



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
PEOPLE'S DEMOCRATIC REPUBLIC OF ALGERIA
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة قاصدي مرباح ورقلة
University Kasdi Merbah Ouargla

Faculty of mathematics and Matters science
chemistry department

كلية الرياضيات وعلوم المادة
القسم : الكيمياء
التخصص : كيمياء تحليلية

مذكرة مقدمة ضمن متطلبات نيل شهادة ماستر أكاديمي في الكيمياء

تأثير أكاسيد المعادن النانوية الهجينة ($ZnO + NiO + TiO_2$) المحضرة وفق منهج الكيمياء الخضراء على إنتاج طوب بناء مضاف للبكتيريا والفطريات وصدىق للبيئة

The effect of hybrid nano-metal oxides ($ZnO + NiO + TiO_2$) prepared according to the green chemistry approach on the production of antibacterial, antifungal and environmentally friendly building bricks

تاريخ المناقشة: 2026/06/15

✓ من اعداد الطالبة: زوزو ياسمين

✓ أمام اللجنة المكونة من:

رئيس	أستاذ محاضر أ	زروقي حياة
مناقش	أستاذ تعليم عالي	مقدم خضرة
مشرف	أستاذ تعليم عالي	نجيمي محمد السعيد

السنة الدراسية: 2026/2025



﴿وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾

الحمد لله الذي أنار لنا دروب العلم والمعرفة، ووفقنا لما فيه الخير والنجاح،
وأمدنا بالقوة والصبر والعزيمة حتى بلغنا هذه المرحلة من مسيرتنا العلمية.
الحمد لله على نعمه الظاهرة والباطنة، وعلى فضله الذي لا ينقطع، وعلى
توفيجه الذي كان خير معين في إتمام هذا العمل المتواضع.
فما كان لهذا الجهد أن يكتمل لولا عون الله وتيسيره، وما كان لهذا الحلم أن
يتحقق لولا فضله ورحمته.

نسأل الله تعالى أن يجعل هذا العمل خالصًا لوجهه الكريم، وأن ينفع به، وأن
يبارك في العلم وأهله، وأن يوفقنا لمزيد من النجاح والعطاء.
والحمد لله أولًا وآخرًا، ظاهرًا وباطنًا، والحمد لله رب العالمين.

الوفاء

لم يكن هذا الطريق سهلا ولم تكن مجرد شهادة.....

كانت معركة صامته...

مع التعب والخوف .اللحظات التي كنت فيها وحدي بكيت ومسحت دموعي دون احد ان يعلم

مشيت خطوات فيها خطوة واحدة فقط لكنني لم اتوقف

وأمام هذا النجاح لا يسعني الا ان أتوجه بإهدائي....

الى أمي....

كانت كلماتك دعواتك لم تفارقني طيلة وحدتي ..لم تكوني السند فقط كنت أنيستي في خطواتي

الى أبي....

الذي احمل اسمه ...بره... الى الذي علمني معنى المسؤولية و ان الدنيا كفاح والقوة تعني الثبات..

أختي....

الى من كاتفتني علمتني ان العطاء ليس له حدود نصفي الثاني وحيديتي اللهم لطفًا بقلبها وصحتها

الى اخوتي....

ضلعي الثابت.. الى من شددت عضدي بهم ..عبد الرؤوف مقدي نضال سراج الدين..

الى الذي لم يكن مجرد شخص في حياتي كان سندي في كل لحظة ضعف.

اختاره القلب ومال اليه الفؤاد...

الى صغيرتي التي كانت دائما جزءا من رحلاتي.....

أطفالي....

صهيب ندى فتح الله بصيرتهم ووقفهم لمراتب عليا ونجاحات..

الى أهلي....

كل باسمه جداتي رزقك الله زيارة بيته... الى أعمامي عماتي خالي خالاتي اطال الله اعمارهم ورزقهم الصحة والعافية

الى صديقات عمري اخواتي بكن تكتمل فرحتي كنتن خير مؤنسات وسند يامن قاسمتومني اللحظات الصعبة.

الى كل من مد لي يد العون وكان جانبي لكم مني كل الحب والامتنان

الشكر والتقدير

بكل مشاعر الامتنان والعرفان أتقدم بخالص الشكر والتقدير الى

الأستاذ المشرف محمد السعيد النجيمي

كان السند في هذه المسيرة فلم يبخل لا بالعلم ولا بالتوجيهات القيمة كان مصدر دعم

وثقة

جزاه الله عني خير الجزاء

كما اتوجه بجزيل الشكر الى أساتذتي الذين كان لهم الفضل في تكويني العلمي

ولا يفوتني أن اعبر عن امتناني لكل من مد يد العون وساهم ولو بكلمة طيبة

او دعوة خير في انجاح هذا العمل

وفي الختام اسأل الله أن يجزي كل من ساعدني خير الجزاء

وان يجعل هذا العمل ثمرة خير وبركة في مستقبلي....

المخلص :

شهد التصنيع الأخضر للجسيمات النانوية في الآونة الأخيرة اهتماماً واسعاً، نظراً لكونه طريقة صديقة للبيئة تساهم في التقليل من التأثيرات السامة الناتجة عن طرق التحضير الكيميائية التقليدية، إضافة إلى ما تتميز به الجسيمات النانوية من خصائص فيزيائية وكيميائية مميزة.

وهو ما سعينا إليه في هذه الدراسة، حيث قمنا بالتصنيع الأخضر لأكاسيد معدنية نانوية هجينة تتمثل في ZnO و NiO و TiO₂ باستعمال المستخلص المائي لنبات السدر، ثم تم دمجها في طوب بناء بيئي بهدف تحسين خصائصه ومنحه نشاطاً مضاداً للبكتيريا والفطريات. كما تم تشخيص الجسيمات النانوية وتحديد خصائصها باستعمال عدة تقنيات تحليلية تتمثل في التحليل الطيفي بالأشعة فوق البنفسجية والمرئية UV-Visible ، والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FTIR ، وحيود الأشعة السينية DRX ، إضافة إلى المجهر الإلكتروني الماسح MEB. وقد أظهرت النتائج نجاح عملية التحضير وتكوّن جسيمات نانوية ذات طبيعة بلورية جيدة وفعالية واعدة في التطبيقات البيئية ومواد البناء المستدامة.

الكلمات المفتاحية: التصنيع الأخضر، الجسيمات النانوية، ZnO، NiO، TiO₂، نبات السدر، الطوب البيئي، مضادات البكتيريا والفطريات.

Abstract

Green synthesis of nanoparticles has recently attracted wide attention due to its environmentally friendly nature and its ability to reduce the toxic effects caused by conventional chemical synthesis methods. In addition, nanoparticles possess remarkable physical and chemical properties that make them highly promising in several applications.

In this study, hybrid metal oxide nanoparticles including ZnO, NiO, and TiO₂ were synthesized using a green synthesis approach based on the aqueous extract of *Ziziphus spina-christi*. The synthesized nanoparticles were incorporated into eco-friendly construction bricks in order to improve their properties and provide antibacterial and antifungal activity. The obtained nanoparticles were characterized using several analytical techniques including UV-Visible spectroscopy, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray Diffraction (XRD/DRX), and Scanning Electron Microscopy (SEM/MEB). The results confirmed the successful synthesis of nanoparticles with good crystalline structure and promising efficiency for environmental and sustainable building material applications.

