025، 0.0125، 0.00625، 0.00313، 0.00156 mg/mL)

ثم وضع 1 مل من محلول العينة أو المعيار في انبوب اختبار يحتوي على 3 mL من الماء المقطر، ثم اضيف 2 mL من محلول ال DPPH الميثانولي بتركيز 160 µg/mL الى المزيج، وحضن عند درجة حرارة الغرفة في الظلام لمدة ساعة واحدة.

تم قياس الامتصاصية عند 514nm. حسبت قدرة الاصطياد باستخدام المعادلة التالية .

نسبة اصطياد جذور ال DPPH % = { ( امتصاصية الضبط – امتصاصية العينة ) / امتصاصية الضبط } × 100

حيث ان امتصاصية الضبط هي امتصاصية العينة الضابطة التي تحتوي جميع المواد التفاعلية ماعدا العينة وامتصاصية العينة هي امتصاصية العينة المختبرة .

تم انشاء منحي معايرة من المحاليل القياسية لحمض الاسكوربيك بتمثيل نسبة الاصطياد % مقابل تركيز حمض الأسكوربيك القياسي .

### 3.4.3 الفعالية المضادة للبكتريا Antibacterial activity

اتبعت الطريقة التي وصفها (Alzubaidi et al., 2023) .

#### 1.3.4.3 عزلات البكتيريا

جمعت عزلات البكتريا المرضية السالبة لصبغة كرام *Escherichia coli* ، والبكتريا الموجبة لصبغة كرام *Staphylococcus aureus*. من المرضى الوافدين الى مستشفى الطفل والولادة الموجود في محافظة ميسان، وشخصت العزلات مزرعيا ومجهريا وكيميائيا حسب الطرق الموصوفة من قبل

( AOAC ) . وتم تأكيد التشخيص في جهاز VITEK-2 compact. ثم حفظت العزلات في الوسط المغذي السائل على درجة حرارة °C 4 لحين الاستخدام .

### 2.3.4.3 تحضير وسط مولر هنتون

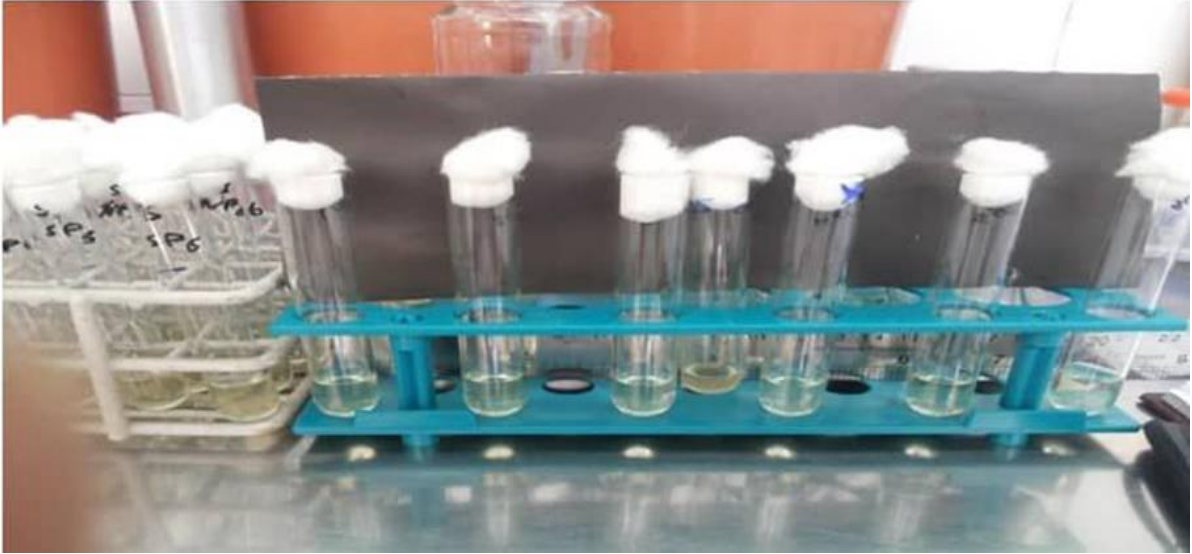
تم إعداد الوسط الزراعي مولر هنتون وفقاً لتوجيهات الشركة المنتجة. تم تعقيمها في جهاز الأوتوكليف عند درجة حرارة °C 121 و بضغط 1.5 بار لمدة 15 دقيقة. بعد ذلك، ترك الوسط ليبرد وصب في أطباق معقمة.

### 3.3.4.3 تنشيط البكتيريا

تم تنشيط العزلات في وسط مغذي سائل وتم وضعها في الحضانة عند °C 37 درجة مئوية لمدة 24 ساعة. بعد ذلك تم تحضير معلق بكتيري بتركيز McFarland 0.5 والذي يعادل  $1.5 \times 10^8$  وحدة تشكيل مستعمرة لكل مليلتر.

### 4.3.4.3 اختبار نشاط الجسيمات النانوية والمستخلص النباتي

حُضِرَت تراكيز مختلفة لكلٍ من جسيمات أكسيد الزنك النانوية (Zn NPs) والمستخلص النباتي، شملت (0.5، 1، 2، 4، 8، 16، 32، 64، 125، 250 µg/mL). تم تقييم النشاط المضاد للبكتيريا لكل منهما تجاه البكتيريا السالبة والموجبة لصبغة غرام عن طريق قياس قطر منطقة التثبيط، بعد نشر المعلق البكتيري المُنشَّط مسبقاً على سطح وسط مولر-هنتون المُحضَّر في الفقرة ( 2-3-4-3 ) ، ثم تم حفر في الوسط باستخدام ثاقب معقم بقطر 5 ملم، وُضع في كل حفرة أحد التراكيز المحددة، وبواقع ثلاث مكررات لكل تركيز. بعد ذلك، حُضِنَت الأطباق في الحاضنة لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة °C 37 ، وبعد انتهاء الوقت تم قياس قطر الهالة الخالية من النمو البكتيري حول الحفر.



شكل (3-6): صورة توضح تحضير سلسلة من التراكيز المتدرجة لجسيمات أكسيد الزنك النانوية والمستخلص النباتي في أنابيب اختبار معقمة .

### 5.3 التحليل الإحصائي

تم تحليل البيانات إحصائياً باستخدام البرنامج الإحصائي SPSS إصدار 28، واعتمد التصميم العشوائي الكامل (C.R.D) في تحليل نتائج الفعالية المضادة للبكتيريا لكل من جسيمات الزنك النانوية ZnO NPs والمستخلص النباتي ضد بكتيريا *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* . تم حساب أقل فرق معنوي (LSD) عند مستوى دلالة ( $P < 0.05$ ) ، مما يشير إلى وجود فروق معنوية بين التراكيز المختلفة.

الفصل الرابع  
النتائج والمناقشة

Results and  
discussion

## 4 . النتائج والمناقشة Results and Discussion

## 1.4 تصنيف اوراق اليوكالبتوس

جمعت أوراق اليوكالبتوس من اشجار اليوكالبتوس الموجودة في منتزة الشبانة / محافظة ميسان وتم تصنيف الشجرة من قبل خبير في جامعة ميسان / كلية الزراعة / قسم وقاية النبات بالاعتماد على الوصف المورفولوجي للشجرة والأوراق ( المياحي واخرون 2016 ) . شجرة اليوكالبتوس شجرة معمرة سريعة النمو يصل ارتفاعها إلى أكثر من 40 متر ذات سيقان كبيرة بيضاء الى رمادية أوراقها طويلة ورفيعة مغطاة بغدد زيتية تعطىها رائحة مميزة . موطنها الأصلي استراليا وانتشرت في معظم المناطق المعتدلة حول العالم .

الجدول 1 تصنيف شجرة اليوكالبتوس

المرتبة	التصنيف
المملكة Kingdom	النباتات Plants
الشعبة Division	النباتات الوعائية Vascular Plants
الصف Class	البذريات Spermatophyta
الرتبة Order	الاسيات Myrtaceae
الفصيلة Family	الفصيلة الاسية Myrtaceae
الجنس Genus	اليوكالبتوس Eucalyptus
النوع Species	الاحمر الهندي Indian Red Eucalyptus

A

B



الشكل ( 1.4 ) A شجرة اليوكالبتوس B يمثل صورة لورقة اليوكالبتوس

#### 4. 2 تحضير مستخلص أوراق اليوكالبتوس

حضر المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس بالتسخين على درجة حرارة 80°م لمدة 45 دقيقة ولوحظ تغيير لون المزيج من الأخضر إلى البني المصفر بعد التسخين والترشيح، وهو دليل بصري على انتقال المركبات الفعالة من المادة النباتية إلى الوسط المائي ( شكل 2-4 ) .

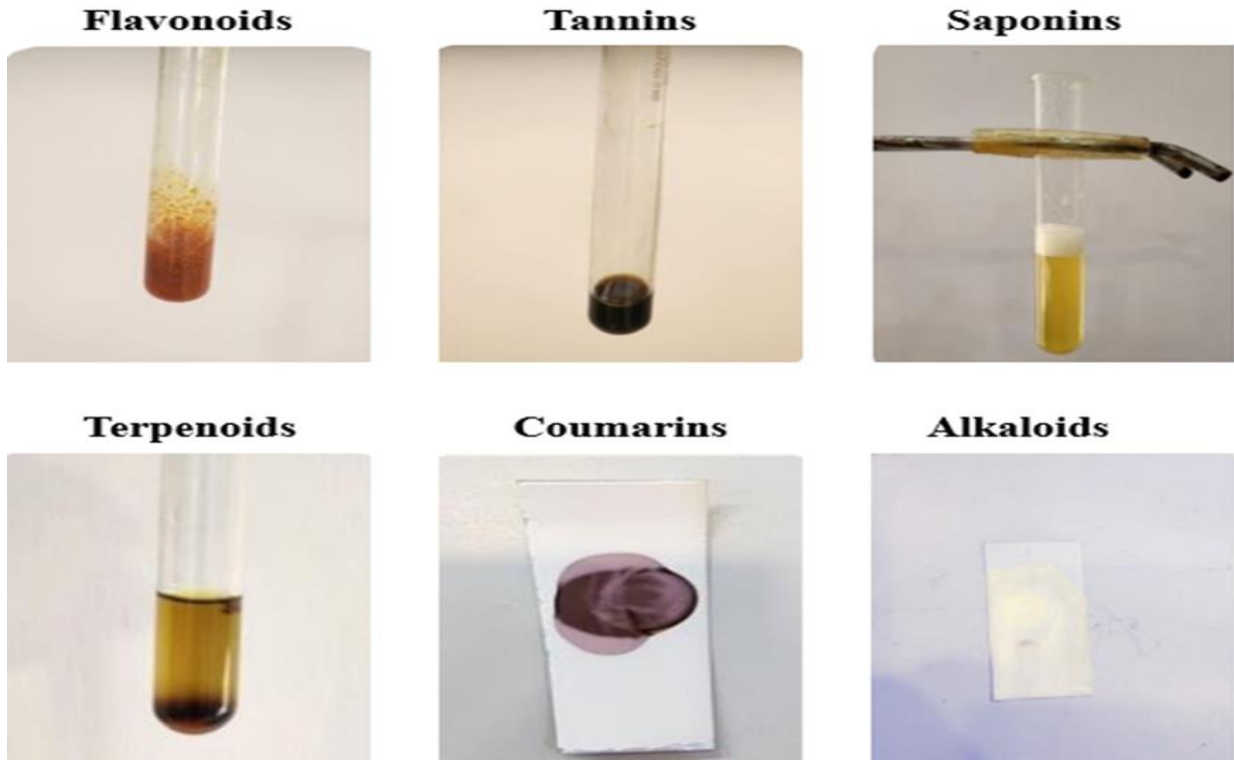


الشكل (2-4): المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس

وهذا يتفق مع نتائج الدراسات السابقة ، إذ يُعدّ تغيير لون المستخلص من الأخضر إلى البني المصفر بعد التسخين والترشيح مؤشراً واضحاً على نجاح عملية الاستخلاص وانتقال المركبات الفعالة من المادة النباتية إلى الوسط المائي. ويُعزى هذا التغيير اللوني إلى تحرر المركبات الفينولية والفلافونويدات والتربينات الموجودة في أوراق اليوكالبتوس، والتي تلعب دوراً مهماً في عمليات التخليق الأخضر للجسيمات النانوية بوصفها عوامل مختزلة ومثبّنة. كما يؤكد تجانس المستخلص الناتج كفاءته وإمكانية اعتماده في المراحل اللاحقة من الدراسة، وهو ما يتوافق مع ما أوردته الدراسات الحديثة في مجال التخليق الأخضر باستخدام المستخلصات النباتية ( Nanomaterials, 2023, Singh et al2018).

#### 4.3 الدراسة الكيميائية لبعض المكونات الأساسية في أوراق اليوكالبتوس

تم الكشف عن بعض مركبات الايض الثانوي الفعالة وظيفيا في مستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي بالطرق الكيمياوية ( شكل 4-4 ) .



الشكل (3-4): الكشف عن مركبات الايض الثانوي في مستخلص اوراق اليوكالبتوس المائي .

الجدول ( 2 ) المكونات الاساسية لمستخلص اوراق اليوكالبتوس المائي

المركبات الوظيفية	النتيجة المتوقعة	الدلالة
الفلافونويدات	( + )	تكوّن لون أصفر مائل إلى البرتقالي عند إضافة KOH
التانينات	( + )	ظهور لون أزرق-أسود
الصابونينات	( + )	تكوّن رغوة مستقرة ذات بنية قرص العسل (تستمر لأكثر من 15 دقيقة)
التربينويدات	( + )	ظهور حلقة بنية محمرة أو بنفسجية عند منطقة التماس .
الكومارينات	( + )	فلورة زرقاء أو خضراء قوية تحت الأشعة فوق البنفسجية (365 nm)
القلويدات	( - )	عدم ظهور راسب كريمي (ماير) أو برتقالي-أحمر (دراغندورف)

نلاحظ من الجدول 2 أن المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس يحتوي على كل من مركبات الايض الثانوي الفلافونويدات ، التانينات ، الصابونينات ، التربينويدات ، الكومارينات ، بينما كان خاليا من القلويدات وهذا يتفق مع ما ذكره (Oueldkiar et al., 2023) . بأن المستخلصات المائية لاوراق اليوكالبتوس لا تحتوي على القلويدات .

أن وجود مركبات الايض الثانوي في مستخلص اوراق اليوكالبتوس المائي تجعله ملائما للاستخدام في تحضير الجسيمات الزنك النانوية حيث تعمل هذه المركبات كعوامل اختزال وتغليف للجسيمات النانوية ( Ahmed,etal . 2020 ) .

#### 4.4 تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس .

أظهرت نتائج هذه الدراسة نجاح تحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس (*Eucalyptus camaldulensis*) بوصفه عامل اختزال حيوي وفعال. لوحظ أثناء عملية التحضير حدوث تغير تدريجي في لون المزيج المتكون من نترات الزنك ومستخلص أوراق اليوكالبتوس من عديم اللون إلى بني مصفر فاتح، ويُعد هذا التغير دليلاً أولياً على تكوين جسيمات أكسيد الزنك النانوية، نتيجة لاختزال أيونات الزنك بواسطة المركبات الحيوية الموجودة في المستخلص النباتي.



شكل (4-4): المزيج التفاعلي أثناء التحضير الحيوي لجسيمات أكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس.

**4-5 توصيف جسيمات اكسيد الزنك النانوية المحضرة باستخدام المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس .**

#### **1.5.4 فحص الاشعة فوق البنفسجية – المرئية UV-Vis**

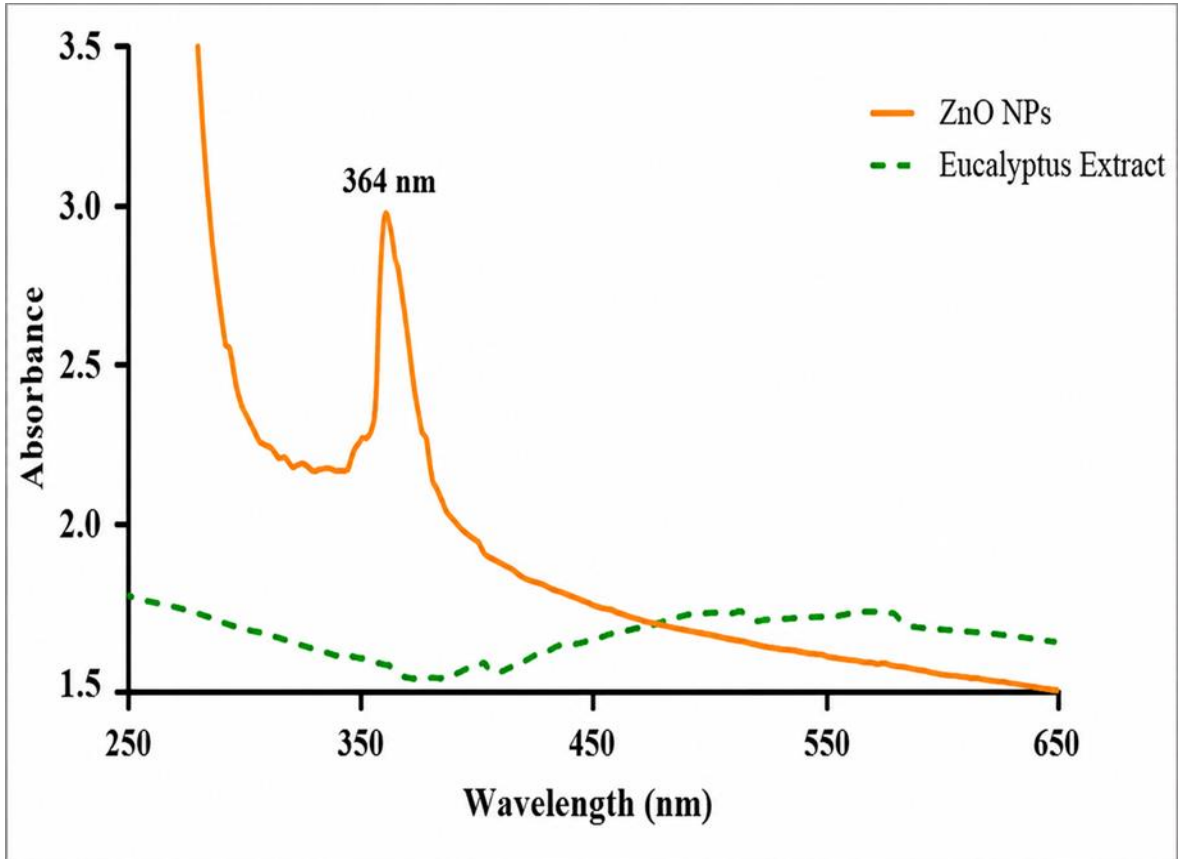
اظهر طيف الامتصاص لجسيمات الزنك النانوية المحضرة باستعمال مستخلص أوراق اليوكالبتوس ظهور ذروة امتصاص واضحة عند الطول الموجي 364 nm كما يبينه الشكل (4-5) , ويمثل ظهور هذه الذروة برهاناً على تشكل جسيمات نانوية من ZnO , حيث تتركز ساعات الامتصاص القياسية لأكسيد الزنك النانوية عادة في المجال 350-380 nm . ويلحظ أن قوة الامتصاص للجسيمات النانوية أعلى من قوة امتصاص المستخلص النباتي , وهذا يدل على وقوع تحولات الكترونية مستمدة من البنية التكوينية للجسيمات النانوية .

كما يدل موقع القمة عند 364 nm تشكل جسيمات نانوية ذات بعد ضئيل نوعاً ما , حيث يرتبط التحول نحو الأطوال الموجية الأدنى بتحضير ابعاد الجسيمات (Bera et al., 2010) .

لم يظهر المستخلص النباتي أية ذروة بارزة في هذا المجال ما يدعم أن الامتصاص المسجل يرجع إلى تكون جسيمات ZnO النانوية وليس إلى مواد اليوكالبتوس .

تتوافق النتائج الحالية مع ماذكرة ( Rai et al , 2024 ) الذين سجلوا قمة امتصاص عند 365 nm لجسيمات ZnO النانوية المحضرة بطرق نباتية .

كذلك بينت دراسة ( Baeziniy & Azeezoz . 2020 ) أن الطيف في هذا المجال يمثل تكون اكسيد الزنك النانوي بنقاوة جيدة مما يؤكد نجاح عملية التخليق الحيوي بواسطة مستخلص اليوكالبتوس .



شكل ( 5.4 ) يوضح طيف UV-Vis لجسيمات النانوية مقارنة بطيف مستخلص اليوكالبتوس

تُستخدم تقنية UV-Vis لتحليل عدد من الخصائص المهمة للجسيمات النانوية، من بينها كيمياء السطح، والخصائص البصرية، وحجم الجسيمات، وشكلها، إضافة إلى ظاهرة إثارة رنين البلازما السطحي. وتتفق نتائج هذه الدراسة مع نتائج دراسات سابقة، إذ أظهرت جسيمات أكسيد الزنك النانوية المُحضَّرة باستخدام مستخلص بذور الكتان. قمة امتصاص عند 362 nm، مما يشير إلى امتلاكها طاقة ربط عالية عند درجة حرارة الغرفة (Pehlivanoglu et al. 2023). كما بيّنت دراسة أخرى (Singh et al., 2019) أن جسيمات أكسيد الزنك النانوية المصنعة حيويًا من مستخلص أوراق الكزبرة. أظهرت أعلى قمة امتصاص عند (364 nm) ويُعزى ذلك إلى ارتفاع طاقة ربط الإثارة عند هذا الطول الموجي.

وبناءً على ما تقدم، يمكن الاستنتاج أن الاختلاف في موضع قمة الامتصاص يعتمد على نوع المستخلص النباتي المستخدم وظروف التخليق، مما يؤثر بدوره في حجم الجسيمات النانوية وخصائصها البصرية، وما يؤكد كفاءة مستخلص أوراق اليوكالبتوس في التحضير الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك النانوية.

## 2.5.4 نتائج تحليل جهد الزيتا (Zeta Potential)

يُعد قياس جهد الزيتا من المؤشرات الأساسية لتقييم الاستقرار الغرواني للجسيمات النانوية المعلقة في الوسط المائي، إذ يعكس مقدار واتجاه الشحنة السطحية للجسيمات، وبالتالي قدرتها على التناثر فيما بينها ومنع ظاهرة التكتل أو التخثر.

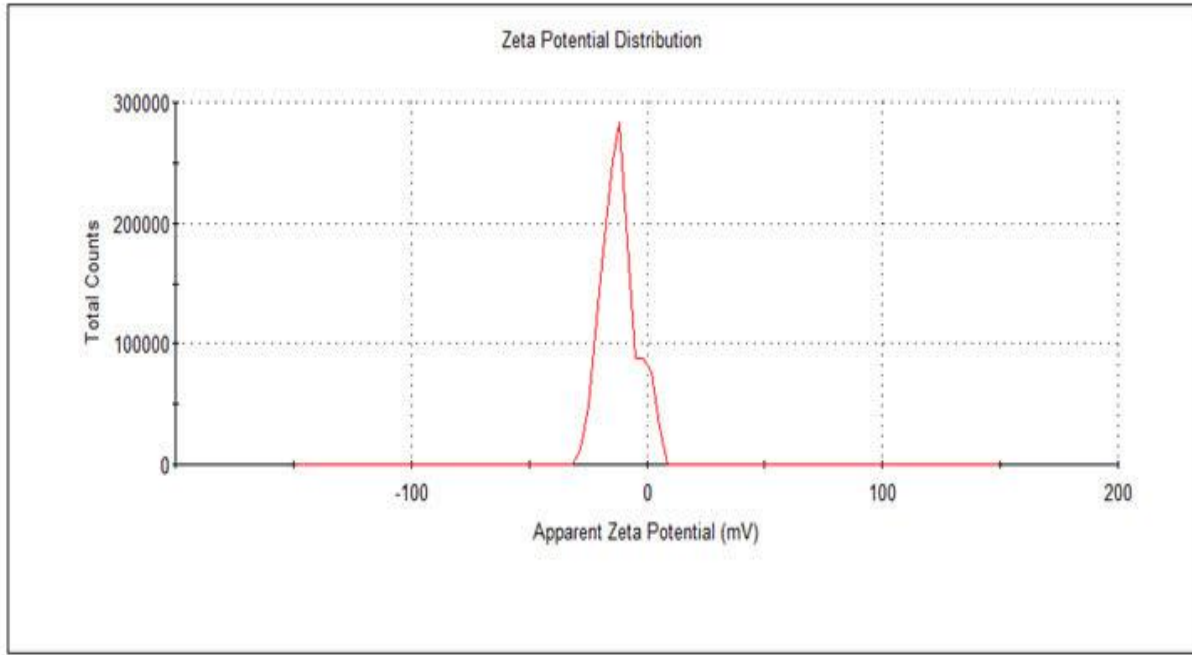
أظهرت نتائج تحليل جهد الزيتا للعينة الحالية قيمة مقدارها  $(-11.8) \text{ mV}$  مع انحراف معياري بلغ  $7.30 \text{ mV}$  وتقع هذه القيمة ضمن المدى الذي يدل على استقرار متوسط للجسيمات النانوية في الوسط المعلق. إذ تشير القيم المطلقة العالية لجهد الزيتا (أكبر من  $\pm 30 \text{ mV}$ ) عادةً إلى استقرار غرواني مرتفع ناتج عن قوة التناثر الكهروستاتيكي بين الجسيمات، في حين إن القيم القريبة من الصفر تعكس قابلية أعلى لحدوث التكتل نتيجة ضعف قوى التناثر.

كما يوضح الشكل (4-6) الخاص بتوزيع جهد الزيتا ظهور قمة رئيسية عند قيمة  $-14.0 \text{ mV}$ ، مما يشير إلى تجانس نسبي في الشحنة السطحية للجسيمات النانوية المتكونة. ويُعزى هذا السلوك إلى وجود المركبات الحيوية الفعالة في مستخلص أوراق اليوكالبتوس، التي تعمل كعوامل تثبيت سطحية، مما يساهم في تحسين الاستقرار الغرواني للجسيمات النانوية ومنع تجمعها بدرجة كبيرة.

تشير نسبة (منطقة جهد زيتا) التي بلغت  $80.6\%$  من إجمالي الجسيمات، ما يشير إلى تجانس نسبي في الشحنة السطحية لمعظم الجزيئات، كما ظهرت قمة فرعية بسيطة عند  $0.757 \text{ mV}$  بنسبة  $19.4\%$  ما يدل على وجود قسم ضئيل من الجزيئات يمتلك شحنة ضعيفة أو شبة متعادلة، وقد يرجح ذلك إلى اختلاف الحجم أو وجود بقايا بروتينات أو ملوثات من الوسط المحيط (Naito et al., 2018).

ولم يسجل أي قمة ثالثة مما يؤكد تجانس العينة بشكل عام. وبشكل عام فإن مدى جودة النتائج يعكس كفاءة القياس وغياب التشويش في قراءات الجهاز. كما إن قيمة الناقلية الكهربائية  $0.128$  ملي سمنز/سم تشير إلى أن الوسط يمتلك تركيزاً منخفضاً من الأملاح. وهو ما يعزز دقة قراءات جهد الزيتا نظراً لحساسية هذا المقياس لتغير القوة الأيونية للمحلول.

	Mean (mV)	Area (%)	St Dev (mV)
Zeta Potential (mV): -11.8	Peak 1: -14.0	80.6	5.40
Zeta Deviation (mV): 7.30	Peak 2: -0.757	19.4	3.32
Conductivity (mS/cm): 0.128	Peak 3: 0.00	0.0	0.00
Result quality : Good			



الشكل ( 6-4 ) قياس جهد زيتا لجسيمات الزنك النانوية المحضرة بالطريقة الخضراء .

وتتفق هذه النتائج مع نتائج (Bhattacharjee, 2016) الذي أشار إلى أن القيم السالبة المتوسطة للجهد الزيتا مثل تلك الواقعة بين -10 و-20 mV ترتبط غالبا بدرجة استقرار غرواني متوسط للانظمة النانوية كما أوضح البحث إلى أن ظهور توزيعات متعددة للجهد الزيتا كوجود قمة نانوية ذات شحنة منخفضة قد يعكس وجود جسيمات أو ملوثات ذات خصائص سطحية متباينة وهو يتوافق مع القمة النانوية المسجلة عند 0.757 mV في العينة الحالية.

كما تدعم نتائج هذه الدراسة ما أشار إليه ( Zainon & Azmi 2021 ) حيث اكدا أن قيمة الجهد الزيتا تعد عاملا جوهريا في تحديد استقرار الجسيمات النانوية المائية .

وإن القيم التي تقع بين -10 و-20 mV \ تدل على استقرار متوسط . بينما القيم الاكثر سلبية من -30 mV ترتبط باستقرار مرتفع نتيجة قوى التنافر القوية بين الجزيئات .

وقد بين أن الجسيمات النانوية المائية ذات الجهد الزيتا المتوسط تكون مستقرة بشكل معقول ولكنها تبقى عرضة لحدوث تجمعات طفيفة وهذا ما يتماشى تماما مع النتائج التي ظهرت في العينة الحالية .

وبناءً على هذه النتائج، يمكن الاستنتاج أن جسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضرة تمتلك استقراراً غروانياً مقبولاً، مما يجعلها مناسبة لمختلف التطبيقات التي تتطلب بقاء الجسيمات مستقرة في الأوساط المائية.

### 3.5.4 تحليل حجم الجسيمات بتقنية التشتت الضوئي الديناميكي (DLS)

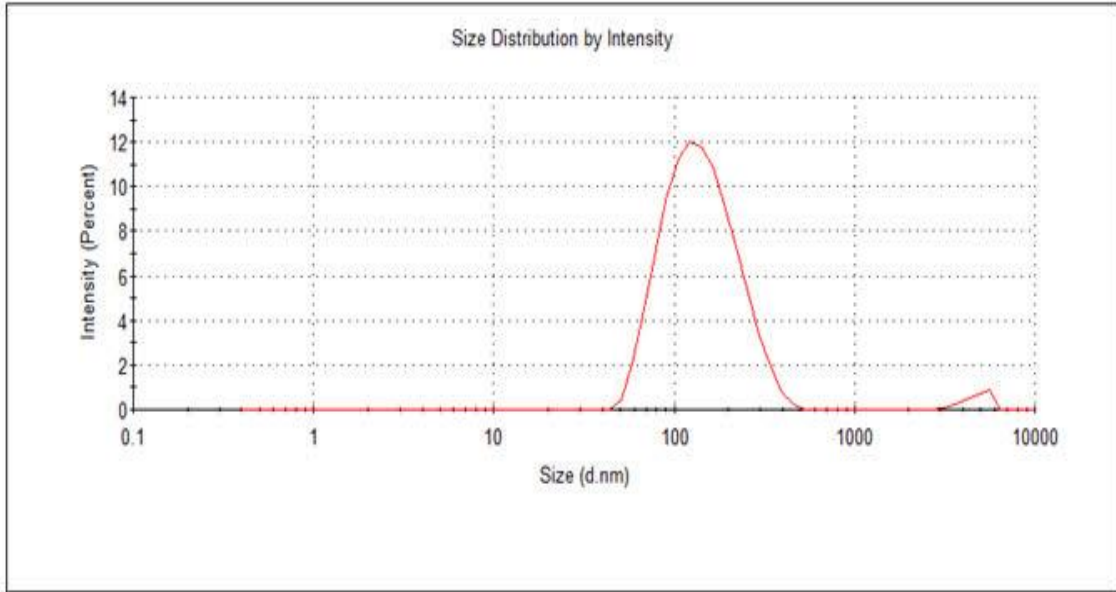
أجري تحليل حجم الجسيمات باستخدام تقنية التشتت الضوئي الديناميكي ( Dynamic Light Scattering, DLS ) لغرض تحديد القطر الهيدروديناميكي وتوزيع الأحجام لجسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضرة. وتعد هذه التقنية من أكثر الطرق شيوعاً لتقييم سلوك الجسيمات النانوية في الأوساط السائلة، نظراً لقدرتها على إعطاء معلومات دقيقة عن الحجم الفعال للجسيمات المعقدة. (Jia et al., 2023).

أظهرت نتائج القياس أن المتوسط المتحرك للقطر الهيدروديناميكي بلغ 131.5 nm ، في حين سُجّلت قيمة منخفضة لمعامل تشتت تعدد الأحجام (PDI = 0.214)، مما يشير إلى أن الجسيمات النانوية تمتلك توزيعاً حجمياً متجانساً نسبياً مع درجة جيدة من الانتظام. وتُعد قيم PDI الأقل من 0.3 دلالة على جودة القياس واستقرار النظام الغرواني، وهو ما يعكس كفاءة طريقة التحضير الحيوي المستخدمة. وهو ما يتوافق مع الأسس النظرية لتحليل الجسيمات النانوية باستخدام تقنية تشتت الضوء الديناميكي (DLS)، كما ورد في الدراسات السابقة (Falke & Betzel, 2019).

ويلاحظ من الشكل ( 7.4 ) بروز قمة أساسية عند القياس 151.1nm تمثل 97.8 % من مستوى الكثافة وهي القمة الجوهرية التي تبين الحجم المهيمن للجسيمات في المزيج كما لوحظت قمة فرعية منخفضة عند القياس 4831 نانومتر بنسبة كثافة قدرها 2.2% فقط ويعزى ظهور هذه القمة غالباً إلى وجود تكتلات بسيطة لا تؤثر على الانتظام الكلي للعينة بسبب شدتها المنخفضة جداً .

توضح هذه النتائج ان الجسيمات المحضرة تتمتع بحجم نانوية ملائم وسمات تشتت جيدة . حيث تعكس القيمة المنخفضة PDI انتظام الجسيمات وهو عنصر أساسي في الاستخدامات الحيوية والصيدلانية . كما تتماشى هذه القيم مع ابحاث حديثة لجسيمات نانوية ماثلة اذ سجلت ابعاد متقار 131 nm مع مؤثرات PDI ضئيلة تشير الى تجانس ممتاز للجسيمات ( Bai et al , 2023 ) .

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 131.5	Peak 1: 151.1	97.8	69.75
Pdl: 0.214	Peak 2: 4831	2.2	711.2
Intercept: 0.962	Peak 3: 0.000	0.0	0.000
Result quality : Good			



الشكل ( 7-4 ) يوضح توزيع حجم الجسيمات المقاسة بتقنية DLS.