Keywords: Green synthesis, nanoparticles, ZnO, NiO, TiO₂, *Ziziphus spina-christi*, eco-friendly bricks, antibacterial, antifungal.

الفهرس

المحتويات

4.....	الفصل الأول : تقنية النانو وأكاسيد المعادن النانوية.....	I
5.....	مقدمة:	I
5.....	1.1 مفهوم النانو :	1.1
	1.2 تقنية النانو : 5	
	1.3 المواد النانوية: 6	
6.....	1.3.1 الجسيمات النانوية:	
7.....	1.4 تصنيفات الجسيمات النانوية:	
7.....	1.4.1 تصنيف الجسيمات النانوية بناءً على أبعادها:	
8.....	1.4.2 تصنيف الجسيمات النانوية بناءً على تركيبها الكيميائي:	
11.....	1.5 الخصائص العامة للجسيمات النانوية:	
11.....	1.5.1 الخصائص البصرية:	
11.....	1.5.2 الخصائص السطحية:	
11.....	1.5.3 الخصائص الميكانيكية:	
12.....	1.5.4 الخصائص الكهربائية:	
12.....	1.5.5 الخصائص التحفيزية:	
12.....	1.6 استراتيجيات تخليق (تصنيع) الجسيمات النانوية:	
13.....	1.6.1 نهج من الأعلى إلى الأسفل (Top-down) :	
13.....	1.6.2 نهج من الأسفل إلى الأعلى (Bottom-up) :	
13.....	1.6.3 التحلل الحراري (Thermal decomposition) :	
13.....	1.6.4 سول-جيل (Sol-gel) :	
14.....	1.6.5 التخليق الحيوي (Biosynthesis) :	
14.....	1.6.6 الاستئصال بالليزر (Laser ablation) :	
15.....	1.7 الأكاسيد المعدنية النانوية:	

15.....	1.7.1	جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO) :
17.....	1.7.2	جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO ₂) :
18.....	1.7.3	جسيمات أكسيد النيكل النانوية (NiO) :
21.....	1.8	طرق تشخيص الأكاسيد النانوية:
22.....	1.8.1	حيود الأشعة السينية (DRX) :
22.....	1.8.2	مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) :
23.....	1.8.3	مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis) :
23.....	1.8.4	مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDS) :
23.....		المبدأ العام:
24.....	1.8.5	المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) :
36.....		مقدمة:
36.....	II.1	التعريف بنبات السدر:.....
36.....	II.1.1	الاسم العلمي والتصنيف النباتي:
37.....	II.1.2	الوصف النباتي لنبات السدر:
37.....	II.1.3	التركيب الكيميائي لنبات السدر:
38.....	II.1.4	أماكن التواجد والانتشار:
38.....	II.1.5	التطبيقات الحديثة لنبات السدر:
		39 خلاصة:
44.....	III	مقدمة:
44.....	III.1	نبات السدر (<i>Ziziphus spina-christi</i>) :
	III.2	البروتوكول التجريبي للتصنيع الأخضر للأكاسيد الثلاثة : 45
	III.2.1	المواد المستخدمة : 45
	III.2.2	تحضير المستخلص المائي لنبات السدر : 45
47.....	III.2.3	تصنيع جسيمات أكسيد الزنك النانوية ZNO NPS :
48.....	III.2.4	تحضير جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم TIO ₂ NPs :
49.....	III.2.5	تصنيع جسيمات أكسيد النيكل NiO NPs :
	III.3	دراسة النشاط المضاد للبكتيريا : 50
51.....	III.3.1	بكتيريا <i>Escherichia coli</i> :

51..... : Pseudomonas aeruginosa بكتيريا III.3.2

51..... : Staphylococcus aureus بكتيريا III.3.3

52 : أهمية السلالات البكتيرية المختارة في هذه الدراسة : III.3.4

52..... تقويم النشاط المضاد للبكتيريا للمركبين النانويين A1 و A2 باستعمال تقنية الانتشار في الآبار III.3.5

III.4 النتائج والمناقشة : 54

III.4.1 التشخيص : 54

Madigan, M.T., Bender, K.S., Buckley, D.H., Sattley, W.M., & Stahl, D.A. (2021). Brock Biology .1

71..... of Microorganisms, 16th Edition, Pearson.

Tortora, G.J., Funke, B.R., & Case, C.L. (2021). Microbiology: An Introduction, 13th Edition, .2

71 Pearson.

Wiley, J.M., Sherwood, L.M., & Woolverton, C.J. (2020). Prescott's Microbiology, 11th Edition, .3

71..... McGraw-Hill.

Murray, P.R., Rosenthal, K.S., & Pfaller, M.A. (2023). Medical Microbiology, 10th Edition, .4

71 Elsevier.

قائمة الجداول

الرقم	الجدول	الصفحة
01	جدول 0-1 تصنيف نبات السدر	37
02	جدول 0-2 يوضح أهم المركبات الكيميائية في نبات السدر	38

قائمة الأشكال

الرقم	الشكل	الصفحة
01	الشكل 0-1 النطاق الحجمي للجسيمات النانوية مقارنةً بالتراكيب الكيميائية والبيولوجية الرئيسية (7)	06
02	الشكل 0-2 أمثلة عن المواد النانوية حسب أبعادها	08
03	الشكل 0-3 الجسيمات النانوية العضوية: (A) الدينديمرات؛ (B) الليبوزومات والميسيلات؛ (C) الفيريتين	09
04	الشكل 0-4 الجرافين، والفوليرين، وأنايب الكربون النانوية، وألياف الكربون النانوية، والكربون الأسود [5]	10
05	الشكل 0-5 استراتيجيات تخليق الجسيمات النانوية [19]	12
06	الشكل 0-6 مخطط الاستئصال بالليزر	14
07	الشكل 0-7 (A, b) في شكله الطبيعي و (c) في شكله الاصطناعي	15
08	الشكل 0-8 صورة نبات السدر وأوراقه	45
09	الشكل 0-9 رسم تخطيطي يوضح بروتوكول تحضير مستخلص نبات السدر	46
10	الشكل 0-10 رسم تخطيطي يوضح بروتوكول تحضير جسيمات أكسيد الزنك بواسطة مستخلص أوراق نبات السدر	47
11	الشكل 0-11 رسم تخطيطي يوضح بروتوكول تحضير جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم	48
12	الشكل 0-12 رسم تخطيطي يوضح بروتوكول تحضير جسيمات أكسيد النيكل بواسطة مستخلص نبات السدر	49
13	الشكل 0-13 صورة البروتوكول المتبع لتقييم النشاط المضاد للبكتيريا	53
14	الشكل 0-14 طيف الامتصاص للأشعة المرئية وال فوق بنفسجية لجسيمات أكسيد الزنك المحضرة	54
15	الشكل 0-15 طيف الامتصاص للأشعة المرئية وال فوق بنفسجية لجسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم المحضرة	55
16	الشكل 0-10 طيف الامتصاص للأشعة المرئية وال فوق بنفسجية لجسيمات أكسيد النيكل المحضرة	56
17	الشكل 0-11 طيف FT-IR لجسيمات ZnONPs	57
18	الشكل 11-0 طيف FT-IR لجسيمات TiO2NPs	58
19	الشكل 12-0 طيف FT-IR لجسيمات NiONPs	59
20	الشكل 12-0 طيف DRX لجسيمات ZnONPs	60
21	الشكل 13-0 طيف DRX لجسيمات TiO2ONPs	61
22	الشكل 14-0 طيف DRX لجسيمات NiONPs	62
23	الشكل 15-0 طيف EDX لجسيمات ZnONPs	63
24	الشكل 16-0 طيف EDX لجسيمات TiO2	64
25	الشكل 17-0 طيف EDX لجسيمات NiONPs	65
26	الشكل 18-0 صورة لجسيمات ZnONPs المحضر بالمجهر الإلكتروني الماسح	66
27	الشكل 0-19 صورة لجسيمات TiO2 المحضر بالمجهر الإلكتروني الماسح	66