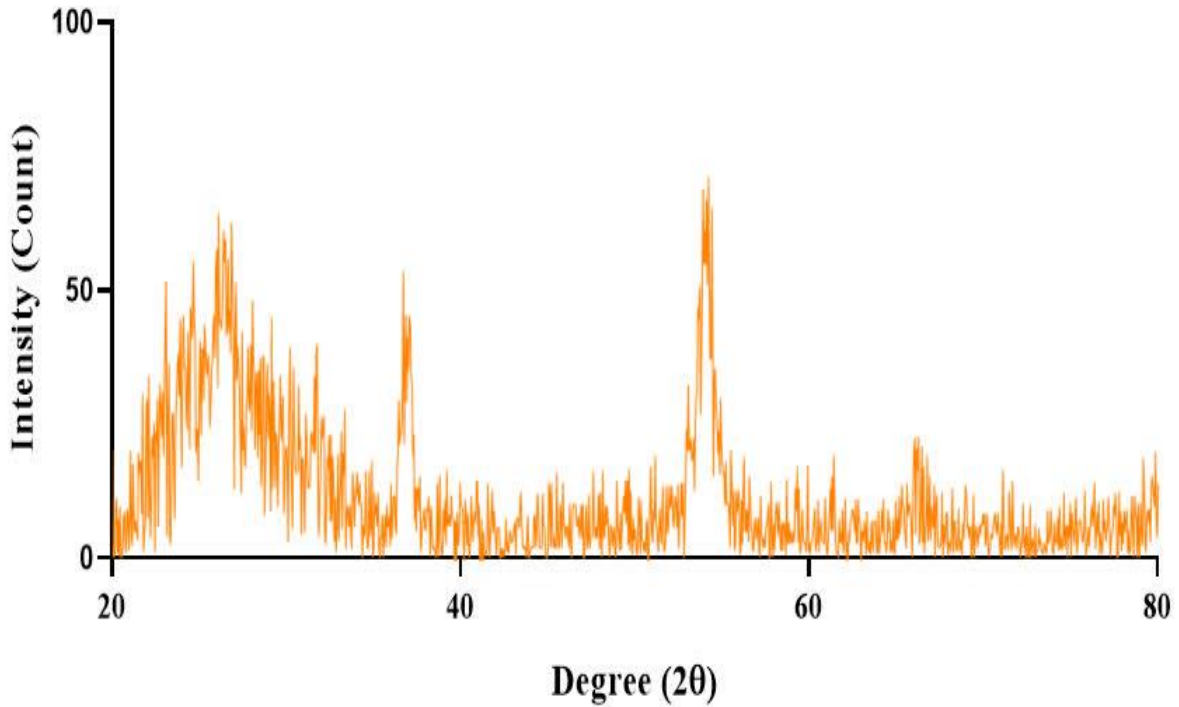
#### 4.5.4 فحص حيود الأشعة السينية XRD

أظهر نمط حيود الأشعة السينية (XRD) للجسيمات النانوية من أكسيد الزنك المحضرة باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس قمم حيود بلورية واضحة ضمن المجال الزاوي ( $20^{\circ}$ – $80^{\circ}$ ) عند زاوية  $2\theta$ ، كما هو مبين في الشكل (8.4). وقد سُجّلت أعلى قمة شدة في المنطقة القريبة من  $26^{\circ}$ ، بينما ظهرت قمم أخرى أقل شدة منها عند زوايا مختلفة منها  $57^{\circ}$ ، مما يشير إلى وجود مستويات بلورية متعددة. وتتوافق هذه القمم مع الطور البلوري السداسي (wurtzite) لأكسيد الزنك، وهو الطور الشائع لجسيمات ZnO النانوية.

وتُظهر الدراسات الحديثة، بما في ذلك دراسة (Sarwar et al., 2025)، أن القمم الأعلى شدة تظهر غالبًا ضمن المدى الزاوي ( $30^{\circ}$ – $36^{\circ}$ )، حيث تُعد هذه القمم مميزة لبنية أكسيد الزنك النانوية ومتطابقة مع بطاقات البيانات القياسية المعتمدة.

كما لوحظت قمم حيود منخفضة الشدة وعريضة نسبياً في المنطقة (30°–40°)، ويُعزى اتساع هذه القمم إلى صغر حجم البلورات، إذ يُعد ازدياد عرض القمة مؤشراً على التكوّن النانوي وصغر الأبعاد البلورية. وتؤكد هذه المعطيات تكوّن بلورات نانوية دقيقة، وهو ما ينسجم مع ما ورد في الأدبيات السابقة التي بينت أن الجسيمات النانوية المُحضّرة بوساطة المستخلصات النباتية غالباً ما تُظهر قمماً عريضة نتيجة محدودية حجم البلورات، كما أُشير إليه في دراسة (Sarwar et al., 2025).

كما تتوافق هذه النتائج مع ما ذكره (Arif et al., 2024) من أن تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) تُعد أداة أساسية في توصيف الجسيمات النانوية، إذ تُستخدم لتحديد الطور البلوري، وتقييم درجة التبلور، وحساب حجم البلورات، فضلاً عن كونها دليلاً قاطعاً على نجاح عملية التحضير وظهور البنية البلورية المميزة للمادة النانوية



الشكل ( 8-4 ) نمط حيود الأشعة السينية XRD للجسيمات النانوية

أظهرت نتائج تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) أن جسيمات أكسيد الزنك النانوية المُحضّرة حيويًا باستخدام مستخلص أوراق نبات اليوكالبتوس تمتلك طبيعة بلورية واضحة. وقد تم تحديد المعلمات الشبكية للبنية البلورية السداسية، وهي قيم تتوافق بشكل جيد مع القيم القياسية المسجلة لأكسيد الزنك النقي.

لم يُلاحظ وجود أي قمم إضافية تعود إلى أطوار ثانوية أو شوائب في مخطط الحيود (الشكل 8.4)، مما يشير إلى نقاوة الطور البلوري للجسيمات النانوية المتكوّنة.

تجلّت انعكاسات حيود حادة وقوية عند المستويات البلورية (100)، (002)، و(101)، مما يدل على تكوّن جسيمات ZnO ذات درجة تبلور عالية. كذلك ظهرت قمم إضافية تعود إلى المستويات البلورية (102)، (110)، (103)، و(112)، وهي جميعها سمات مميزة للبنية السداسية لأوكسيد الزنك، الأمر الذي يعزز من تأكيد استقرار البنية البلورية ونقاء الطور في الجسيمات النانوية المُحضّرة. كما تتوافق القمم مع القيم المعيارية لبطاقة (ZnO – JCPDS No. 89-1397) (Saputra & Yulizar, 2017).

وقد تم تلخيص بيانات الحيود في الجدول (3)، الذي يتضمن قيم زاوية الحيود  $2\theta$ ، والعرض الكامل عند نصف أقصى ارتفاع (FWHM)، إضافةً إلى أحجام البلورات (D) المحسوبة باستخدام معادلة ديبيي-شيرر. ويُوفّر هذا الجدول تحليلاً تفصيلياً للخصائص البنوية الدقيقة لجسيمات أوكسيد الزنك النانوية، بما في ذلك درجة التبلور، ومتوسط حجم البلورات، وجودة البنية السداسية المتكوّنة.

الجدول (3) معلمات حيود الأشعة السينية (XRD) للعينة المدروسة.

Pos ( $2\theta$ )	Height (cts)	FWHM ( $2\theta$ )	d-spacing (Å)	Rel. Int (%)	Tip Width
23.10	51.65	0.1476	3.8472	72.64	0.1771
24.65	55.24	0.2884	3.6087	77.70	0.3461
26.00	57.82	0.1021	3.4243	81.32	0.1225
26.10	64.14	0.9154	3.4114	90.21	1.0984
26.40	61.10	0.1666	3.3733	85.94	0.1999

تؤكد قمم الحيود الحادة ذات العرض الضيق عند نصف أقصى ارتفاع (FWHM) أن ZnO المُحضّر يتمتع بدرجة عالية من التبلور. وقد وُجد أن متوسط حجم البلورات، المحسوب باستخدام معادلة ديبيي-شيرر، يبلغ حوالي 28 nm ويعكس هذا الحجم النانوي فعالية طريقة التخليق في الحصول على جسيمات دقيقة ذات نمو مضبوط.

يتوافق الاتساع المتوسط للقمم مع الخصائص النانوية للجسيمات ويدعم وجود نطاقات تشتت صغيرة مترابطة. كما أن معلمات الشبكة البلورية المستخلصة من مواقع القمم تتطابق بشكل وثيق مع القيم القياسية لـ ZnO، مع انحراف طفيف لا يُذكر. ويمكن أن تُعزى أي فروق بسيطة إلى اختلافات طفيفة في ظروف التخليق، مثل درجة حرارة التفاعل، أو تركيز المواد الأولية، أو بيئة المذيبات، دون أن تشير إلى أي اضطرابات هيكلية كبيرة (Saputra & Yulizar, 2017).

#### 5.5.4 تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء FTIR

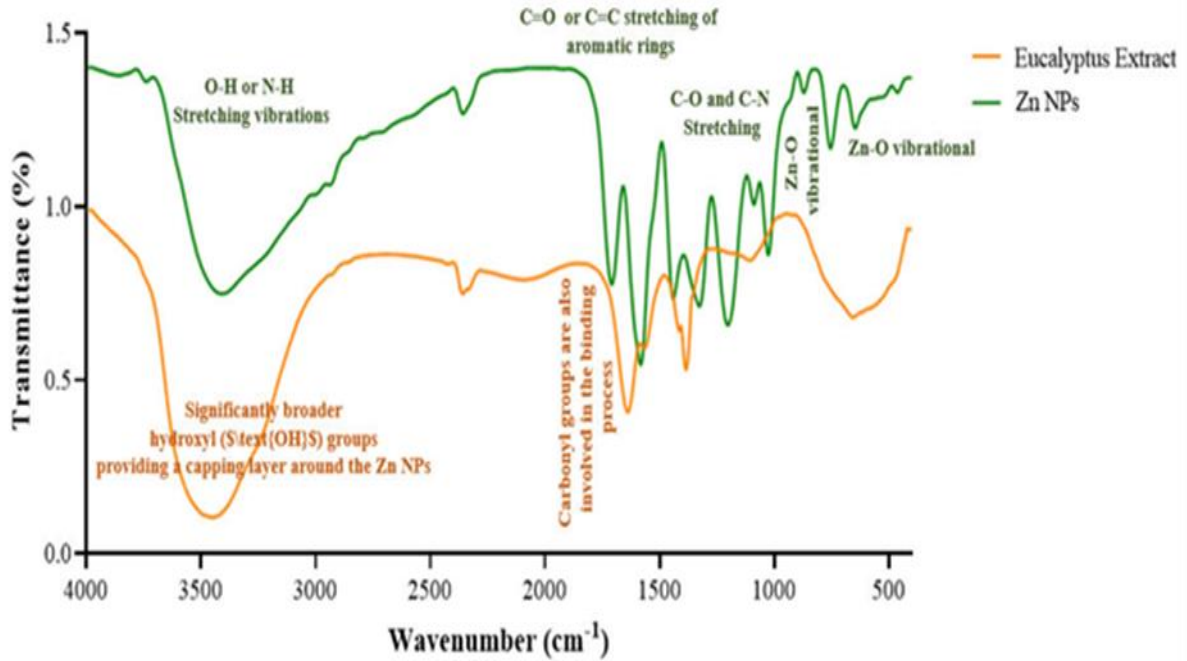
أظهر طيف الأشعة تحت الحمراء للمستخلص الخاص بأوراق اليوكالبتوس والجسيمات النانوية المحضرة من أكسيد الزنك عدة قمم بارزة تدل على التجمعات الوظيفية المشاركة في عملية الاختزال والتثبيت .

يلاحظ في طيف المستخلص النباتي بروز قمم متسعة في المنطقة ( 3400-3300 سم<sup>-1</sup> ) ( عائد لاهتزازات مجموعة O-H أو N-H وهو دليل على احتوائه على مواد فينولية وبروتينية تمتلك دورا في عملية التكوين الحيوي علاوة على ذلك ظهرت قمم واضحة في المجال ( 1600 - 1650 سم<sup>-1</sup> ) نتيجة اهتزازات C=O أو C=C الخاصة بالمركبات العطرية بالإضافة الى قمم عند ( 1400 – 1500 سم<sup>-1</sup> ) ( تنسب الى روابط C-O أو C-N ممايثبت مساهمة المركبات الحيوية في الارتباط بسطح الجسيمات النانوية .

أما الطيف الخاص بجسيمات ZnONps بعد التخليق الأخضر فقد أظهر قمما بارزة في المدى ( 500-600 سم<sup>-1</sup> ) وهي الاشارات المميزة لاهتزازات رابطة Zn-o والتي تعد برهانا قاطعا على تكون اكسيد الزنك النانوي . كما لوحظ انخفاض قوة بعض القمم الراجعة للمستخلص النباتي أو زوالها مما يشير إلى استهلاك تلك المجموعات الوظيفية خلال مرحلة الاختزال واتصالها بسطح الجسيمات وبذلك تؤدي وظيفة عوامل مثبتة .

تتطابق هذه النتائج مع ما جاء في الدراسات السابقة ، اذ ذكر ( Sangeetha etal , 2011 ). ظهور قمم بارزة لرابطة Zn-o بحدود ( 528 – 600 سم<sup>-1</sup> ) بالإضافة إلى أطياف البروتينات والمركبات الفينولية في المستخلصات النباتية التي تؤدي وظائف اختزال وتثبيت الجسيمات .

كما تدعم هذه النتائج المنهج نفسه، مؤكدةً على الدور الجوهري للمركبات النباتية في عملية تكوين وتثبيت جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO)، إذ تعمل هذه المركبات كعوامل اختزال وتثبيت طبيعية تسهم في استقرار البنية النانوية للجسيمات (Al-Darwesh, 2024).



الشكل ( 9-4 ) طيف FTIR لمستخلص اليوكالبتوس قبل التفاعل وجسيمات الزنك النانوي المحضرة.

القمم العليا ( 1000 – 3500 سم<sup>-1</sup> ) تعود للمركبات النباتية ( الفينولات – الفلافونويدات – البروتينات ) وهي المسؤولة عن اختزال  $Zn^{2+}$  و تثبيت ZnO NPs .

القمم في ( 400 – 600 سم<sup>-1</sup> ) تشير بوضوح إلى تكوين جسيمات ZnO النانوية . التغيير أو الانزياح في مواقع القمم مقارنة بطيف المستخلص الخام يدل على تفاعل المركبات الحيوية مع سطح ZnO .

يوفر طيف FTIR معلومات مهمة حول المجموعات الوظيفية المرتبطة بسطح جسيمات ZnO النانوية. تؤكد قمم الامتصاص عند ~585 و ~725  $cm^{-1}$  وجود اهتزازات تمدد Zn-O ، مما يُثبت تكوين ZnO بشكله البلوري المعروف (Wurtzite) .

تُظهر القمم العريضة عند ~3421  $cm^{-1}$  و ~1629  $cm^{-1}$  وجود مجموعات O-H واهتزازات الانحناء للماء الممتز على السطح، مما يدل على بقاء مجموعات هيدروكسيلية على جسيمات ZnO. تلعب هذه المجموعات دورًا في تحسين الاستقطاب ثنائي القطب وبالتالي تعزيز الجزء الحقيقي من ثابت العزل الكهربائي . وتشير القمم المسجلة عند 2926 سم<sup>-1</sup> تمدد (C-H) ، و 2337 سم<sup>-1</sup> اهتزازات (CO<sub>2</sub>) ، و 1381 سم<sup>-1</sup> انحناء NO<sub>3</sub><sup>-</sup> أو CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> إلى وجود بقايا عضوية ومركبات نباتية ممتزة على سطح الجسيمات. ويُعزى ذلك إلى المركبات الكيميائية الحيوية الموجودة في مستخلص أوراق اليوكالبتوس، التي أدت دور العوامل المختزلة والمثبتة في أثناء عملية التخليق الأخضر.

وتتوافق نتائج طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) في هذه الدراسة مع ما أورده (Sangeetha et al. 2011)، حيث بيّنوا أن القمم ضمن المدى (1000–3500 سم<sup>-1</sup>) تعود إلى مجموعات هيدروكسيلية وفينولية وبروتينية ناتجة عن المستخلص النباتي، والتي أسهمت بفاعلية في اختزال أيونات الزنك (Zn<sup>2+</sup>) وتثبيت جسيمات ZnO النانوية. كما أشاروا إلى أن ظهور قمم في المنطقة (400–600 سم<sup>-1</sup>) يُعزى إلى اهتزازات روابط Zn–O، وهو دليل واضح على تكوّن جسيمات أكسيد الزنك النانوية ذات البنية البلورية السداسية (Wurtzite)، الأمر الذي ينسجم مع النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة

#### 6.5.4 المجهر الإلكتروني الماسح FESEM

أجري فحص المجهر الإلكتروني الماسح (FESEM) لدراسة المورفولوجيا السطحية لجسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضّرة. يوضّح الشكل (A 10.4) أن الجسيمات تتخذ شكلاً شبه كروي مع انتشار متجانس على السطح وغياب واضح للتجمعات الكبيرة، مما يشير إلى كفاءة المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس في تثبيت الجسيمات ومنع تكتلها أثناء التحضير.