67	الشكل 0-20 صورة لجسيمات NiNPs المحضر بالمجهر الالكتروني الماسح	28
68	الشكل 0-21 نتائج التثبيط لثلاث أنواع البكتيريا	29
69	الشكل 0-21 نتائج التثبيط لثلاث أنواع من البكتيريا	30

قائمة الرموز

الرمز	
ZnO	أكسيد الزنك
NiO	أكسيد النيكل
TiO ₂	ثاني أكسيد التيتانيوم
1D	الجسيمات النانوية
2D	الجسيمات النانوية ثنائية الأبعاد
3D	الجسيمات النانوية ثلاثية الأبعاد
CVD	الترسيب الكيميائي للبخار
O ²⁻	أكسيد ثنائية التكافؤ السالب
Ti ⁴⁺	أيون التيتانيوم رباعي التكافؤ
DRX	حيود الأشعة السينية
n	رتبة الحيود
λ	الطول الموجي للأشعة السينية (بالأنغستروم)
d	المسافة بين المستويات البلورية
θ	زاوية براج (بالدرجات)
FTIR	مطيافية الأشعة تحت الحمراء
UV-Vis	مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية
A	لامتصاصية (Absorbance)
I	شعاع الضوء الداخل
I ₀	شعاع الضوء الخارج
L	سمك خلية التحليل
ϵ	معامل الامتصاص المولي
C	تركيز المادة الممتصة
EDS	مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة
MEB	المجهر الإلكتروني الماسح
NaOH	هيدروكسيد الصوديوم

مقدمة

يشهد العالم في السنوات الأخيرة تطوراً ملحوظاً في مجال علوم المواد، خاصة مع بروز تكنولوجيا النانو التي فتحت آفاقاً واسعة لتصميم مواد جديدة ذات خصائص محسنة تلبي متطلبات العصر الحديث. ومن بين هذه المواد، تحظى الأكاسيد المعدنية النانوية باهتمام كبير نظراً لما تتميز به من خصائص فيزيائية وكيميائية فريدة، مثل النشاط السطحي العالي والقدرة على إظهار خصائص مضادة للكائنات الدقيقة. في هذا السياق، برزت الحاجة إلى تطوير مواد بناء ذكية تجمع بين المتانة والوظائف الصحية، خاصة في ظل تزايد المخاطر المرتبطة بالتلوث الميكروبي وتأثيراته على صحة الإنسان. ويُعد إدماج الجسيمات النانوية، مثل أكسيد الزنك (ZnO)، وأكسيد النيكل (NiO)، وثاني أكسيد التيتانيوم (TiO₂)، ضمن مواد البناء من الحلول الواعدة نظراً لقدرتها على إضفاء خصائص مضادة للبكتيريا والفطريات. من جهة أخرى، يتماشى هذا التوجه مع مبادئ الكيمياء الخضراء التي تهدف إلى تقليل الأثر البيئي للعمليات الكيميائية من خلال اعتماد طرق تحضير صديقة للبيئة، مثل استخدام المستخلصات النباتية بدل المواد الكيميائية الضارة. وهو ما يساهم في إنتاج مواد مستدامة تحافظ على البيئة وصحة الإنسان في آنٍ واحد.

انطلاقاً من هذه المعطيات، تتمحور إشكالية هذا البحث حول مدى فعالية الأكاسيد المعدنية الثنائية أو الهجينة (ZnO + NiO + TiO₂) المحضرة وفق منهج الكيمياء الخضراء في تحسين خصائص الطوب، خاصة من حيث مقاومة الكائنات الدقيقة، مع الحفاظ على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمادة. وتهدف هذه الدراسة إلى تحضير هذه الأكاسيد النانوية باستخدام طرق صديقة للبيئة، ثم توصيفها باستخدام تقنيات تحليل مناسبة، ودراسة تأثير إدماجها في مواد البناء على الخصائص المضادة للبكتيريا والفطريات، بالإضافة إلى تقييم أدائها كمواد بناء مبتكرة وصديقة للبيئة.

ولتحقيق هذه الأهداف، تم دراسة تحضير جسيمات أكسيد الزنك وأكسيد النيكل وثاني أكسيد التيتانيوم عن طريق التصنيع الأخضر باستخدام مستخلص نبات السدر وتحسين أدائها حيث قسمت هذه الدراسة إلى قسمين :

مقدمة عامة

✓ الجزء النظري :

- **الفصل الاول :** تمحور حول تقنية النانو من حيث المفهوم ،مبادئ أساسية ،الخصائص، طرق التحضير ، والتطبيقات. مع دراسة الأكاسيد الثلاثة أكسيد الزنك ،أكسيد النيكل ، ثاني أكسيد التيتانيوم.

- **الفصل الثاني :** شمل هذا الفصل نبات السدر وخصائصه ودوره في التخليق الأخضر

✓ الجزء التطبيقي :

تم فيه التحضير الأخضر للأكاسيد الثلاثة ، ودراسة نشاطها المضاد للبكتيريا والفطريات ، في حين يعرض النتائج المتحصل عليها ومناقشتها، قبل اختتام العمل بخاتمة عامة.

الجزء النظري

الفصل الأول : تقنية النانو وأكاسيد المعادن النانوية

1 مقدمة :

علم النانو وتكنولوجيا النانو، اللذان يُشار إليهما غالبًا بمصطلحي " Nano science " أو " nanotechnology "، هما ذلك العلم والهندسة اللذان يُطبَّقان على المواد متناهية الصغر (التي يتراوح حجمها بين 1 و100 نانومتر) بهدف دفع عجلة التقدم العلمي. يُعد علم النانو وتكنولوجيا النانو اليوم من بين أكثر مجالات البحث الواعدة في علوم المواد. وقد أثبت هذا المجال أنه يؤدي دورًا مهمًا في العديد من التخصصات، مما جعله أكثر الحقول العلمية ابتكارًا. في الآونة الأخيرة، لفتت المواد متناهية الصغر انتباه العديد من الباحثين بسبب خصائصها المتميزة والاستثنائية مقارنة بالشكل الكتلي للمادة نفسها. وهذه الخصائص الفريدة تجعل عالم المواد متناهية الصغر مجالًا بحثيًا دائم التطور، من خلال السعي المستمر لابتكار تقنيات جديدة لإنتاج هذه المواد متناهية الصغر بشكل مضبوط الحجم والشكل.