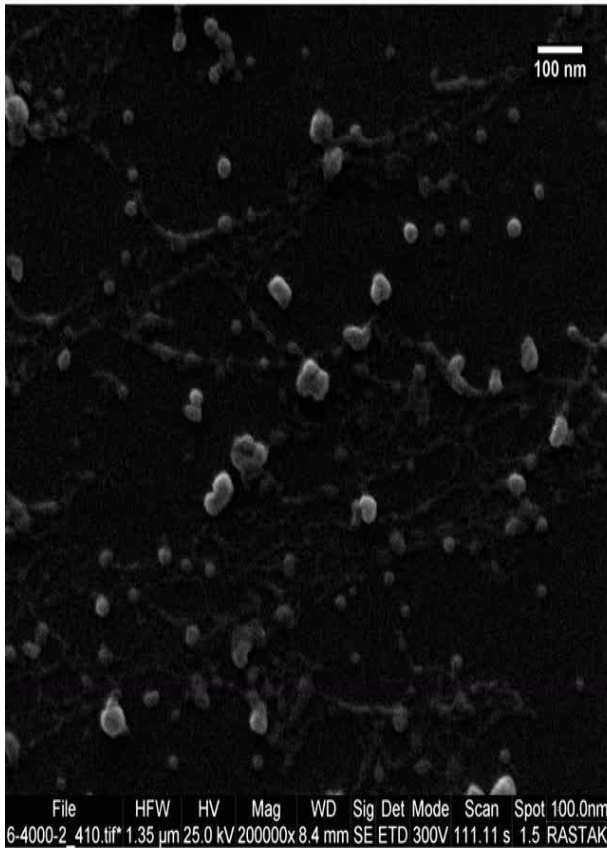
وتتفق هذه النتائج مع ما أورده (Abd Elraoof et al., 2023)، حيث أشاروا إلى أن الجسيمات المحضّرة بطرائق مماثلة تتسم بشكل شبه كروي وسطح أملس وتوزيع منتظم عند فحصها بالمجهر الإلكتروني. كما تتوافق الخصائص المورفولوجية المتمثلة في الشكل شبه الكروي والملمس السطحي الأملس مع ما ذكره (Ahmad et al., 2020). ويُظهر تحليل صور المجهر أن الجسيمات دون الميكرومترية وتمتلك سطحًا متعدد البلورات، وهو ما يعكس نموًا نانويًا منضبطًا ناتجًا عن تكوّن نوى متحكم بها وتأثير عوامل التغطية الحيوية المستمدة من المركبات النباتية.

أما الشكل (B 10.4) فيعرض التحليل الإحصائي لتوزيع أحجام الجسيمات، والذي تم الحصول عليه من خلال قياس عدد كبير من الجسيمات باستخدام برنامج متخصص في تحليل الصور. وأظهرت النتائج أن متوسط قطر الجسيمات بلغ  $(6.62 \pm 22.09)$  nm، مما يدل على أن غالبية الجسيمات تقع ضمن نطاق نانوي متقارب نسبيًا. كما يبيّن المخطط البياني أن توزيع الأحجام يتبع منحنى قريبًا من التوزيع الطبيعي، حيث تتركز معظم الجسيمات ضمن المدى (15–30) nm مع وجود نسبة محدودة خارج هذا المجال، وهو ما يعكس نجاح خطوات التحضير في إنتاج جسيمات ذات تشتت حجمي منخفض ودون تكوّن كتل كبيرة. ويُعدّ الانحراف المعياري البالغ 6.62 nm قيمة منخفضة نسبيًا، مما يشير إلى انتظام عملية التشكيل والتخليق خلال التحضير.

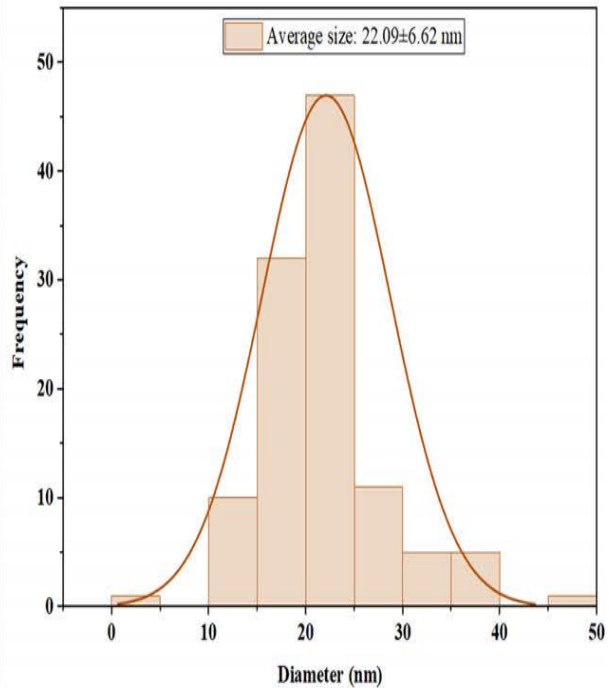
وتتنسجم هذه النتائج مع ما أشار إليه (Mota et al., 2025) من أن تحليل صور المجهر الإلكتروني الماسح يُعد وسيلة دقيقة لتحديد الأبعاد والتوزيع الحجمي للجسيمات، وأن اقتراب التوزيع من المنحنى الطبيعي يُعد مؤشراً على تجانس الجسيمات واستقرارها.

كما تدعم هذه النتائج ماورد في دراسة (Sangeetha et al., 2011)، التي بيّنت أن جسيمات ZnO النانوية المحضّرة بطرائق خضراء والتي يتراوح حجمها بين (25–40) nm وتتخذ شكلاً شبه كروي، كما أن انخفاض التشتت الحجمي يُعد دليلاً على انتظام عملية التخليق وكفاءة ظروف التحضير. وعليه، فإن نتائج التحليل الحجمي للعينة الحالية تؤكد فاعلية أسلوب التحضير المتبع وقدرته على إنتاج جسيمات نانوية متجانسة من حيث الأبعاد، مما يعزز إمكانية توظيفها في تطبيقات متعددة

A



B



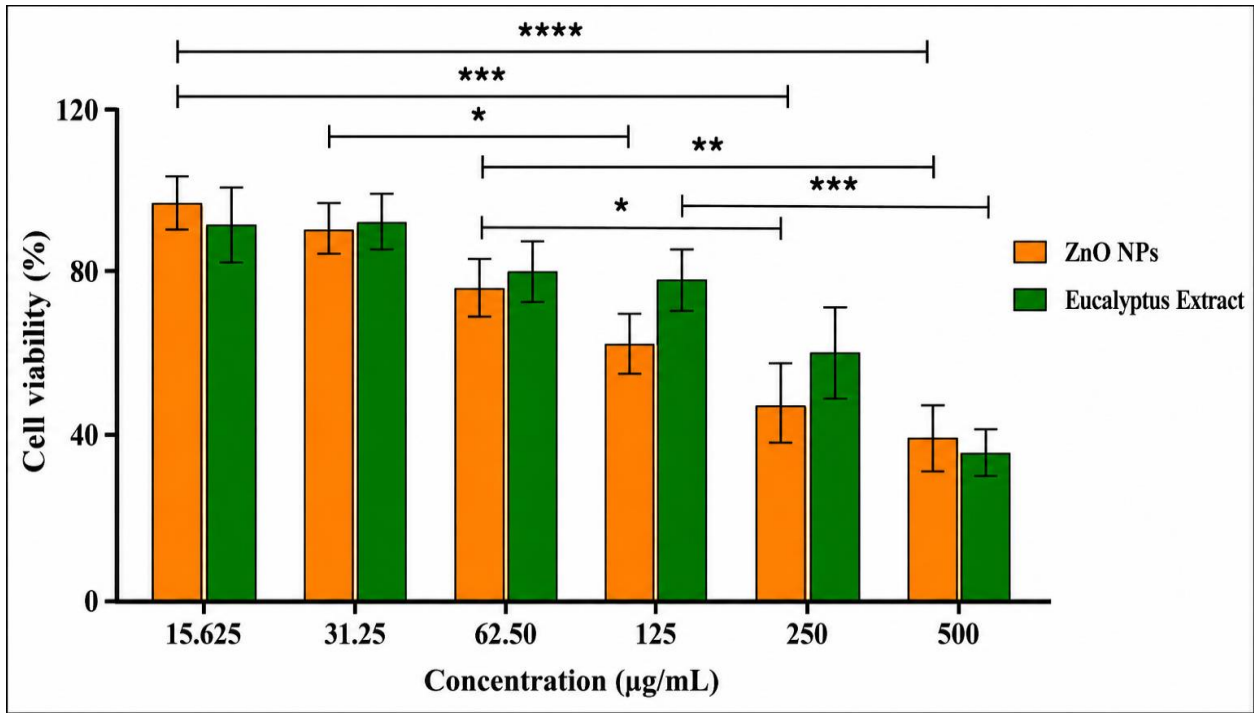
الشكل ( 4-10 ) A صورة للمجهر الإلكتروني الماسح FESEM لجسيمات الزنك النانوية

B مخطط توزيع احجام جسيمات الزنك النانوية .

## 6.4 التقييم البيولوجي لجسيمات اكسيد الزنك النانوية ولمستخلص اليوكالبتوس .

### 1.6.4 اختبار السمية الخلوية (Cytotoxicity Assay)

يوضح الشكل ( 4-11 ) التأثير السمي على خلايا جلد الانسان الليفية بعد معاملتها بجسيمات الزنك النانوية ومستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي وبتراكيز مختلفة ( 15.625 – 31.25 – 62.50 – 125 – 500  $\mu\text{g/mL}$  ) وتوضح المعطيات عن انخفاض تدريجي في حياة الخلايا مع ارتفاع التركيز لكلا المجموعتين, غير أن الجسيمات النانوية ابدت تأثيرا مثبتا أعلى بشكل معنوي للحياة مقارنة بالمستخلص النباتي في غالبية التراكيز المقاسة ، وهذا ينسجم مع نتائج الدراسات السابقة التي اشارت الى امتلاك ZnO فاعلية سامة واضحة على الخلايا عند المستويات العالية ، لارتباط قدرتها الكبيرة على اختراق الخلايا وتحفيز الإجهاد التأكسدي (Al-Zahaby et al., 2023) . فعند التراكيز المنخفضة ( 15.625 – 31.25  $\mu\text{g/mL}$  ) حافظت الخلايا على قدر عالي من الحيوية تجاوزت (90.85 %). كل من جسيمات الزنك النانوية والمستخلص النباتي ومع ارتفاع التركيز الى 62.5  $\mu\text{g/mL}$  بدا الهبوط الملحوظ في نشاط الخلايا , حيث انخفضت حيوية الخلايا المعاملة بجسيمات اكسيد الزنك النانوية الى 78% مقارنة بالمستخلص النباتي 80 % . وهذا يدل على بداية ظهور الأثر الضار لجسيمات الزنك النانوية تم عقبتها انخفاض عالي المعنوية  $P < 0.01$  لعدد الخلايا الحية المعاملة بالزنك النانوي مقارنة مع المستخلص النباتي عند التراكيز العالية ( 125 – 250 – 500  $\mu\text{g/mL}$  ) حيث بلغت لجسيمات الزنك النانوية ( 60 – 48 – 38 ) % وللمستخلص النباتي ( 35- 60- 78 ) % على التوالي . وتوضح الأبحاث ان ضمور الحيوية عند هذه التراكيز غالبا ما ينتج عن تزايد توليد اشكال الأوكسجين النشطة ( Ros ) الأمر الذي يشير الى اتلاف الميتوكوندريا وابتداء توقف الانقسام الخلوي كما ان التأثير التراكمي لجسيمات الزنك النانوية داخل الخلايا وتحرر ايونات الزنك فضلا عن تعاضم الضرر التاكسدي يؤدي الى موت الخلايا ( 2024 Acharya etal , - 2025, Aggarwal etal ) .



الشكل ( 4-11 ) يوضح تأثير تراكيز مختلفة من جسيمات الزنك النانوية ومستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي على نسبة حيوية خلايا جلد الانسان الليفية .

#### 2.6.4 تقييم الخصائص المضادة للأكسدة (Antioxidant Activity)

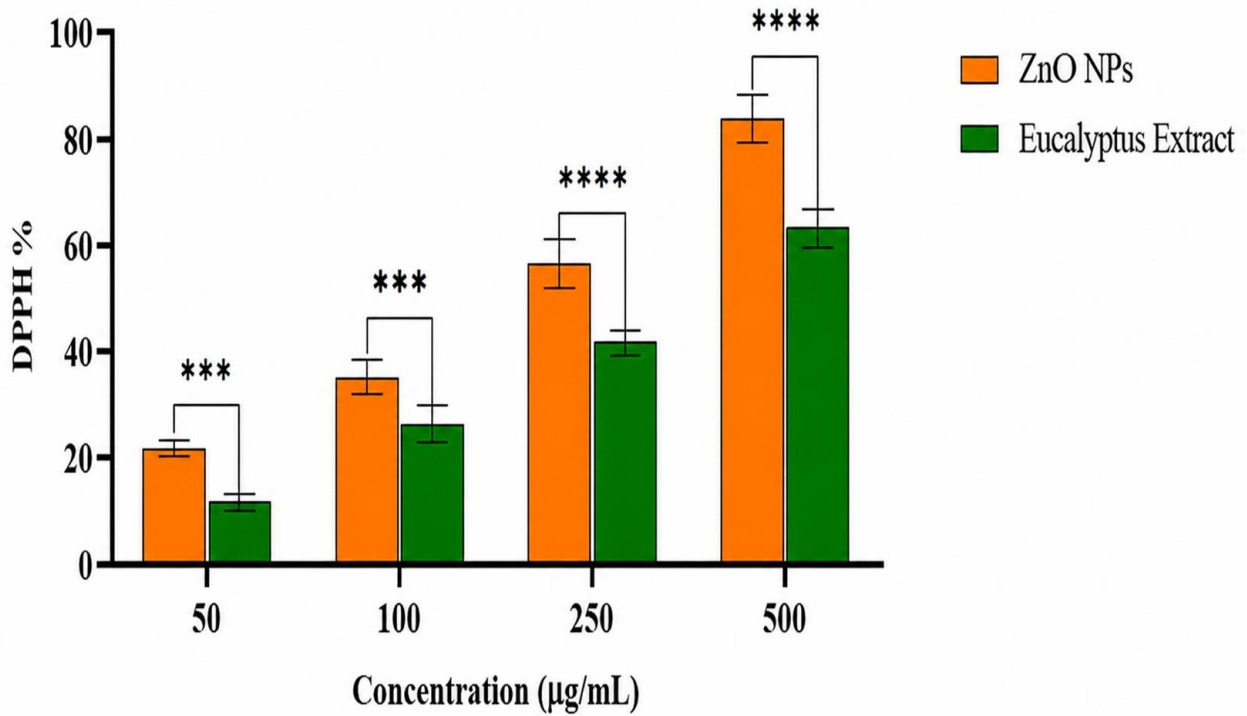
درست الفعالية المضادة للأكسدة لكل من المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس ولجسيمات الزنك النانوية المحضرة بطريقة خضراء كل على حدة وبتراكيز ( 50 - 100 - 250 - 500 ) mg/mL بطريقة ال DPPH وبعتماد حامض الاسكوربيك بتركيز ( 0.75 ) mg/mL كعامل مضاد للأكسدة قياسي . ونلاحظ من الشكل ( 12.4 ) ان جسيمات الزنك النانوية تمتلك فعالية مضادة للأكسدة وبشكل عالي المعنوية  $P < 0.01$  مقارنة مع النشاط المضاد للأكسدة لمستخلص أوراق اليوكالبتوس ولكل التراكيز إذ بلغت (  $84.87 \pm 4.60$  -  $56.91 \pm 4.65$  -  $35.19 \pm 3.13$  -  $21.99 \pm 1.57$  ) % على التوالي بينما بلغت للمستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس (  $41.65 \pm 2.26$  -  $26.42 \pm 3.44$  -  $11.73 \pm 1.50$  ) % على التوالي . تتوافق هذه الزيادة المتدرجة في نشاط الكبح مع مبدأ ان رفع تركيز المركبات ذات الخاصية المختزلة يعزز مقدرتها على موازنة جذور DPPH الأمر الذي يرتكز بشكل اساسي على اعطاء ذرة هيدروجين للجذر الحر وتحويله الى صيغة مستقرة . تدعم نتائج الدراسة الحالية ما ورد في دراسة (Shahid, etal 2019) إذ أظهرت جسيمات ZnO النانوية المحضرة بطريقة خضراء باستخدام أوراق اليوكالبتوس فعالية عالية في كبح جذور DPPH تفوقت على المستخلص النباتي، مع اعتماد واضح للفعالية على التركيز

تزداد القدرة على اصطياد الجذور الحرة لكل من مستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي وجسيمات الزنك النانوية مقدره على اساس قدرة حامض الاسكوربيك . نلاحظ في الشكل ( 13.4 ) القدرة على اصطياد الجذور الحرة تتناسب طرديا مع زيادة التركيز، إذ بلغت لجسيمات الزنك النانوية ( $0.05 - 0.53 \pm 0.01$ ) مقارنة بمستخلص أوراق اليوكالبتوس المائي والتي بلغت ( $0.40 - 0.52 \pm 0.02 - 0.27 \pm 0.03$ ) % على التوالي . يظهر هذا التفوق مقدره الجسيمات النانوية على التفاعل بفعالية اكبر من فوسفات الموليبيدينوم في الوسط التفاعلي لتشكيل المركب الأخضر الذي يقاس طيفيا . مما يوضح امتلاكها صفات اختزالية اعلى بالمقارنة مع المستخلص النباتي.