1.1 مفهوم النانو :

يُشتق مصطلح "نانو" من الكلمة اليونانية التي تعني "قزم" أو "شيء بالغ الصغر"، ويُستخدم في النظام المتري كبادئة للدلالة على جزء من المليار (10⁻⁹ - 10⁻¹⁰) [1]. وفي هذا السياق، يُعرف علم النانو بأنه الفرع العلمي المعني بدراسة واستكشاف وفهم خصائص المواد التي تقع أبعادها ضمن المقياس النانومتري، والذي يتراوح بين 1 و100 نانومتر [2]

1.2 تقنية النانو:

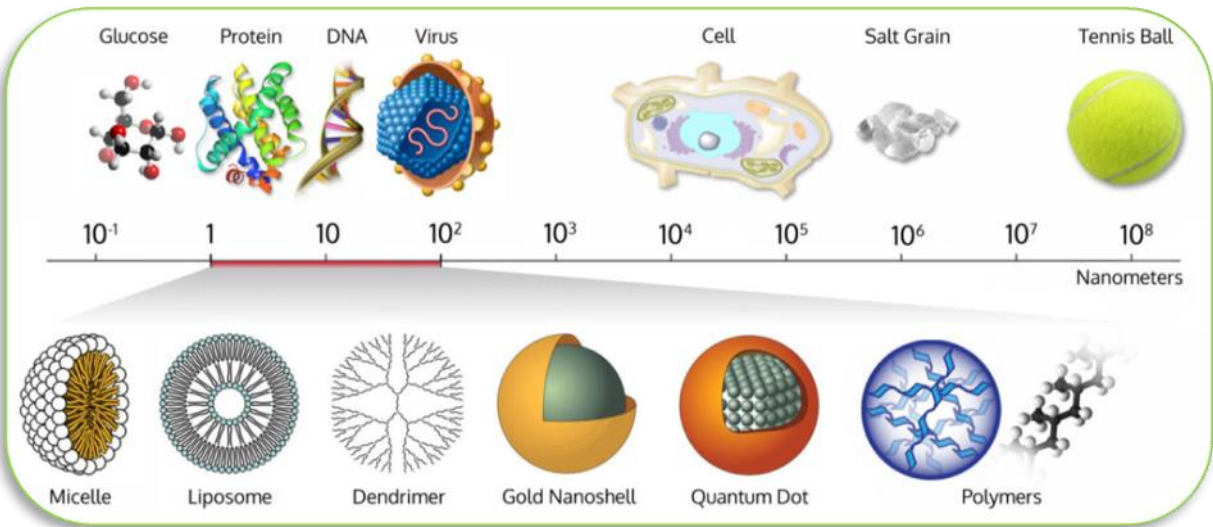
تُعرَّف تكنولوجيا النانو بأنها القدرة على ابتكار تراكيب جديدة على المستوى الأصغر حجمًا، باستخدام الأدوات والتقنيات لفهم المواد والتحكم فيها على المقاييس النانومترية التي تتراوح بين 1 و100 نانومتر، وذلك بهدف الاستفادة الكاملة من خصائصها الاستثنائية واستخدامها في مجموعة واسعة من المجالات [3].

1.3 المواد النانوية:

تُعرَّف المواد النانوية بشكل شائع بأنها المواد التي يقل متوسط حجم حبيباتها عن 100 نانومتر. تتميز المواد النانوية بأحجام متناهية الصغر حيث يكون بعد واحد على الأقل ضمن المدى النانومتري. تُنتج المواد النانوية إما من خلال تنظيم مجموعة من الذرات أو الجزيئات، أو عن طريق تقنيت مادة ذات أبعاد كبيرة (ميكروسكوبية)، ويمكن أن تتخذ أشكالاً مختلفة مثل (الكروية، الصفائحية، الأنبوبية، متعددة السطوح، إلخ) [4]. وقد لفتت المواد النانوية انتباه العديد من الباحثين نظراً لخصائصها المميزة في المجالات الميكانيكية والبيولوجية والكهربائية والبصرية مقارنة بنظيراتها ذات الحجم الكتلّي [5].

1.3.1 الجسيمات النانوية:

تُعرف الجسيمات النانوية بأنها تجمع من الذرات يقل بعد واحد منها على الأقل عن 100 نانومتر. ويمكن أن تُصنع من الكربون أو المعادن أو أكاسيد المعادن أو المواد العضوية [6]. وبالمقارنة مع التراكيب العضوية الطبيعية، فإن الجسيمات النانوية تقع في الغالب ضمن النطاق الحجمي المطابق للبروتينات [7]. تُظهر الجسيمات النانوية خصائص فيزيائية وكيميائية وبيولوجية محسّنة مقارنة بنظيراتها ذات المقاييس الأكبر، ويعود ذلك إلى ارتفاع نسبة مساحة السطح إلى الحجم، وزيادة التفاعلية الكيميائية والثبات، وارتفاع القوة الميكانيكية، وعوامل أخرى [8]. وهذه الخصائص الفريدة تجعلها مواد جذابة للغاية لاستخدامها في مجموعة متنوعة من المجالات مثل مستحضرات التجميل والطب والتكنولوجيا الحيوية والكيمياء والزراعة [9].



الشكل I-1 النطاق الحجمي للجسيمات النانوية مقارنةً بالتراكيب الكيميائية والبيولوجية الرئيسية (7)

1.4 تصنيفات الجسيمات النانوية:

يمكن تصنيف الجسيمات النانوية بناءً على مصدرها (طبيعي أو بشري المنشأ)، وأبعادها، وتركيبها الكيميائي [10]

1.4.1 تصنيف الجسيمات النانوية بناءً على أبعادها:

1.4.1.1 الجسيمات النانوية صفرية الأبعاد:

تُعد الجسيمات النانوية صفرية الأبعاد (0D) من أكثر أنواع المواد متناهية الصغر شيوعًا، حيث تكون جميع أبعادها أصغر من 100 نانومتر. وتعتبر النقاط الكمومية، والكرات المجوفة، والعدسات النانوية من أشهر الأمثلة على هذه الفئة [11]

1.4.1.2 الجسيمات النانوية أحادية البعد:

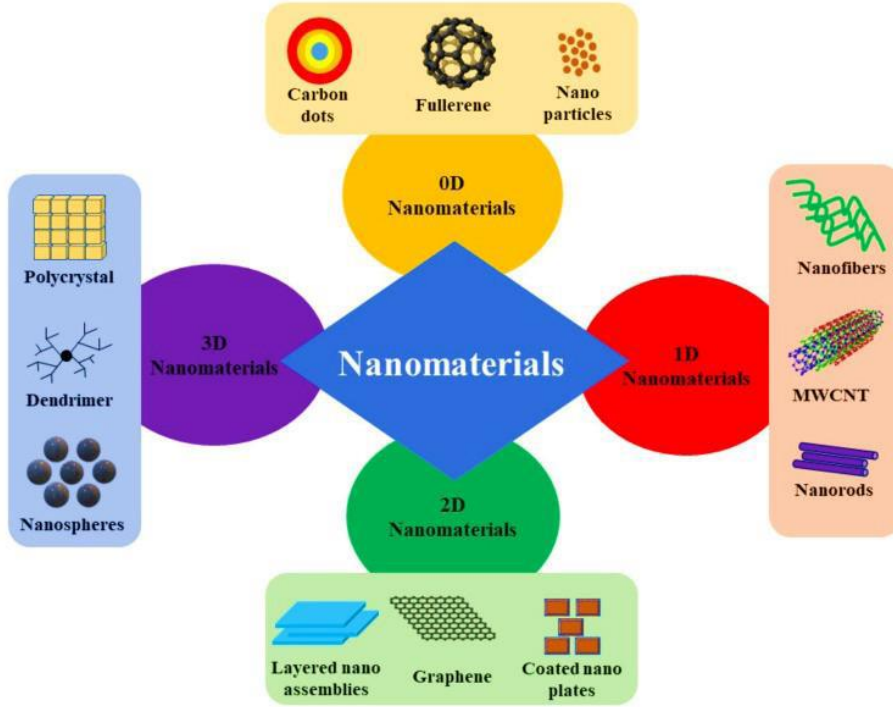
يتميز هذا النوع من الجسيمات النانوية (1D) بوجود بُعد واحد فقط أكبر من 100 نانومتر. ومن أشهر الأمثلة على الجسيمات النانوية أحادية البعد (القضبان النانوية، والأنابيب النانوية، والألياف النانوية) [11]

1.4.1.3 الجسيمات النانوية ثنائية الأبعاد:

الجسيمات النانوية ثنائية الأبعاد (2D) هي مواد لها بُعد واحد في النطاق النانوي، ويُعدان خارج هذا النطاق. وتعتبر الطلاءات النانوية، والأغشية النانوية، والطبقات النانوية من أكثر الأمثلة شيوعًا للجسيمات النانوية ثنائية الأبعاد [11]

1.4.1.4 الجسيمات النانوية ثلاثية الأبعاد:

الجسيمات النانوية ثلاثية الأبعاد (3D) هي مواد تكون أبعادها الثلاثة خارج النطاق النانوي (أكبر من 100 نانومتر)، ولكنها تظهر سمات نانوية داخلية. وتعتبر الهياكل متعددة الطبقات النانوية، والمواد المركبة النانوية، وحزم الألياف النانوية من أكثر الأمثلة شيوعًا للجسيمات النانوية ثلاثية الأبعاد [11].



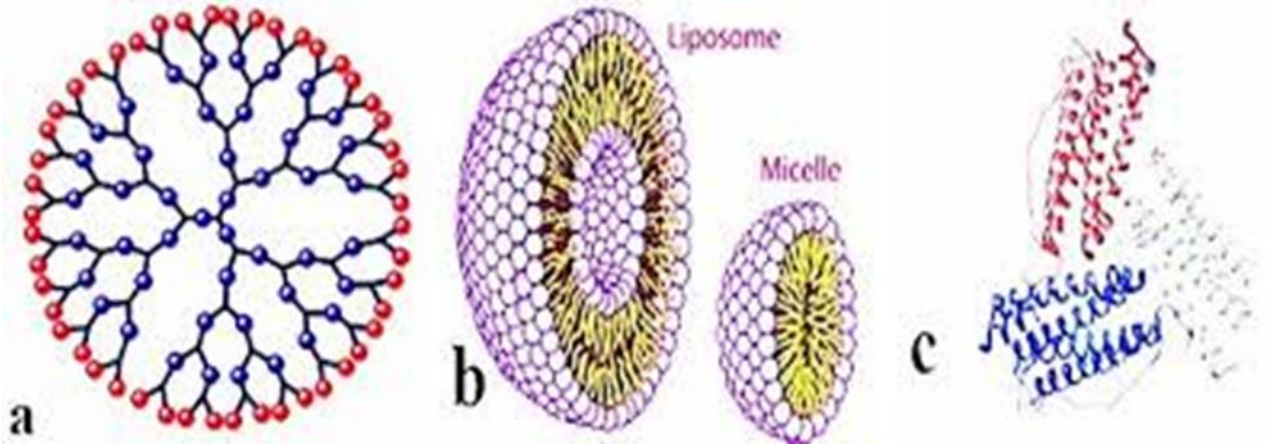
الشكل I-2 أمثلة عن المواد النانوية حسب أبعادها

1.4.2 تصنيف الجسيمات النانوية بناءً على تركيبها الكيميائي:

تُقسم الجسيمات النانوية إلى ثلاث فئات رئيسية: عضوية، غير عضوية، وقائمة على الكربون.

1.4.2.1 الجسيمات النانوية العضوية:

جسيمات صلبة تتكون من مركبات عضوية (غالباً دهون أو بوليمرات)، بأحجام تتراوح بين 10 نانومتر و1 ميكرومتر [12]. من أبرز أمثلتها: الميسيلات، الليبوزومات، والفيروسات. تتميز هذه الفئة بأنها غير سامة، صديقة للبيئة، وقابلة للتحلل الحيوي [13]. تمتلك الليبوزومات والميسيلات شكلاً كروياً مجوفاً (كبسولات نانوية) وهي حساسة للإشعاع الحراري والكهرومغناطيسي [14]، مما يجعلها خياراً مثالياً لتوصيل الأدوية [15].



الشكل I-3 الجسيمات النانوية العضوية: (A) الدينديمرات؛ (B) الليبوزومات والميسيلات؛ (C) الفيريتين

1.4.2.2 الجسيمات النانوية غير العضوية:

الجسيمات النانوية غير العضوية هي جسيمات لا تتضمن الكربون في تركيبها [16]، وتنقسم إلى نوعين:

1.4.2.2.1 الجسيمات النانوية المعدنية:

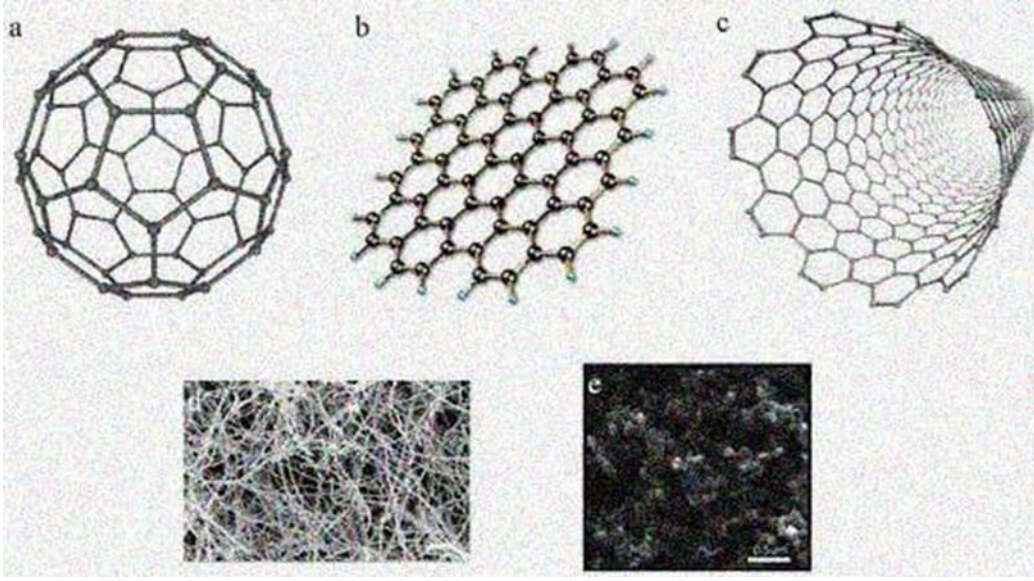
تُصنع من معادن مثل: الكاديوم، الألومنيوم، النحاس، الحديد، الذهب، الزنك، والفضة [15]. تتميز بخصائص فريدة جعلتها تستخدم على نطاق واسع في الطب، التحفيز الكيميائي، وأجهزة الاستشعار الإلكترونية [2].