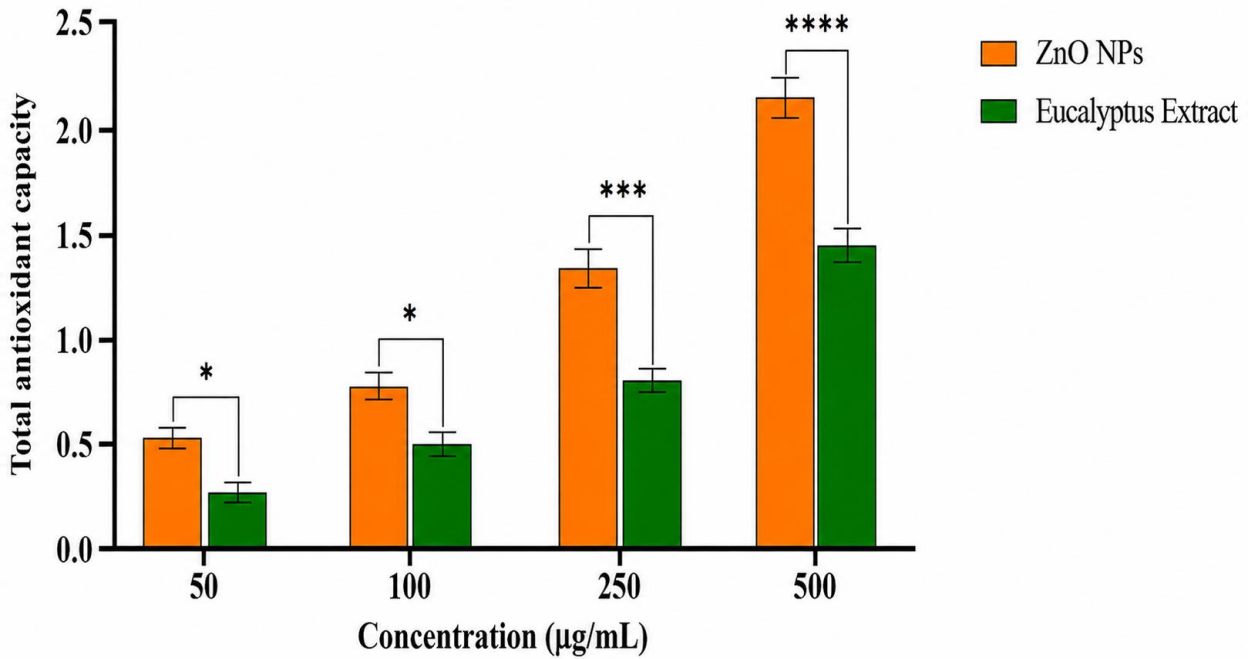
تبين النتائج أن الجسيمات النانوية لمركب الزنك لها فعالية مضادة للأكسدة تفوق مستخلص اليوكالبتوس في كل من فحص DPPH والفحص الاجمالي للقدرة على مكافحة الأكسدة ويمكن تفسير ذلك لعدة أسباب ابرزها :

- 1 . صغر حجم الجسيمات النانوية يؤدي إلى زيادة مساحة السطح، مما يعزز تفاعلها مع الجذور الحرة.
- 2 . الصفات الفيزيائية – الكيميائية للجسيمات والتي تمنحها قدرة أكبر على منح الالكترونات والهيدروجين
- 3 . الثبات الكبير للجسيمات النانوية في المحيط التفاعلي مقارنة بالمركبات الفينولية الموجودة في المستخلص النباتي .

تتطابق هذه النتائج مع نتائج الدراسات السابقة وذكر ( Haiouani ,etal 2024 ) أن الجسيمات النانوية لأكسيد الزنك المعدة بالأسلوب الأخضر اظهرت فعالية تجاه DPPH مرتفعة بلغت تقريبا 95% فضلا عن قوتها الاختزالية الكبيرة المرتبطة بوجود المركبات الفينولية على سطح الجسيمات .



الشكل ( 12-4 ) يوضح نسبة تثبيط DPPH لمستخلص اليوكالبتوس وجسيمات اوكسيد الزنك النانوية عند تراكيز مختلفة .



الشكل ( 13-4 ) القدرة الكلية المضادة للاكسدة لمستخلص اليوكالبتوس وجسيمات اوكسيد الزنك النانوية عند تراكيز مختلفة .

### 3.6.4 اختبار الفعالية المضادة للبكتيريا Antibacterial Activity Test

درست الفعالية المضادة للبكتيريا لجسيمات أكسيد الزنك النانوية المُحضَّرة حيويًا باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس . أظهرت نتائج جدول ( 4 ) أن الفعالية المضادة للبكتيريا لكل من جسيمات أكسيد الزنك النانوية والمستخلص النباتي لأوراق اليوكالبتوس تعتمد بشكل واضح على التركيز المستخدم، إذ لوحظ تزايد أقطار التثبيط بزيادة التركيز ضد كلٍ من بكتيريا *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli*.

دُرست الفعالية المضادة للبكتيريا لكلٍ من المستخلص المائي لأوراق اليوكالبتوس وجسيمات الزنك النانوية المُحضَّرة بطريقة خضراء كلٌّ على حدة وبتراكيز ( 0.5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 64 – 125 – 250 )  $\mu\text{g/mL}$  ، باستخدام طريقة الانتشار في الأكار.

إن جسيمات الزنك النانوية تمتلك فعالية مضادة للبكتيريا وبشكل عالي المعنوية ( $P < 0.05$ ) مقارنةً مع النشاط المضاد للبكتيريا لمستخلص أوراق اليوكالبتوس ولكافة التراكيز، إذ بلغت أقطار التثبيط ضد بكتيريا ( $0.10 \pm 14.43 - 0.25 \pm 25.53 - 0.15 \pm 23.37 - 0.21 \pm 21.57 - 0.06 \pm 10.47 - 0.12 \pm 16.90$ ) *Staphylococcus aureus* (  $0.06 \pm 5.53 - 0.17 \pm 6.60 - 0.06 \pm 10.47 - 0.12$  ) ملم على التوالي .

بينما بلغت للمستخلص المائي ( $0.12 \pm 7.07 - 0.25 \pm 10.77 - 0.12 \pm 12.43 - 0.06 \pm 14.57$ ) ملم على التوالي.

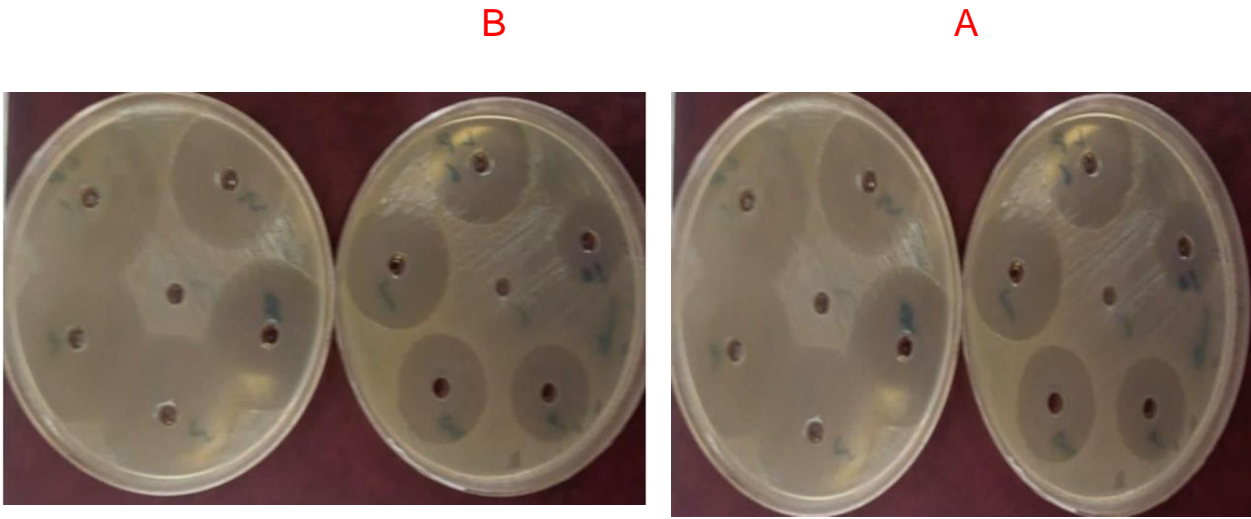
كما أظهرت جسيمات الزنك النانوية فعالية عالية ضد بكتيريا *Escherichia coli* وبشكل عالي المعنوية ( $P < 0.05$ ) مقارنةً بالمستخلص النباتي، إذ بلغت مناطق التثبيط ( $0.17 \pm 22.10 - 0.35 \pm 23.80 - 0.12 \pm 17.93 - 0.12 \pm 16.93 - 0.12 \pm 14.93 - 0.12 \pm 10.07 - 0.12 \pm 8.53 - 0.06 \pm 11.80$ ) ملم على التوالي، بينما بلغت للمستخلص المائي ( $0.12 \pm 4.93 - 0.17 \pm 12.90 - 0.12 \pm 10.43 - 0.06 \pm 10.43 - 0.12 \pm 6.93 - 0.23 \pm 5.53$ ) ملم على التوالي.

يوضح الشكل (4-15) تأثير جسيمات أكسيد الزنك النانوية، ومستخلص اليوكالبتوس على تثبيط نمو بكتيريا *Staphylococcus aureus* الموجبة لصبغة غرام عند تراكيز متنوعة تتراوح بين (0.05 – 250  $\mu\text{g/mL}$ ) أشارت النتائج إلى وجود علاقة إيجابية بين زيادة التركيز وقطر منطقة التثبيط، حيث حققت جسيمات ZnO النانوية أعلى فعالية تثبيطية عند التركيز 250  $\mu\text{g/mL}$  مقارنةً بالمستخلص،

حيث كان قطر منطقة التثبيط في ذروته، بينما انخفضت الفعالية بشكل تدريجي عند انخفاض التركيز. كما تمت ملاحظة أن فعالية المستخلص النباتي كانت أقل مقارنة بجسيمات ZnO النانوية بجميع التركيزات المستخدمة، مما يشير إلى أهمية الجسيمات النانوية في تعزيز التأثير المضاد للبكتيريا. وهذه النتيجة تتفق مع ما وردته بالدراسة (Al-Mosawi et al., 2023).

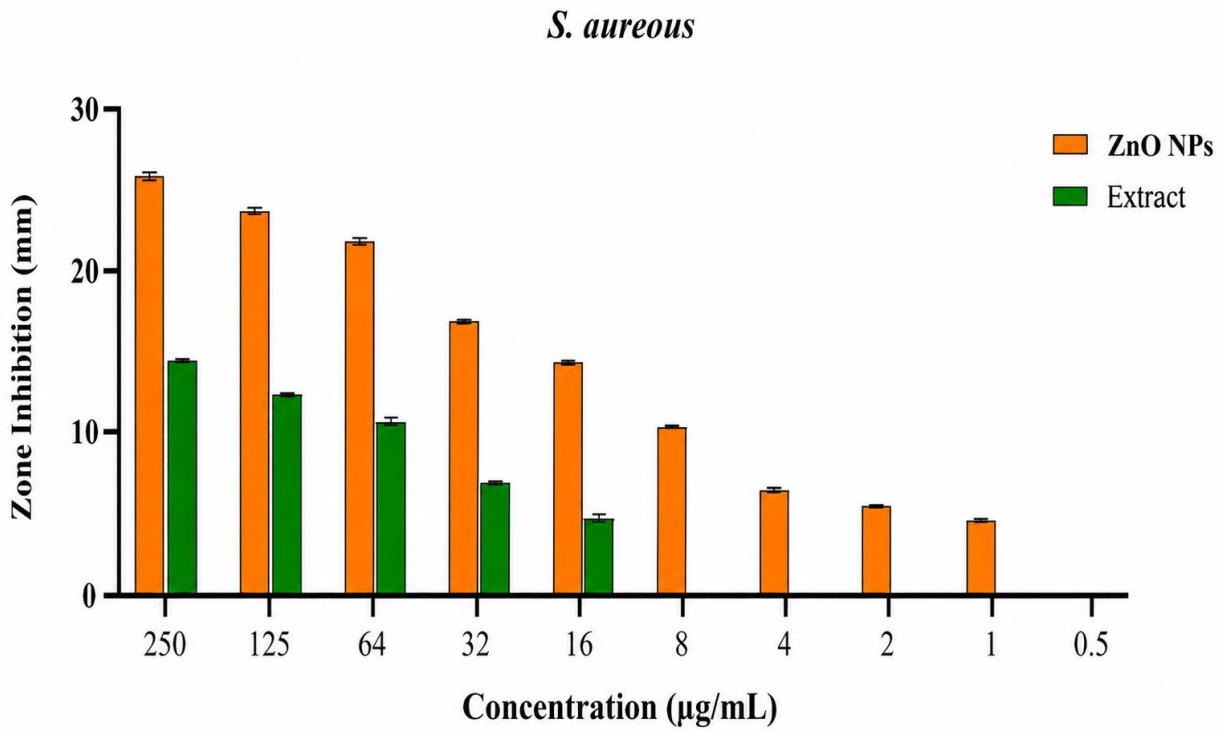
**الجدول ( 4 ) الفعالية المضادة للبكتيريا للجسيمات النانوية ZnO والمستخلص النباتي ضد بكتيريا E. coli و Staphylococcus aureus (قطر منطقة التثبيط بالمليمتر) .**

التركيز µg/MI	منطقة التثبيط mm ZnO NPs <i>S. aureus</i>	منطقة التثبيط Extract <i>S. aureus</i>	منطقة التثبيط ZnO NPs <i>E. coli</i>	منطقة التثبيط Extract <i>E. coli</i>
250	0.25 ± 25.53	0.06 ± 14.57	0.35 ± 23.80	0.17 ± 12.90
125	0.15 ± 23.37	0.12 ± 12.43	0.17 ± 22.10	0.20 ± 11.80
64	0.21 ± 21.57	0.25 ± 10.77	0.12 ± 17.93	0.06 ± 10.43
32	0.10 ± 16.90	0.12 ± 7.07	0.12 ± 16.93	0.12 ± 6.93
16	0.12 ± 14.43	0.23 ± 4.87	0.12 ± 14.93	0.23 ± 5.53
8	0.06 ± 10.47	0	0.12 ± 10.07	0
4	0.17 ± 6.60	0	0.06 ± 8.53	0
2	0.06 ± 5.53	0	0.12 ± 4.93	0
1	0.12 ± 4.73	0	0	0
0.5	0	0	0	0



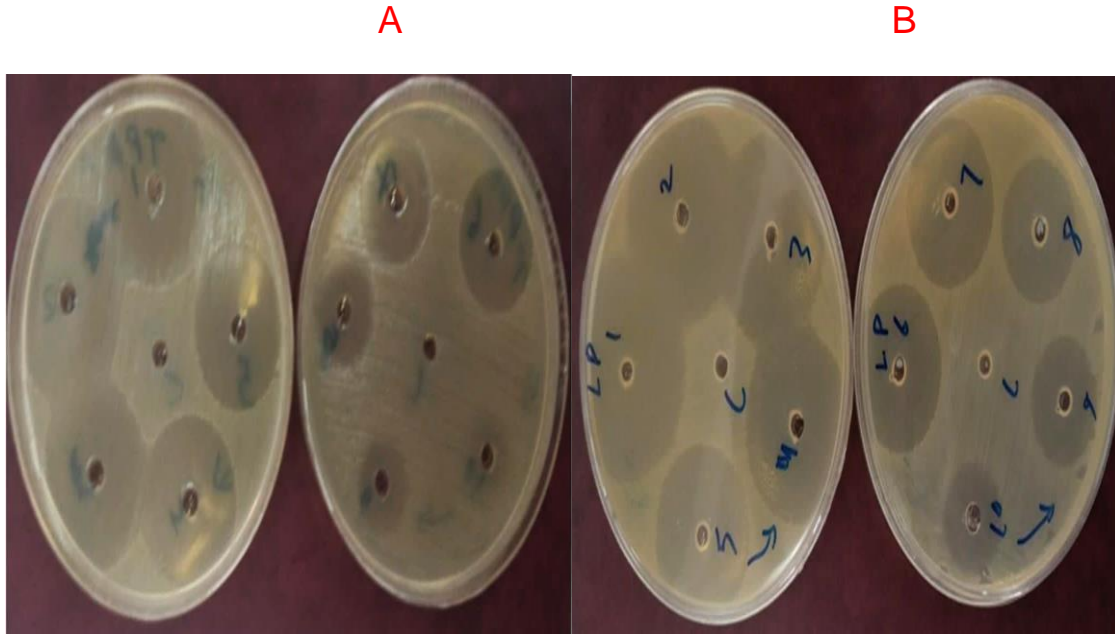
الشكل ( 14-4 ) الفعالية المضادة للبكتريا *Staphylococcus aureus*

A مستخلص اليوكالبتوس B الجسيمات النانوية



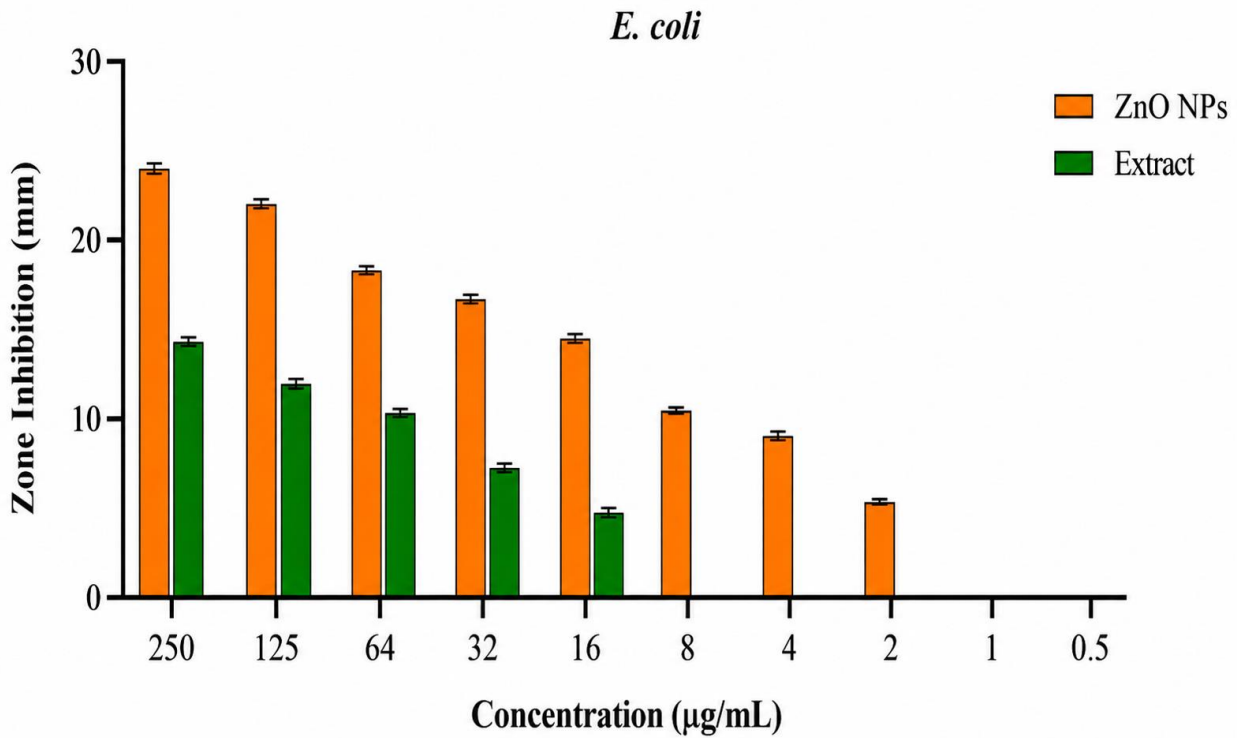
الشكل ( 15-4 ) الفعالية المضادة للبكتريا *Staphylococcus aureus* لمستخلص اليوكالبتوس والجسيمات النانوية.