1.4.2.2.2 الجسيمات النانوية لأكاسيد المعادن:

تهدف إلى تحسين خصائص المعادن الأصلية. فمثلاً، تحويل جسيمات الحديد إلى أكسيد الحديد يمنحها تفاعلية أعلى بكثير [15]. من أمثلتها: أكسيد الألومنيوم، أكسيد التيتانيوم، وثنائي أكسيد السيليكون، وجميعها تُظهر خصائص محسنة مقارنة بنظيراتها المعدنية [6].

1.4.2.2.3 الجسيمات النانوية القائمة على الكربون:

هي جسيمات تتكون بالكامل من ذرات الكربون [17]، وتشمل الأنواع الرئيسية التالية:



الشكل 1-4 الجرافين، والفوليرين، وأنابيب الكربون النانوية، وألياف الكربون النانوية، والكربون الأسود [5]

1.4.2.2.4 : الجرافين (Graphene)

هو متآصل للكربون ثنائي الأبعاد، حيث تترتب ذرات الكربون فيه على شكل شبكة سداسية منتظمة تشبه قرص العسل. يبلغ سمك صفيحة الجرافين الواحدة حوالي 1 نانومتر فقط [18].

1.4.2.2.5 : الأنابيب النانوية الكربونية (Carbon Nanotubes – CNT)

تتكون هذه الأنابيب عند لف صفائح الجرافين على شكل أسطواني مجوف، ويتراوح قطرها بين 1 و 2 نانومتر [5,16]. تُصنف الأنابيب النانوية الكربونية إلى ثلاثة أنواع رئيسية: أحادية الجدار، وثنائية الجدار، ومتعددة الجدران [15].

1.4.2.2.6 : أسود الكربون (Carbon Black)

هو مادة نانوية غير بلورية (amorphous)، تتكون من ذرات كربون مرتبة على شكل كروي، وتتراوح أحجام هذه الجسيمات بين 20 و 70 نانومتر [8]. ونظراً لوجود تفاعلات قوية بين هذه الجسيمات، فإنها تتجمع معاً مكونة كتلاً أكبر حجماً يصل حجمها إلى حوالي 500 نانومتر [6].

1.4.2.2.7 : ألياف الكربون النانوية (Carbon Nanofibers)

يتم تحضيرها عن طريق لف الصفائح النانوية للجرافين، ولكن بشكل مختلف عن الأنابيب النانوية، حيث تُلف هذه الصفائح على شكل أكواب أو مخاريط بدلاً من لفها على شكل أنابيب أسطوانية طويلة [15].

1.5 الخصائص العامة للجسيمات النانوية:

1.5.1 الخصائص البصرية:

تختلف الخصائص البصرية للجسيمات النانوية مثل الانعكاس، والامتصاص، وانبعاث الضوء، والنفاذية اختلافاً كبيراً عن نظيراتها ذات المقاييس الأكبر حجماً [11]. ففي المواد ذات الحجم النانوي، لا تكون الإلكترونات حرة الحركة كما هو الحال في نظيرها المصمت (الكتلة المتجانسة)، ونتيجة لهذا الحصر الكمي للإلكترونات، تستجيب الجسيمات النانوية للضوء بشكل مختلف مقارنة بنظيرها المصمت [19]. تُظهر العديد من الجسيمات النانوية تغيراً ملحوظاً في خصائصها البصرية كدالة لحجمها وشكلها. على سبيل المثال، تظهر كرات الذهب التي يتراوح قطرها بين 10-20 نانومتر لوناً أحمر، بينما تظهر كرات الذهب التي يتراوح قطرها بين 2-5 نانومتر لوناً أصفر، وتظهر كرات الذهب ذات الأقطار الأكبر من 20 نانومتر لوناً أرجوانياً. وبالمثل، فإن جسيمات الفضة ذات الحجم 40 نانومتر لها لون أزرق، والحجم 100 نانومتر لها لون أصفر، أما جسيمات الفضة ذات الشكل المنشوري فلها لون أحمر [20]

1.5.2 الخصائص السطحية:

تمتلك الجسيمات النانوية خصائص فريدة يمكن أن تُعزى إلى النسبة الكبيرة من الذرات الموجودة على السطح مقارنة بعدد الذرات في النواة (القلب). فعندما يتم تقليص مادة صلبة (كبيرة الحجم) إلى مقياس النانومتر، تزداد نسبة ذرات السطح، مما يؤدي إلى وجود عدد كبير من المواقع السطحية التفاعلية. يمكن استخدام مكعب بحجم $1 \times 1 \times 1$ سم كمثال: إذا تم تقطيعه إلى مكعبات صغيرة بحجم $0.1 \times 0.1 \times 0.1$ مم، فإن الحجم الكلي لجميع المكعبات الصغيرة سيظل كما هو بالنسبة للمكعب الأصلي، لكن مساحة سطح جميع المكعبات الصغيرة ستكون أكبر بمقدار 100 مرة من مساحة سطح المكعب الأصلي. ونتيجة لذلك، تمتلك المواد النانوية نسبة مساحة سطح إلى حجم عالية، مما يجعلها تتفاعل مع البيئة بشكل أكثر فعالية من المواد كبيرة الحجم [19]. بافتراض أن الجسيمات النانوية كروية الشكل، فإن نسبة مساحة سطحها إلى حجمها تزداد كلما تناقص حجم الجسيم.

1.5.3 الخصائص الميكانيكية:

تسمح الخصائص الميكانيكية الفريدة للجسيمات النانوية للباحثين بتطوير تطبيقات جديدة في العديد من المجالات. من المتوقع أن تتحسن الخصائص الميكانيكية مثل قوة الانحناء، ومعامل المرونة، وقوة الشد،

وخصائص الكسر، ومقاومة الصدمات عند مقياس النانومتر. تتأثر الخصائص الميكانيكية للجسيمات النانوية بالمادة الأساسية. القوة الميكانيكية للمواد القائمة على الكربون أعلى بشكل ملحوظ من غيرها من المواد النانوية [21]

1.5.4 الخصائص الكهربائية:

إن تقليص حجم جسيمات المادة إلى أقل من 100 نانومتر يحسن قدرتها على توصيل التيار الكهربائي، مما يسمح لنا باستخدام هذه المواد في صنع أجهزة استشعار دقيقة وأجهزة إلكترونية [22]

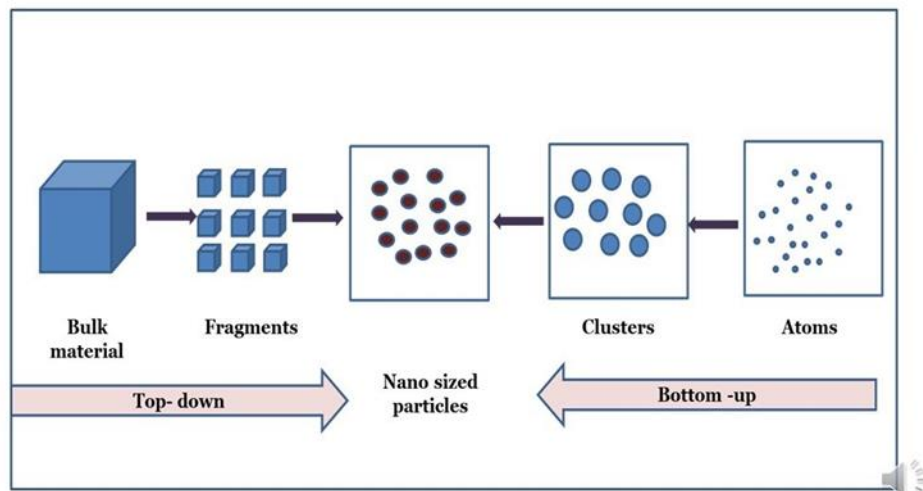
1.5.5 الخصائص التحفيزية:

تمتلك الجسيمات النانوية نشاطاً تحفيزياً كبيراً مقارنة بنظيراتها كبيرة الحجم. يؤثر حجم الجسيمات النانوية على النشاط التحفيزي، ويفسر ذلك بارتفاع نسبة السطح إلى الحجم والتي لها فائدة كبيرة على الخصائص التحفيزية التي تتضمن تبادلات عند السطح البيني بين الجسيمات النانوية وبيئتها [23]

1.6 استراتيجيات تخليق (تصنيع) الجسيمات النانوية:

تم استخدام طرق متعددة لتخليق جسيمات نانوية ذات حجم وشكل وتركيب وأبعاد دقيقة. تُصنف هذه الطرق عموماً إلى فئتين، هما: نهج (من الأعلى إلى الأسفل) ونهج (من الأسفل إلى الأعلى)، ويتم تقسيمها أيضاً بناءً على إجراءاتها وظروف تفاعلها [6]

Synthesis of Nanomaterials



الشكل I-5 استراتيجيات تخليق الجسيمات النانوية [19]

1.6.1 نهج من الأعلى إلى الأسفل (Top-down) :

النهج الهرمي (من الأعلى إلى الأسفل)، المعروف عموماً بالطريقة التدميرية، هو تحويل المواد كبيرة الحجم (السائبة) إلى مواد ذات حجم نانوي باستخدام العمليات الميكانيكية. على الرغم من أن هذا النهج سهل التحقيق، إلا أنه غير مناسب لتخليق الشكل والحجم المطلوبين. العيب الرئيسي المرتبط بهذا النهج هو التغيرات في كيمياء السطح والخصائص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات النانوية [24]. يُعد كل من: الاستئصال بالليزر، والطباعة النانوية، والطحن الميكانيكي، والتحلل الحراري، والرذاذ (التبخير المهبطي) من أكثر طرق (من الأعلى إلى الأسفل) شيوعاً لتصنيع الجسيمات النانوية [16]

1.6.2 نهج من الأسفل إلى الأعلى (Bottom-up) :

الطريقة البنائية (من الأسفل إلى الأعلى)، والتي تُعرف غالباً بالطريقة البناءة، هي نهج تجميعي تتشكل فيه الجسيمات النانوية من تجمعات (عناقيد) ذرية، والتي يتم الحصول عليها بدورها من الذرات. يُعتبر نهج (من الأسفل إلى الأعلى) أقل تكلفة لأنه يمتلك القدرة على إنتاج نفايات أقل [6]. تُعد طرق: سول-جيل، والترسيب الكيميائي للبخار (CVD)، والتخليق الحيوي، والتحلل الحراري (الانحلال الحراري)، والغزل (الترسيب بالغزل) من أكثر طرق (من الأسفل إلى الأعلى) شيوعاً لتصنيع الجسيمات النانوية [16]

1.6.3 التحلل الحراري (Thermal decomposition) :

يشير التحلل الحراري إلى تفاعل ماص للحرارة يتم فيه تكسير الروابط الكيميائية للمركب عن طريق تطبيق الحرارة. درجة الحرارة التي يخضع عندها العنصر للتحلل الكيميائي تُشار إليها بدرجة حرارة التحلل. يتم توليد الجسيمات النانوية من خلال تحلل المعادن عند درجات حرارة محددة، مما يؤدي إلى تفاعل كيميائي ينتج عنه منتجات ثانوية [25]

1.6.4 سول-جيل (Sol-gel) :

تُستخدم طريقة سول-جيل بشكل متكرر لإنتاج مواد نانوية مختلفة، وخاصة جسيمات أكاسيد المعادن النانوية. تتضمن طريقة سول-جيل تحويل ألكوكسيد الفلز إلى جسيمات نانوية من خلال تفاعل بلمرة متكثفة (بولي تكاثف) يتم تحفيزه بواسطة الماء أو الكحول. للحصول على مرحلتين الصلب والسائل،

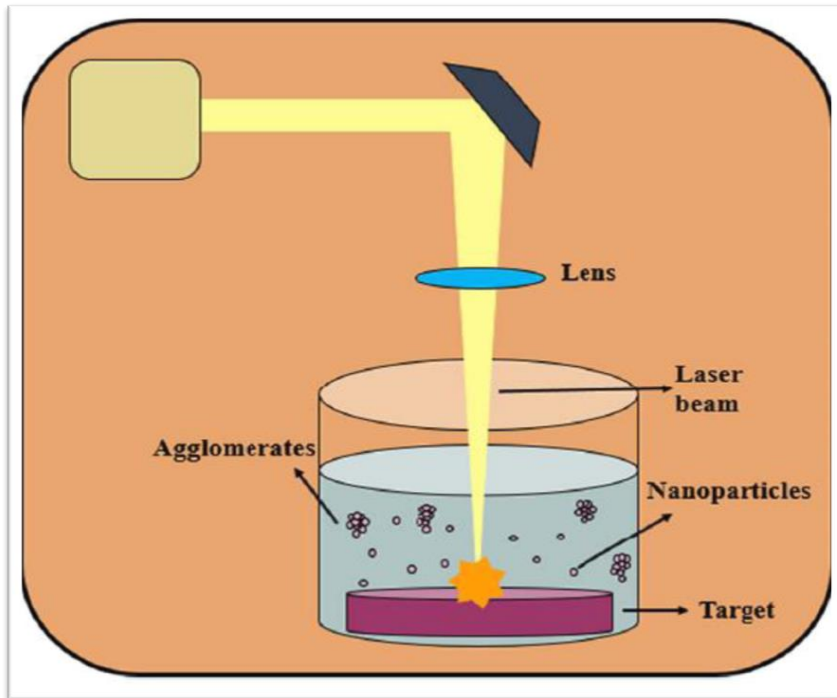
تُستخدم طرق مختلفة مثل الرج، أو التحريك، أو المعالجة بالموجات فوق الصوتية. يمكن فصل هاتين المرحتين إما بالترشيح، أو الطرد المركزي، أو الترسيب [26].