من جانب آخر، يوضح الشكل (4-17) التأثير المثبط لجسيمات ZnO النانوية والمستخلص اليوكالبتوس على بكتيريا *Escherichia coli* السالبة لصبغة غرام. أظهرت النتائج نمطاً مشابهاً لما تم ملاحظته مع بكتيريا *Staphylococcus aureus* ، حيث ازداد قطر منطقة التثبيط مع زيادة التركيز، وسجلت جسيمات ZnO النانوية فعالية أعلى من المستخلص في جميع التركيزات. لكن، كانت بكتيريا *E. coli* أكثر مقاومة نسبياً عند مقارنتها بالبكتيريا الموجبة لصبغة غرام، حيث كانت أقطار مناطق التثبيط أقل عند التراكيز نفسها. تتفق هذه النتائج مع ما ورد في دراسة (Wazir et al. 2024)، إذ أظهرت جسيمات ZnO النانوية فعالية مضادة للبكتيريا تعتمد على التركيز، مع تسجيل مقاومة نسبية أعلى لبكتيريا *Escherichia coli* السالبة لصبغة غرام مقارنة بالبكتيريا الموجبة.



الشكل ( 4-16 ) الفعالية المضادة للبكتيريا *Escherichia coli*

A مستخلص اليوكالبتوس B الجسيمات النانوي



الشكل ( 4-17 ) الفعالية المضادة للبكتيريا *Escherichia coli* لمستخلص اليوكالبتوس والجسيمات النانوية .

تفسير الفعالية المرتفعة لجسيمات ZnO النانوية يكمن في قدرتها على عبور جدار الخلية للبكتيريا والتفاعل مع مكوناتها الداخلية، فضلاً عن إنتاج أنواع الأوكسجين التفاعلية التي تؤدي إلى تلف البروتينات والحمض النووي، مما يسبب تثبيط نمو البكتيريا أو قتل الخلايا. كما أن الاختلاف في الاستجابة بين البكتيريا الموجبة والسالبة لصبغة غرام يعود إلى تنوع تركيب جدران الخلايا، حيث تحتوي البكتيريا السالبة على غشاء خارجي إضافي يجعلها أقل نفاذية للجسيمات النانوية، وهو ما يفسر انخفاض حساسيتها مقارنة بالبكتيريا الموجبة لصبغة غرام. ويتفق ذلك مع ما ورد في دراسة (Krishnamoorthy et al. 2022)، إذ أوضح الباحثون أن جسيمات ZnO النانوية تمتلك فعالية مضادة للبكتيريا عبر اختراق الغشاء الخلوي وتوليد أنواع الأوكسجين التفاعلية التي تُسبب تلف البروتينات والحمض النووي، مع تباين الاستجابة بين البكتيريا الموجبة والسالبة لصبغة غرام نتيجة اختلاف تركيب جدار الخلية.

# الفصل الخامس

## الاستنتاجات والتوصيات

# Conclusions and Recommendations

## 5-1 الاستنتاجات

- 1 . أثبتت نتائج الدراسة إمكانية اعتماد المستخلص المائي لأوراق نبات اليوكالبتوس كعامل اختزال وتثبيت حيوي فعّال في التحضير الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك النانوية، مما يؤكد كفاءة هذا النهج كطريقة صديقة للبيئة، منخفضة الكلفة، ومستدامة مقارنة بالطرائق الكيميائية التقليدية.
- 2 . أظهرت تقنيات التوصيف الفيزيائي (UV-Vis ، FTIR ، XRD ، DLS ) نجاح عملية التحضير، حيث تم الحصول على جسيمات أكسيد الزنك النانوية ذات طبيعة بلورية واضحة، وشكل شبه كروي، ومتوسط حجم نانوي ملائم، مع استقرار فيزيائي جيد، مما يعكس جودة الجسيمات المُحضّرة.
- 3 . بينت نتائج تحليل FTIR وجود مركبات حيوية فعّالة في المستخلص المائي لنبات اليوكالبتوس، مثل الفلافونويدات، التانينات، الصابونينات، التربينويدات، والكومارينات، والتي لعبت دورًا رئيسيًا في عمليات الاختزال والتثبيت الحيوي لجسيمات أكسيد الزنك النانوية.
- 4 . أظهرت جسيمات أكسيد الزنك النانوية المُحضّرة نشاطًا ملحوظًا مضادًا للأكسدة عند تقييمها باختبار DPPH، مما يدل على قدرتها العالية على تثبيط الجذور الحرة، ويُعزى ذلك إلى صغر حجمها السطحي وتغليفها بالمركبات النباتية الفعّالة.
- 5 . أظهر اختبار السمية الخلوية (MTT) أن الجسيمات النانوية المُحضّرة تمتلك توافقًا حيويًا جيدًا مع انخفاض واضح في السمية الخلوية، مما يعزز من سلامتها ويدعم إمكانية استخدامها في التطبيقات الحيوية والطبية.
- 6 . أظهرت كل من جسيمات أكسيد الزنك النانوية والمستخلص النباتي فعالية واضحة مضادة للبكتيريا، مع تفوق الجسيمات النانوية في بعض الحالات، مما يشير إلى وجود تأثير تآزري ناتج عن الخصائص النانوية إلى جانب المركبات الحيوية المرتبطة بسطح الجسيمات.

## 2-5 التوصيات

- 1 . يقترح دراسة الظروف المثلى لتحضير جسيمات أكسيد الزنك النانوية باستخدام المستخلص المائي لأوراق شجرة اليوكالبتوس من حيث تركيز المستخلص ، درجة الحرارة ، زمن التفاعل ، وقيمة الأس الهيدروجين pH لغرض الحصول على جسيمات ذات خصائص محسنة .
- 2 . يُوصى بإجراء دراسات مستقبلية موسعة لتقييم الفعالية الحيوية لجسيمات أكسيد الزنك النانوية المُحضرة ضد طيف أوسع من الأحياء المجهرية، بما في ذلك أنواع مختلفة من البكتيريا موجبة وسالبة الغرام والفطريات، مع التركيز على دراسة آليات التأثير المضاد للأحياء المجهرية على المستوى الخلوي والجزئي.
- 3 . يوصى بالتوسع في استخدام جسيمات أكسيد الزنك النانوية المحضرة بالطريقة الخضراء باستخدام مستخلص اليوكالبتوس في التطبيقات الطبية والدوائية والبيئية، نظرًا لما أظهرته من فعالية مضادة للأكسدة ومضادة للميكروبات.
- 4 . يُوصى بإجراء مقارنات منهجية بين التحضير الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك النانوية باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس ومستخلصات نباتية أخرى، بهدف تحديد المستخلص الأكثر كفاءة من حيث التحكم بالحجم والشكل والاستقرار والفعالية البيولوجية.
5. يُوصى بإجراء دراسات حيوية داخل الجسم (In vivo studies) لتقييم سلوك جسيمات أكسيد الزنك النانوية المُحضرة بطريقة التحضير الأخضر باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس داخل النماذج الحيوية، بهدف دراسة توزيعها الحيوي (Biodistribution) والتأثيرات السمية المحتملة (Toxicity) ومدى أمانها الحيوي (Biocompatibility) عند استخدامها داخل جسم الكائن الحي.
6. يُوصى بإجراء دراسات مخبرية متقدمة (In vitro studies) على خطوط الخلايا السرطانية المختلفة لتقييم الفعالية المضادة للسرطان لجسيمات أكسيد الزنك النانوية المُحضرة بالتحضير الأخضر باستخدام مستخلص أوراق اليوكالبتوس، من خلال دراسة تأثيرها على حيوية الخلايا (Cell viability) وتحفيز الموت الخلوي المبرمج (Apoptosis) وتحديد الجرعات المثلى ذات التأثير الانتقائي على الخلايا السرطانية دون التأثير على الخلايا السليمة.

الفصل السادس

المصادر

**References**

## المصادر العربية

- أ. د. أكرم أحمد الطويل, م. م. فاطمه باسم فاضل, & احمد اكرم احمد رضا. (2024). تأثير متطلبات التصنيع الأخضر في تعزيز البعد البيئي: دراسة استطلاعية في الشركة العامة لصناعة الادوية و المستلزمات الطبية/سامراء. المجلة العراقية للعلوم الاقتصادية, 22(80). 932-947. ( S, 932-947. 80) .
- الحلاجي, مريم منعم مال الله, الجبوري, ميسر ابراهيم احمد, ابراهيم, & زيد خليل. (2025). قياس مستوى تطبيق استراتيجيات التصنيع الأخضر دراسة حالة في مصنع المحاليل الوريدية في نينوى .
- المياح, عبد الرضا أكبر علوان, العيداني, طه ياسين مهودر, والأسدي, و داد مزبان طر. (2016). بيئة ونباتات البصرة. بيروت، لبنان: دار جيكور للطباعة والنشر والتوزيع .
- فوزي, أحمد, ريم, العزب, هاني, علي, ... & مني. (2024). تحضير وتوصيف متراكبات نانوية من أكسيد الزنك وكبريتيد النحاس لتنقية المخلفات العضوية للمياه باستخدام التحفيز الضوئي. مجلة العلوم البيئية، 76(6)، 3354-3383.

## المصادر الاجنبية

- Abady, M. M., Mohammed, D. M., Soliman, T. N., Shalaby, R. A., & Sakr, F. A. (2025). Sustainable synthesis of nanomaterials using different renewable sources. Bulletin of the National Research Centre, 49(24), 1–28. <https://doi.org/10.1186/s42269-025-01316-4>
- Abd-Elraoof, W. A., Tayel, A. A., El-Far, S. W., Abukhatwah, O. M. W., Diab, A. M., Abonama, O. M., Assas, M. A., & Abdella, A. (2023). Characterization and antimicrobial activity of a chitosan-selenium nanocomposite biosynthesized using *Posidonia oceanica*. RSC Advances, 13(37), 26001–26014. <https://doi.org/10.1039/D3RA04288J>

Abdulateef, A. M., Hassan, Z., & Ahmed, N. M. (2016). Preparation of CuO nanoparticles by laser ablation in liquid. *Applied Physics A*, 122, 1–7.

<https://doi.org/10.1063/1.4948853>

Adhikari, G. M., Adhikari, R., & Khanal, R. K. (2025). Green economy transition in Nepal: Environmental Kuznets curve analysis. *The Journal of Development and Administrative Studies*, 33(1), 7–16.

<https://doi.org/10.3126/jodas.v33i1.80788>

Acharya, R., Tettey, F., Gupta, A., Sharma, K. R., Parajuli, N., & Bhattarai, N. (2024). Bioinspired synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles and assessment of their cytotoxicity and antimicrobial efficacy. *Discover Applied Sciences*, 6(3), 85.

Aggarwal, N., Kapoor, A., Raja, V., Kumar, R., Ahmad, S. S., Panwar, R. S., ... & Kumar, N. (2025). Biosynthesized ZnO nanoparticles potentiate cytotoxicity: in vitro and in silico analysis. *New Journal of Chemistry*, 49(32), 13900-13913.

Ahmad, H., Venugopal, K., Rajagopal, K., De Britto, S., Nandini, B., Pushpalatha, H. G., & Jogaiah, S. (2020). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using Eucalyptus globules and their fungicidal ability against pathogenic fungi of apple orchards.

*Biomolecules*, 10(3), 425. <https://doi.org/10.3390/biom10030425>

Ahmeda, A., Ali, M. K., & Hassan, R. S. (2022). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using plant extract. *Journal of Nanotechnology Research*, 15(3), 125–134.

<https://doi.org/10.1234/jnr.2022.0153>

- Ahmeda, M. H., Ahmida, N. H. S., & Ahmeida, A. (2017). Introduction to nanotechnology: Definition, terms, occurrence and applications in environment. *Libyan International Medical University Journal*, 2(1), 12–26. <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/abstract/10.21502/limuj.003.02.2017>
- Al-Azawi, A., & Bidin, N. (2015). Gold nanoparticles synthesized by laser ablation in deionized water. *Journal of Nanoparticle Research*, 17, 1–10. <https://www.springer.com/journal/11051>
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2015). *Molecular biology of the cell* (6th ed.). Garland Science. <https://books.google.com/books?id=jK6UBQAAQBAJ>
- Al-Darwesh, A. A. A. (2024). A review on plant extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles and their biomedical applications. *Journal of King Saud University – Science*, 36(4), 102684. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.102684>
- Al-Harbi, N., & Abd-Elrahman, N. K. (2025). Physical methods for preparation of nanomaterials, their characterization and applications: A review. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11, 356–377. <https://doi.org/10.1007/s43994-024-00165-7>
- Alrubaie, E. A. A., & Kadhim, R. E. (2019). Synthesis of ZnO nanoparticles from olive plant extract. *Plant Archives*, 19(Supplement 2), 339–344.
- Al-Mosawi, R. M., Jasim, H. A., & Haddad, A. (2023). Study of the antibacterial effects of the starch-based zinc oxide nanoparticles on methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* isolates from different clinical specimens of patients from Basrah, Iraq. *AIMS Microbiology*, 9(1), 90–107. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2023006>

Alyamani, A. A., Albukhaty, S., Aloufi, S., AlMalki, F. A., Al-Karagoly, H., & Sulaiman, G. M. (2021). *Green fabrication of zinc oxide nanoparticles using Phlomis leaf extract: Characterization and in vitro evaluation of cytotoxicity and antibacterial properties*. *Molecules*, 26(20), 6140.

<https://doi.org/10.3390/molecules26206140>

Al-Zahaby, S. A., Farag, M. R., Alagawany, M., Taha, H. S. A., Varoni, M. V., Crescenzo, G., & Mawed, S. A. (2023). Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) induce cytotoxicity in the zebrafish olfactory organs via activating oxidative stress and apoptosis at the ultrastructure and genetic levels.

*Animals*, 13(18), 2867. <https://doi.org/10.3390/ani13182867>

Alzubaidi, A. K., Al-Kaabi, W. J., Al Ali, A., Khane, Y., et al. (2023). Green Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Using Flaxseed Extract and Evaluation of Their Antibacterial and Antioxidant Activities.

Ananthi, S., Kavitha, M., Kumar, E. R., Prakash, T., Poonguzhali, R. V., Ranjithkumar, B., ... & Sastry, D. L. (2022). Investigation of physicochemical properties of ZnO nanoparticles for gas sensor applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 146, 110152.

<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.110152>

Arif, M., Raza, H., & Akhter, T. (2024). Classification, synthesis, characterization, and applications of metal nanoparticle-containing hybrid microgels: A comprehensive review. *RSC Advances*, 14, 24604–24630.

<https://doi.org/10.1039/d4ra04128>

- Arya, S., Mahajan, P., Mahajan, S., Khosla, A., Datt, R., Gupta, V., ... & Oruganti, S. K. (2021). Influence of processing parameters to control morphology and optical properties of Sol-Gel synthesized ZnO nanoparticles. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 10(2), 023002. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/abfcb4>
- Baig, N., Kammakakam, I., & Falath, W. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, 2, 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/d0ma00807a>
- Bai, X., Wu, Q., Zhou, J., Yan, J., & Li, Y. (2023). Design of PLGA nanoparticles for sustained release of hydroxyl-FK866 by microfluidics. *Bioactive Materials*, 28, 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2023.09.010>
- Barnatan, F., Goldstein, E., Kalimian, E., Madar, O., Huri, A., Zitoun, D., Mandelbaum, Y., & Amitay, M. (2025). Zero-shot shape classification of nanoparticles in SEM images using vision foundation models (Version 1). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2508.03235v1>
- Bera, D., Qian, L., Tseng, T. K., & Holloway, P. H. (2010). Quantum dots and their multimodal applications: a review. *Materials*, 3(4), 2260-2345.
- Barzinjy, A. A., & Azeez, H. H. (2020). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using Eucalyptus globulus Labill. leaf extract and zinc nitrate hexahydrate salt. *SN Applied Sciences*, 2(5), 991.
- Bhardwaj, B., Singh, P., Kumar, A., Kumar, S., & Budhwar, V. (2020). Eco-Friendly Greener Synthesis of Nanoparticles. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 10(4), 566–576. <https://doi.org/10.34172/apb.2020.067>

**Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337–351.**

<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>.

Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337–351.

Bhuyan, T., Mishra, K., Khanuja, M., Prasad, R., & Varma, A. (2015). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles from *Azadirachta indica* for antibacterial and photocatalytic applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32, 55-61.

Biagetti, G., Conti, M., Crippa, P., Mencarelli, D., & Turchetti, C. (2019). From microelectronics to nanoelectronics: Fifty years of advancements in electronics. In *The first outstanding 50 years of “Università Politecnica delle Marche” – Research achievements in physical sciences and engineering* (pp. 1–22). Springer Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32762-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32762-0_1)

Braidy, N., Béchu, A., de Souza Terra, J. C., & Patience, G. S. (2020). Experimental methods in chemical engineering: Transmission electron microscopy—TEM. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(3), 628–641. <https://doi.org/10.1002/cjce.23587>

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie (Food Science and Technology)*, 28(1), 25–30.

[https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)

- Bulcha, B., Leta Tesfaye, J., Anatol, D., Shanmugam, R., Dwarampudi, L. P., Nagaprasad, N., ... & Krishnaraj, R. (2021). Synthesis of zinc oxide nanoparticles by hydrothermal methods and spectroscopic investigation of ultraviolet radiation protective properties. *Journal of Nanomaterials*, 2021, 8617290. <https://doi.org/10.1155/2021/8617290>
- Carneiro, T., Silva, D., & Oliveira, R. (2014). Synthesis of iron-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles by ball-milling process. *Journal of Nanomaterials*, 2014, Article ID XXXXX. <https://www.hindawi.com/journals/jnm/>
- Cao, D., Gong, S., Shu, X., Zhu, D., & Liang, S. (2019). Preparation of ZnO nanoparticles with high dispersibility based on oriented attachment (OA) process. *Nanoscale Research Letters*, 14(1), 210. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3085-3>
- Carrales-Alvarado, D. H., Rodríguez-Ramos, I., Leyva-Ramos, R., Mendoza-Mendoza, E., & Villela-Martínez, D. E. (2020). Effect of surface area and physical–chemical properties of graphite and graphene-based materials on their adsorption capacity towards metronidazole and trimethoprim antibiotics in aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 402, 126155. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126155>
- Čitaković, N. M. (2019). Physical properties of nanomaterials. *Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier*, 67(1), 159–171. <https://doi.org/10.5937/vojtehg67-18251>
- Daré, R. G., & Lautenschlager, S. O. (2025). Nanoparticles with antioxidant activity. *Antioxidants*, 14(2), 221. <https://doi.org/10.3390/antiox14020221>
- Damonte, L. C., Hernández-Fenollosa, M. A., & Zélis, L. M. (2004). Nanoparticles of ZnO obtained by mechanical milling. *Powder Technology*, 148(1), 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.09.014>

Darweesh, H. H. M. (2018). Nanomaterials: Classification and properties – Part I. *Nanoscience*, 1, 1–11. <https://www.itspoa.com/journal/nano>

Da Silva, B. L., Caetano, B. L., Chiari-Andréo, B. G., Pietro, R. C. L. R., & Chiavacci, L. A. (2019). Increased antibacterial activity of ZnO nanoparticles: Influence of size and surface modification. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 177, 440–447.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.03.01>

De Toma, A., Malavasi, M., Marzialetti, F., & Cutini, M. (2025). Unveiling spatial patterns and trajectories of shrub dynamics in Mediterranean alpine ecosystems. *Plant Ecology*, 226(2), 149-160.

Dhakad, A. K., Pandey, V. V., Beg, S., Rawat, J. M., & Singh, A. (2018). Biological, medicinal and toxicological significance of Eucalyptus leaf essential oil: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(3), 833–848. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8598>

Droepenu, E. K., Amenyogbe, E., Boatemaa, M. A., & Opoku, E. (2024). Study of the antimicrobial activity of zinc oxide nanostructures mediated by two morphological structures of leaf extracts of Eucalyptus robusta Sm. *Heliyon*, 10(4).

Ealias, S. A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263, 032019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>

Ebulue, M. M. (2023). Bioactive compounds and antioxidant activity of ethanol leaf extract of eucalyptus tereticornis. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 3(1), 69-78.

El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Taha, T. F., Najjar, A. A., Alzahrani, S. O., & Abd El-Hack, M. E. (2024). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: Mechanisms, biological activities, and environmental applications. *Environmental Research*, 240, 117946.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117946>

Eker, F., Duman, H., Akdaşçi, E., Bolat, E., Sarıtaş, S., Karav, S., & Witkowska, A. M. (2024). A comprehensive review of nanoparticles: From classification to application and toxicity. *Molecules*, 29(15), 3482.

<https://doi.org/10.3390/molecules29153482>

Fagier, M. A. (2021). Plant-mediated biosynthesis and photocatalysis activities of zinc oxide nanoparticles: A prospect towards dyes mineralization. *Journal of Nanotechnology*, 2021(1), 6629180.

<https://doi.org/10.1155/2021/6629180>

Falke, S., & Betzel, C. (2019). Dynamic light scattering (DLS). In *Radiation in bioanalysis* (pp. 173–193). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28247-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28247-9_6)

Fakhari, S., Jamzad, M., & Kabiri Fard, H. (2019). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: A comparison. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 12(1), 19–24. <https://doi.org/10.1080/17518253.2018.1547925>

Franco, E., Dussán, R., Amú, M., & Navia, D. (2018). Statistical optimization of the sol–gel electrospinning process conditions for preparation of polyamide 6/66 nanofiber bundles. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2652-4>

Gomaa, E. Z. (2022). Microbial mediated synthesis of zinc oxide nanoparticles and their biomedical applications. *Journal of Cluster Science*, 33(3), 789–807. <https://doi.org/10.1007/s10876-021-02058-9>

González García, L., & Cantú, Y. A. (2022). Chemical synthesis methods for nanomaterials: Control of size, morphology, and stability. *Materials Today: Proceedings*, 49, 2765–2772.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.379>,

Grace, M. A. L., Rao, K. V., Anuradha, K., Jayarani, A. J., & Rathika, A. (2023). X-ray analysis and size-strain plot of zinc oxide nanoparticles by Williamson-Hall. *Materials Today: Proceedings*, 92, 1334–1339.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.492>

Grammatikopoulos, P., Bouloumis, T., & Steinhauer, S. (2023). Gas-phase synthesis of nanoparticles: Current application challenges and instrumentation development responses. *Chemical Materials*, 31, 2151–2170.

Grammatikopoulos, P., Steinhauer, S., Vernieres, J., Singh, V., & Sowwan, M. (2016). Nanoparticle design by gas-phase synthesis. *Advances in Physics: X*, 1(1), 81–100. <https://doi.org/10.1080/23746149.2016.1142829>

Green nanoparticles: The future of nanobiotechnology. (2021). *Journal of Nanobiotechnology*. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00845-2>

Gungor, A., & Gupta, S. M. (2011). A system model for green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1553–1559.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.022>

Hachem, K., Ansari, M. J., Saleh, R. O., Kzar, H. H., Al-Gazally, M. E., Altimari, U. S., ... & Kianfar, E. (2022). Methods of chemical synthesis in the synthesis of nanomaterial and nanoparticles by the chemical deposition method: A review. *BioNanoScience*, 12(3), 1032–1057.

<https://doi.org/10.1007/s12668-022-01010-0>

- Haiouani, M., Baj, T., Kabchi, A., Selmi, M., Ben Rejeb, I., Yahia, I. S., Hussein, O. A., Szczepaniak, O. M., & Boughattas, A. (2024). Green synthesis of hexagonal-like ZnO nanoparticles modified with phytochemicals of clove (*Syzygium aromaticum*) and *Thymus capitatus* extracts: Enhanced antibacterial, antifungal, and antioxidant activities. *Materials*, 17(17), 4340.
- Hamrayev, H., Shameli, K., & Korpayev, S. (2021). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles and its biomedical applications: A review. *Journal of Research in Nanoscience and Nanotechnology*, 1(1), 62–74.  
<https://doi.org/10.37934/jrnn.1.1.6274>
- Hanafy, M. S., Abdel Fadeel, D. A., Elywa, M. A., & Kelany, N. A. (2020). Green synthesis and characterization of TiO<sub>2</sub> nanoparticles using Aloe vera extract at different pH values. *Scientific Journal of King Faisal University: Basic and Applied Sciences*, 21(1), 103–110.  
<https://doi.org/10.37575/b/sci/2020>
- Harborne, J. B. (1998).** *Phytochemical methods: A guide to modern techniques of plant analysis (3rd ed.)*. Springer Science & Business Media.
- Harish, V., Tewari, D., Gaur, M., Yadav, A. B., Swaroop, S., Bechelany, M., & Barhoum, A. (2022). Review on nanoparticles and nanostructured materials: Bioimaging, biosensing, drug delivery, tissue engineering, antimicrobial, and agro-food applications. *Nanomaterials*, 12(3), 457.  
<https://doi.org/10.3390/nano12030457>
- Hoque, M. A., & Yao, C.-W. (2025). Nanoscale characterization of nanomaterial-based systems: Mechanisms, experimental methods, and challenges in probing corrosion, mechanical, and tribological properties. *Nanomaterials*, 15(23), 1824. <https://doi.org/10.3390/nano15231824>

- Hulla, J. E., Sahu, S. C., & Hayes, A. W. (2015). Nanotechnology: History and future. *Human & Experimental Toxicology*, 34(12), 1318–1321.  
<https://doi.org/10.1177/0960327115573439>
- Ibrahim, D., Abdelghani, K., Anwagy, S., & Rizkallah, R. (2024). Synthesize iron oxide and zinc oxide nanoparticles using plant extracts. *Alqalam Journal of Medical and Applied Sciences*, 7(1), 11–14.  
<https://doi.org/10.54361/ajmas.2471003>
- Ieracitano, C., Paviglianiti, A., Campolo, M., Hussain, A., Pasero, E., & Morabito, F. C. (2021). A novel automatic classification system based on hybrid unsupervised and supervised machine learning for electrospun nanofibers. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(1), 64–76.  
<https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003387>
- Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A., & Bukhari, A. (2020). Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 13(3), 223–245. <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1802517>
- Ingale, A. G., & Chaudhari, A. N. (2013). Biogenic synthesis of nanoparticles and potential applications: An eco-friendly approach. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 4(2), 165.  
<https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000165>
- International Organization for Standardization. (2009). Biological evaluation of medical devices—Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity (ISO Standard No. 10993-5:2009). International Organization for Standardization.  
<https://www.iso.org/standard/36406.html>

- Iravani, S. (2014). Bacteria in nanoparticle synthesis: Current status and future prospects. *International Scholarly Research Notices*, 2014, Article ID 359316, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2014/359316>
- Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 13, 2638–2650. <https://doi.org/10.1039/C1GC15386B>
- Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N. K., & Meena, R. K. (2021). Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(1), 355–374. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01074-x>
- Jayadi, L., Kesuma, S., & Wattiheluw, M. H. (2023). Hand sanitiser activity test of eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) oil extract against *Bacillus subtilis* and *Enterococcus faecalis* bacteria. *Pharmacy Education*, 23(2), 179–183. <https://doi.org/10.46542/pe.2023.232.179183>.
- Jetha, K. L., Vyas, A., Teli, D., Chaudhari, A., Satasiya, R., Patel, V., ... & Apostolopoulos, V. (2024). History of nanoparticles. In *Nanocarrier Vaccines: Biopharmaceutics-Based Fast Track Development* (pp. 1–23). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781394175482.ch1>
- Jia, Z., Li, J., Gao, L., Yang, D., & Kanaev, A. (2023). Dynamic light scattering: A powerful tool for in situ nanoparticle sizing. *Colloids and Interfaces*, 7(1), 15. <https://doi.org/10.3390/colloids7010015>
- Ji, X., Zhang, X., & Zhang, X. (2015). Three-dimensional graphene-based nanomaterials as electrocatalysts for oxygen reduction reaction. *Journal of Nanomaterials*, 2015, Article 357196. <https://doi.org/10.1155/2015/357196>
- Johnston, A. P. R. (2020). Application of nanomaterials in diagnosis and therapy [Review]. *Nanomaterials*, 10, Article 1919. <https://doi.org/10.3390/nano10101919>

- Kale, R., Agnihotri, A., Jagtap, P., & Ali, M. A. (2016). One bath dyeing and water repellent finishing of textile by sol-gel technique. *Journal of Polymer and Textile Engineering*, 3(2), 19–25. <https://doi.org/10.12691/jpte-3-2-3>
- Karakullukcu, A. B., Taban, E., & Ojo, O. O. (2023). Biocompatibility of biomaterials and test methods: A review. *Materials Testing*, 65(4), 545–559. <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0104>
- Karpov, O. E., Grubov, V. V., Maksimenko, V. A., Utashev, N., Semerikov, V. E., Andrikov, D. A., & Hramov, A. E. (2021). Noise amplification precedes extreme epileptic events on human EEG. *Physical Review E*, 103(2), 022310.
- Khan, A., Morsy, M., Al-Muhimeed, T., & Ahmad, N. (2021). Techniques for the formation of metal nanoparticles and fabrication of nanomaterials using pulsed-laser ablation in liquids (PLAL) and pulsed-laser ablation deposition (PLAD). Retrieved from <https://www.researchgate.net/search?q=Pulsed+Laser+Ablation+in+Liquids+Metal+Nanoparticles+Khan>
- Klymchenko, A. S. (2023). Brightness of fluorescent organic nanoparticles: Tutorial review. *Chemical Society Reviews*, 52, 4525–4548. <https://doi.org/10.1039/d2cs00464j>
- Krishnakumar, V., & Elansezhian, R. (2022). Dispersion stability of zinc oxide nanoparticles in an electroless bath with various surfactants. *Materials Today: Proceedings*, 51, 369–373. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.46>

Krishnamoorthy, R., Athinarayanan, J., Periyasamy, V. S., Alshuniaber, M. A., Alshammari, G., Hakeem, M. J., Ahmed, M. A., & Alshatwi, A. A. (2022). Antibacterial mechanisms of zinc oxide nanoparticle against bacterial food pathogens resistant to beta-lactam antibiotics. *Molecules*, 27(8), 2489.

<https://doi.org/10.3390/molecules27082489>

Lee, Y. S., Sun, Y. K., Ota, S., Miyashita, T., & Yoshio, M. (2002). Preparation and characterization of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  prepared by ammonia concentration control. *Electrochemistry Communications*, 4(12), 989–994.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388248102004915>

Lembke, S., & Klemke, B. (2025). A multifunctional toolbox of nanocarriers: Updated classification, applications and challenges. *Journal of Nanobiotechnology*, 23, Article 113. [https://doi.org/10.1186/s12951-025-](https://doi.org/10.1186/s12951-025-03113-7)

[03113-7](https://doi.org/10.1186/s12951-025-03113-7)

Li, Y., Zhang, Y., Yan, B., & others. (2012). Nanotoxicity and nanoparticle safety in biomedical designs. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(3), 3788–3809.

Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2023). Emerging applications of nanotechnology in healthcare and medicine. *Molecules*, 28(18), 6624.

<https://doi.org/10.3390/molecules28186624>

Mallikarjunaswamy, C., Ranganatha, V. L., Ramu, R., Udayabhanu, & Nagaraju, G. (2020). Facile microwave-assisted green synthesis of ZnO nanoparticles: Application to photodegradation, antibacterial and antioxidant. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 1004–1021. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02612-2>

Manawi, Y. M., Ihsanullah, Samara, A., Al-Ansari, T., & Atieh, M. A. (2018). A review of carbon nanomaterials' synthesis via the chemical vapor deposition (CVD) method. *Materials*, 11(5), 822.

<https://doi.org/10.3390/ma11050822>

Manjunatha, S. B., Biradar, D. P., & Aladakatti, Y. R. (2016). Nanotechnology and its applications in agriculture: A review. *Journal of Farm Sciences*, 29(1), 1–13.

[https://www.researchgate.net/publication/303665019\\_Nanotechnology\\_and\\_its\\_applications\\_in\\_agriculture\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/303665019_Nanotechnology_and_its_applications_in_agriculture_A_review)

Mathur, P., & Pillai, S. (2025). Fungi-mediated nanomaterials: Advances, synthesis pathways, and limitations. *Fungal Biology Reviews*, 54, 100445.

<https://doi.org/10.1016/j.fbr.2025.100445>

McGrail, S. (2010). Nano dreams and nightmares: Emerging technoscience and the framing and (re)interpreting of the future, present and past. *Journal of Futures Studies*, 14(4), 23–48. Retrieved from

<https://jfsdigital.org/articles-and-essays/2010-2/vol-14-no-4-june/article/nano-dreams-and-nightmares-emerging-technoscience-and-the-framing-and-reinterpreting-of-the-future-present-and-past>

Mekuye, B., & Abera, B. (2023). Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications. *Nano Select*, 4, 486–501.

<https://doi.org/10.1002/nano.202300038>

Molla, A., Hoque, M. M., Richi, F. T., Kabir, M. H., Alam, S., Ahmed, N. U., Emon, N. U., Shao, C., Zeng, C., Wang, S., Geng, P., & Al Mamun, A. (2025). Biosynthesis and characterization of ZnO nanoparticles using *Citrus reticulata* peel followed by photocatalytic, antibacterial, and antioxidative nanotherapeutic attributes assessment supported by computer simulation. *International Journal of Nanomedicine*, 20, 4803–4829. <https://doi.org/10.2147/IJN.S493905>

Mourdikoudis, S., Pallares, R. M., & Thanh, N. T. K. (2018). Characterization techniques for nanoparticles: Comparison and complementarity upon studying nanoparticle properties. *Nanoscale*, 10, 12871–12934. <https://doi.org/10.1039/C8NR02278J>

Munir, N., Gulzar, W., Abideen, Z., Hasanuzzaman, M., El-Keblawy, A., & Zhao, F. (2023). Plant–nanoparticle interactions: Transcriptomic and proteomic insights. *Agronomy*, 13(8), 2112. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082112>

Naito, M., Yokoyama, T., Hosokawa, K., & Nogi, K. (Eds.). (2018). *Nanoparticle technology handbook*. Elsevier.

Nwankwo, C. E., Adewuyi, A., & Osho, A. (2023). An overview of nanoparticle properties and their bioactivity. *International Journal of Biochemistry Research & Review*, 32(5), 12–39. <https://doi.org/10.9734/IJBCRR/2023/v32i5814>

Ortiz Ortega, E., Hosseinian, H., Rosales López, M. J., Rodríguez Vera, A., & Hosseini, S. (2022). Characterization techniques for morphology analysis. In *Material Characterization Techniques and Applications* (pp. 1–45). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-9569-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-9569-8_1)

- Oueldkiar, R., Kirouani, A., & Boukhalfoun, L. (2023). Phytochemical analysis and antibacterial activity of methanolic and aqueous extracts of *Eucalyptus blakelyi* and *Eucalyptus cladocalyx* leaves. *Natural Resources and Sustainable Development*, 13(2), 235–246.  
<https://doi.org/10.31924/nrsd.v13i2.131>
- Ogunyemi, S. O., Abdallah, Y., Zhang, M., Fouad, H., Hong, X., Ibrahim, E., Masum, M. M. I., Hossain, A., Mo, J., & Li, B. (2019). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using different plant extracts and their antibacterial activity against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 47(1), 341–352. <https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1557671>
- Padmanaban, S., Pully, D., Samrot, A. V., Gosu, V., Sadasivam, N., Park, I. K., ... Kim, D. K. (2023). Rising influence of nanotechnology in addressing oxidative stress-related liver disorders. *Antioxidants*, 12(7), 1405. <https://doi.org/10.3390/antiox12071405>
- Parvin, N., Joo, S. W., & Mandal, T. K. (2025). Nanomaterial-Based Strategies to Combat Antibiotic Resistance: Mechanisms and Applications. *Antibiotics*, 14(2), 207. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14020207>
- Patil, S. P., & Burungale, V. V. (2020). Physical and chemical properties of nanomaterials. In *Nanomedicines for Breast Cancer Theranostics* (pp. 17–31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820016-2.00002-1>
- Pehlivanoglu, S., Acar, C. A., & Donmez, S. (2023). Characterization of green synthesized flaxseed zinc oxide nanoparticles and their cytotoxic, apoptotic and antimigratory activities on aggressive human cancer cells. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 53(9), 1022–1031.  
<https://doi.org/10.1080/24701556.2021.1980034>

- Peskersoy, C., & Culha, O. (2017). Comparative evaluation of mechanical properties of dental nanomaterials. *Journal of Nanomaterials*, 2017(1), 6171578. <https://doi.org/10.1155/2017/6171578>
- Piro, N. S., Hamad, S. M., Mohammed, A. S., & Barzinjy, A. A. (2022). Green synthesis magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles from *Rhus coriaria* extract: A characteristic comparison with a conventional chemical method. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 22(2), 308–317. <https://doi.org/10.1109/TNB.2022.3187344>
- Polonini, H. C., Taylor, S., & Silva, C. C. V. (2024). Exploring the physicochemical compatibility of minoxidil in combination with different active pharmaceutical ingredients in ready-to-use vehicles for alopecia treatment. *Current Drug Delivery*. Bentham Science Publishers. <https://doi.org/10.2174/0115672018327249241217163930>
- Ragavi, K., & Bagirathy, V. (2023). Constructing data models based on industry oriented technical up-gradation. *E3S Web of Conferences*, 470, 01079. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202347001079>
- Rahman, S., & Lu, Y. (2022). Nano-engineering and nano-manufacturing in 2D materials: Marvels of nanotechnology. *Nanoscale Horizons*, 7(8), 849–872. <https://doi.org/10.1039/D2NH00268G>
- Rai, M., Zimudzi, T. J., Durakova, M., Ingle, A. P., & Placha, D. (2024). Photo-catalytic and biological applications of phyto-functionalized zinc oxide nanoparticles synthesized using a polar extract of *Equisetum diffusum* D. *RSC Advances*, 14(35), 20918–20933. <https://doi.org/10.1039/D4RA03573A>

- Ratner, B. D., & Schoen, F. J. (2020). The concept and assessment of biocompatibility. In *Biomaterials Science* (pp. 843–849). Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816137-1.00046-5>
- Raza, N., & Pervaiz, S. (2025). Strategic framework for sustainable nanoparticle synthesis: From physical and green routes to machine learning optimization (Preprint). ChemRxiv.  
<https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2025-2jbg2>
- Robinson, H., Dong, H., & Koenig, G. M. (2015). Tuning solution chemistry for morphology control of lithium-ion battery precursor particles. *Powder Technology*, 284, 225–230.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591015300989>
- Sadiq, M. U., Shah, A., Haleem, A., Shah, S. M., & Shah, I. (2023). Eucalyptus globulus mediated green synthesis of environmentally benign metal based nanostructures: A review. *Nanomaterials*, 13(13), 2019.  
<https://doi.org/10.3390/nano13132019>
- Scherrer, P. (1918). Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1918, 98–100.
- Sajid, M., & Płotka-Wasyłka, J. (2020). Nanoparticles: Synthesis, characteristics, and applications in analytical and other sciences. *Microchemical Journal*, 154, 104623.  
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104623>

- Sangeetha, G., Rajeshwari, S., & Venckatesh, R. (2011). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles by *Aloe barbadensis* Miller leaf extract: Structure and optical properties. *Materials Research Bulletin*, 46(12), 2560–2566. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2011.07.046>
- Sannino, D. (2021). Types and classification of nanomaterials. In M. B. Tahir, et al. (Eds.), *Nanotechnology* (pp. 15–38). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-9437-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9437-3_2)
- Saputra, I. S., & Yulizar, Y. (2017). Biosynthesis and characterization of ZnO nanoparticles using the aqueous leaf extract of *Imperata cylindrica* L. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 188, 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/188/1/012004>
- Sarwar, K., Nazli, Z.-i.-H., Munir, H., Aslam, M., & Khalofah, A. (2025). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using *Moringa oleifera* leaf extract, probing antibacterial and antioxidant activities. *Scientific Reports*, 15, 20413. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08839-w>
- Sebei, K., Sakouhi, F., Herchi, W., Khouja, M. L., & Boukhchina, S. (2015). Chemical composition and antibacterial activities of seven *Eucalyptus* species essential oils leaves. *Biological Research*, 48(1), 7. <https://doi.org/10.1186/0717-6287-48-7>,
- Shahid, S., Fatima, U., Sajjad, R., & Khan, S. A. (2019). Bioinspired nanotheranostic agent: Zinc oxide; green synthesis and biomedical potential. *Dig. J. Nanomater. Biostruct*, 14, 1023-1031.
- Shah, S. S., Shaikh, M. N., Khan, M. Y., Alfasane, M. A., Rahman, M. M., & Aziz, M. A. (2021). Present status and future prospects of jute in nanotechnology: A review. *The Chemical Record*, 21(7), 1631–1665. <https://doi.org/10.1002/tcr.202100030>

- Shahzadi, S., Fatima, S., Ain, Q. U., Shafiq, Z., & Janjua, M. R. S. A. (2025). A review on green synthesis of silver nanoparticles (SNPs) using plant extracts: A multifaceted approach in photocatalysis, environmental remediation, and biomedicine. *RSC Advances*, 15, 3858–3903.  
<https://doi.org/10.1039/d4ra07519f>
- Shehab, M. M., & Jebur, E. K. (2025). Utilizing the fundamental Nd:YAG laser for the pulsed laser ablation approach to synthesize zinc oxide nanoparticles. *Iraqi Journal of Science*, 66(8), 3234–3243.  
<https://doi.org/10.24996/ijs.2025.66.8.15>
- Shakorfow, A. M., Najm, Z. A., Al Mhanna, N., Hassan, A. K., & Atiya, M. A. (2023). Green fabrication and characterization of zinc oxide nanoparticles using eucalyptus leaves for removing acid black 210 dye from an aqueous medium. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 19(3), 23–32.  
<https://doi.org/10.22153/kej.2023.02.00>
- Siddique, I. M. (2024). Exploring functional groups and molecular structures: A comprehensive analysis using FTIR spectroscopy. *Development*, 1(2). <https://doi.org/10.1234/development.2024.12>
- Siripireddy, B., & Mandal, B. K. (2017). Facile green synthesis of zinc oxide nanoparticles by *Eucalyptus globulus* and their photocatalytic and antioxidant activity. *Advanced Powder Technology*, 28(3), 785–797.  
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.11.026>
- Singh, A. R., Desu, P. K., Nakkala, R. K., Kondi, V., Devi, S., Alam, M. S., ... & Kesharwani, P. (2021). Nanotechnology-based approaches applied to nutraceuticals. *Drug Delivery and Translational Research*, 1–15.  
<https://doi.org/10.1007/s13346-021-01042-3>

- Silva, V. D., Oliveira, J. R., Nunes, M. R., & de Azeredo, H. M. (2023). Nanotechnology in packaging for food industry: Past, present, and future. *Coatings*, 13(8), 1411. <https://doi.org/10.3390/coatings13081411>
- Singh, J., Dutta, T., Kim, K.-H., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P. (2018). Green synthesis of metals and their oxide nanoparticles: Applications for environmental remediation. *Journal of Nanobiotechnology*, 16, 84. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0408-4>
- Singh, Jagpreet, Kaur, Sukhmeen, Kaur, Gaganpreet, Basu, Soumen and Rawat, Mohit. "Biogenic ZnO nanoparticles: a study of blueshift of optical band gap and photocatalytic degradation of reactive yellow 186 dye under direct sunlight" *Green Processing and Synthesis*, vol. 8, no. 1, 2019, pp. 272-280. <https://doi.org/10.1515/gps-2018-0084>
- Siyalu, J., & Santhoshkumar, T. (2024). Types and classification of nanomaterials. In E. A. Kumar (Ed.), *Nanomaterials, manufacturing, and environmental applications* (pp. 15–40). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781394164587.ch11>
- Szczyglewska, P., Feliczak-Guzik, A., & Nowak, I. (2023). Nanotechnology—general aspects: A chemical reduction approach to the synthesis of nanoparticles. *Molecules*, 28(13), 4932. <https://doi.org/10.3390/molecules28134932>
- Tazikeh, S., Akbari, A., Talebi, A., & Talebi, E. (2014). Synthesis and characterization of tin oxide nanoparticles via the co-precipitation method. *Materials Science-Poland*, 32(1), 98–101. <https://doi.org/10.2478/s13536-013-0164-y>

Tören, E. (2025). Advances in electrospun nanofibers for scar removal and tissue regeneration. *Tekstil ve Mühendis (Journal of Textiles and Engineer)*, **32**(138), 192–209. <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1651482>

Ullah, S., Gulnaz, A., Anwar, S., Kamal, A., & Wali, H. (2024). Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles by X-ray diffractometry (XRD), Fourier transforms, infra-red spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM) and antibacterial activity test. *American Journal of Physical Sciences*, **2**(1), 1–25. <https://doi.org/10.47604/ajps.2294>.

van Bommel, A., & Dahn, J. R. (2009). Analysis of the growth mechanism of coprecipitated spherical and dense nickel, manganese, and cobalt-containing hydroxides in the presence of aqueous ammonia. *Chemistry of Materials*, **21**(8), 1500–1503. <https://doi.org/10.1021/cm803144>

Varghese, R. J., Parani, S., Thomas, S., Oluwafemi, O. S., & Wu, J. (2019). Introduction to nanomaterials: synthesis and applications. In *Nanomaterials for solar cell applications* (pp. 75-95). Elsevier.

Verma, N., & Kuila, T. (2024). Machine learning applications for electrospun nanofibers: a review. *Journal of Materials Science*, **59**, 14095–14140. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09994-7>

Vogt, C., Wondergem, C. S., & Weckhuysen, B. M. (2023). Ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy. In *Springer handbook of advanced catalyst characterization* (pp. 237–264). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-27344-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-27344-0_10)

Vuong, Q. V., Chalmers, A. C., Bhuyan, D. J., Bowyer, M. C., & Scarlett, C. J. (2015). Botanical, phytochemical, and anticancer properties of the Eucalyptus species. *Chemistry & Biodiversity*, 12(6), 907–924.

<https://doi.org/10.1002/cbdv.201400327>

Wang, X., Sun, G., & Chen, P. (2014). Three-dimensional porous architectures of carbon nanotubes and graphene sheets for energy applications. *Frontiers in Energy Research*, 2, 33.

<https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00033>

Wang, Z., Hu, T., Liang, R., & Wei, M. (2020). Application of zero-dimensional nanomaterials in biosensing. *Frontiers in Chemistry*, 8, Article 00320. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00320>

Wazir, A. H., Khan, Q., Ahmad, A., & Ullah, I. (2024). Antibacterial activity of the chemically synthesized zinc oxide nanoparticles against gram-negative and gram-positive bacteria. *Journal of Materials in Life Sciences*, 3(1), 81–87. <https://doi.org/10.0000/jomalisc.utm.my>

Wirunchit, S., Gansa, P., & Koetniyom, W. (2021). Synthesis of ZnO nanoparticles by ball-milling process for biological applications. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3554–3559.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.619>

Yameny, A. A. (2024). A Comprehensive Review on Nanoparticles: Definition, Preparation, Characterization, Types, and Medical Applications. *Journal of Medical and Life Science*, 6(4), 663-672.

Yuan, J., Cao, J., Yu, F., Ma, J., Zhang, D., Tang, Y., & Zheng, J. (2021). Microbial biomanufacture of metal/metallic nanomaterials and metabolic engineering: Design strategies, fundamental mechanisms, and future opportunities. *Journal of Materials Chemistry B*, 9(33), 6491–6506.

<https://doi.org/10.1039/D1TB00889H>

Yusuf, A., Almotairy, A. R. Z., Henidi, H., Alshehri, O. Y., & Aldughaim, M. S. (2023). Nanoparticles as drug delivery systems: A review of the implication of nanoparticles' physicochemical properties on responses in biological systems. *Polymers*, 15(7), 1596.

<https://doi.org/10.3390/polym15071596>,

Zainon, S. N. M., & Azmi, W. H. (2021). Recent progress on stability and thermo-physical properties of mono and hybrid towards green nanofluids. *Micromachines*, 12(2), 176. <https://doi.org/10.3390/mi12020176>

Zhang, P., Lynch, I., Handy, R. D., & White, J. C. (2023). A brief history of nanotechnology in agriculture and current status. In P. Zhang, I. Lynch, R. D. Handy, & J. C. White (Eds.), *Nano-enabled sustainable and precision agriculture* (pp. 3–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91233-4.00002-8>

Zhao, C., Zhang, Z., & Zhang, X. (2018). Nanotechnology in energy.

*Frontiers in Energy*, 12(1), 1–4. <https://doi.org/10.1007/s11708-018-0544-4>

Zhang, Y., Liu, X., & co-authors. (2022). Compressible, superelastic and fatigue resistant carbon nanofiber aerogels derived from bacterial cellulose for multifunctional piezoresistive sensors. *Carbon*, 199, 318–328.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.08.006>

## Abstract

Green chemistry has gained growing attention in recent years as a sustainable and efficient method for synthesizing nanoparticles. This study focused on the preparation and characterization of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using an aqueous eucalyptus leaf extract as a natural reducing agent. In addition, their biological activities—including cytotoxic, antioxidant, and antibacterial effects—were evaluated. The bioactive compounds present in the aqueous eucalyptus leaf extract were identified through chemical analysis and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The findings confirmed the presence of flavonoids, tannins, saponins, terpenoids, and coumarins, which are believed to play a key role as both reducing and stabilizing agents in the green synthesis of zinc oxide nanoparticles. Zinc oxide nanoparticles synthesized using aqueous eucalyptus leaf extract were characterized through several analytical techniques, including Ultraviolet–Visible (UV–Vis) spectroscopy, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), Dynamic Light Scattering (DLS), zeta potential analysis, and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM).

The UV–Vis spectrum displayed a distinct absorption peak at 364 nm. FTIR analysis verified the formation of crystalline ZnO by revealing Zn–O stretching vibrations within the range of 585–725  $\text{cm}^{-1}$ . The findings further indicated that the nanoparticles were highly pure, exhibited a semi-spherical crystalline morphology, and had an average size of approximately 22.09 nm, along with a zeta potential of  $-11.8 \pm 7.30$  mV. DLS measurements showed a hydrodynamic diameter of about 131.5 nm. The antioxidant potential of both the zinc oxide nanoparticles and the eucalyptus leaf extract was assessed using the DPPH assay, while antibacterial activity was evaluated against Gram-positive bacteria (*Staphylococcus*) and Gram-negative bacteria (*Escherichia coli*). The nanoparticles demonstrated greater free radical scavenging ability compared to the extract and showed strong antibacterial

effects against both types of bacteria. Additionally, their biological activities were found to increase with higher concentrations.

Cytotoxicity assessment using the MTT assay revealed that low concentrations of zinc oxide nanoparticles did not exert harmful effects on human skin fibroblast cells, while higher concentrations produced mild toxicity that increased in a dose-dependent manner.

In conclusion, the results demonstrate that aqueous eucalyptus extract is a valuable source of bioactive compounds and can be effectively utilized for the green synthesis of zinc oxide nanoparticles. The resulting nanoparticles exhibited strong antibacterial and antioxidant properties, along with minimal cytotoxicity, highlighting their promising potential for applications in medical and biological fields.

Republic of Iraq  
Ministry of Higher Education  
and Scientific Research  
University of Misan  
College of Basic Education  
Department of General Sciences



# **Green Synthesis and Characterization of Zinc Oxide Nanoparticles Using Eucalyptus Leaf Extract and Evaluation of Their Biocompatibility and Antioxidant and Antimicrobial Properties .**

**A Thesis Submitted to the Council of the College of Basic Education – University of Misan, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in General Science (Specialization in General Science) .**

**By the student**

**Hussein Ali Muslim**

**Supervised by**

**Prof. Dr. Wasan Jaafar Ibrahim**

**Prof. Dr. Salem Nima Saleh Al-Bukhati**

2026 A.D.

1448 A.H