1.6.5 التخليق الحيوي (Biosynthesis) :

يُسمى التخليق الحيوي أيضاً بطريقة التخليق الأخضر؛ وهو يتضمن تخليق الجسيمات النانوية بواسطة المستخلصات النباتية أو الكائنات الحية الدقيقة. تعتبر طريقة التخليق الأخضر صديقة للبيئة، واقتصادية (منخفضة التكلفة)، وغير سامة. بالإضافة إلى ذلك، تلغي هذه الطريقة استخدام المواد الكيميائية الخطرة وتنتج جسيمات نانوية غير سامة وقابلة للتحلل الحيوي [27، 13]. نظراً لخصائصها الفريدة والمحسنة، تُستخدم الجسيمات النانوية المُخلَّقة حيويًا على نطاق واسع في التطبيقات الطبية الحيوية [28]

1.6.6 الاستئصال بالليزر (Laser ablation) :

الاستئصال بالليزر هو طريقة شائعة لتخليق الجسيمات النانوية من مذيبات مختلفة، وهي طريقة يتم فيها تركيز شعاع ليزر عالي الطاقة على هدف بغرض تبخير جزء من الهدف ثم تكثيف الجسيمات الناتجة على الطبقة السفلية (الركيزة). تنمو البلورات النانوية المنتجة عن طريق تكثيف المواد المنبعثة من الهدف في الطور الغازي ضمن مجال ضغط محدد بدقة. يتأثر حجم الجسيمات النانوية بعوامل مختلفة تشمل الغاز الحامل، وضغطه، وشدة شعاع الليزر [29]



الشكل I-6 مخطط الاستئصال بالليزر

1.7 الأكاسيد المعدنية النانوية:

تُعتبر الأكاسيد المعدنية النانوية من أهم المواد المستخدمة في مجال تكنولوجيا النانو، نظراً لخصائصها الفيزيائية والكيميائية المميزة. ومن أبرز هذه الأكاسيد: أكسيد الزنك (ZnO) ، وأكسيد النيكل (NiO) ، وثاني أكسيد التيتانيوم (TiO₂) ، والتي تتميز بفعاليتها المضادة للبكتيريا والفطريات، إضافةً إلى استعمالها في تحسين خصائص مواد البناء الصديقة للبيئة.

1.7.1 جسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO) :

1.7.1.1 تعريف :

يُعد أكسيد الزنك مادة متعددة الاستخدامات، وذلك لما يمتلكه من خواص كيميائية وفيزيائية فريدة من نوعها، منها: الاستقرار الكيميائية والحرارية العالية، والمتانة الطويلة، والانتقائية المرتفعة، ومعامل الاقتران الكبير [30]

كما تتميز هذه المادة بخصائص بصرية وكهربائية وحرارية محددة تجعلها جذابة للعديد من التطبيقات. فعلى سبيل المثال، يُستخدم معامل انكسارها المرتفع (الذي يتراوح بين 1.95 و 2.10) في تطبيقات الأصباغ. وعند إضافة شوائب مناسبة إليها، تصبح موصلة للتيار الكهربائي، كما أنها تظل مستقرة حرارياً حتى درجات حرارة مرتفعة جداً (حوالي 1800 درجة مئوية) [31]



الشكل I-7 (a, b) في شكله الطبيعي و (c) في شكله الاصطناعي

I. الفصل الأول : تقنية النانو وأكاسيد المعادن النانوية

1.7.1.2 التركيب البلوري :

يتبلور أكسيد الزنك وفق نظام بلوري مشابه لمعدن "البلنדה (Blende) " ، حيث ترتبط أيونات الزنك ثنائية التكافؤ (Zn^{2+}) بأربع أيونات أكسيد ثنائية التكافؤ السالب (O^{2-}) مشكّلةً شبكةً ثلاثية الأبعاد [32]

1.7.1.3 خصائص أكسيد الزنك :

1.7.1.3.1 الخصائص الفيزيائية :

يتواجد أكسيد الزنك على شكل مسحوق بلوري أبيض اللون. تبلغ درجة انصهاره حوالي 1975 درجة مئوية، وكثافته حوالي 5.6 غ/سم³. وهو غير قابل للذوبان في الماء، لكنه يذوب في كل من الأحماض والقواعد [33]

1.7.1.3.2 الخصائص التحفيزية :

يُستخدم أكسيد الزنك كمحفز متعدد الأغراض في العديد من التفاعلات الكيميائية، مثل إنتاج المركبات العضوية، وتخليق الميثانول، وإزالة الكبريت من غازات العادم، وإنتاج الزيوت النباتية الصالحة للأكل [34]

1.7.1.3.3 الخصائص المضادة للبكتيريا :

يمتلك أكسيد الزنك خصائص مضادة للجراثيم، ولذلك يُستخدم في المستحضرات الصيدلانية، والضمادات الطبية، ومنتجات العناية الشخصية للمساعدة في الوقاية من العدوى [35]

1.7.1.4 تطبيقات أكسيد الزنك :

1.7.1.4.1 التطبيقات الصناعية :

يُستخدم أكسيد الزنك في العديد من القطاعات الصناعية، حيث يدخل كمادة صبغية في الدهانات، والأحبار، واللدائن، ومستحضرات التجميل، وذلك بفضل بياضه وعتامته العالية. كما يُستخدم كعامل واقٍ من أشعة الشمس في الكريمات والمستحضرات الواقية [36]

1.7.1.4.2 التطبيقات الإلكترونية :

ونظراً لخصائصه كشبه موصل، يُستخدم أكسيد الزنك في صناعة الأجهزة الإلكترونية مثل الثنائيات الباعثة للضوء (LED) ، وكاشفات الغازات، والخلايا الشمسية [37]

1.7.1.5 تخليق جسيمات أكسيد الزنك النانوية:

توجد طرق متعددة لتخليق هذه الجسيمات، ويمكن تصنيفها إلى نوعين رئيسيين:

1.7.1.5.1 الطريقة الفيزيائية (طريقة الهدم أو من الأعلى إلى الأسفل) :

تعتمد هذه الطريقة على تقليل حجم المواد الكبيرة إلى أبعاد نانوية، وتتطلب عادةً درجات حرارة مرتفعة وتجهيزات بنية تحتية ضخمة (36).

1.7.1.5.2 الطريقة الكيميائية (طريقة البناء أو من الأسفل إلى الأعلى) :

تعتمد على بناء الجسيمات انطلاقاً من الجزيئات أو الذرات المعدنية، وتتميز بسهولة التنفيذ مقارنة بالطرق الفيزيائية (36).

1.7.2 جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) :

1.7.2.1 التعريف :

يُعتبر التيتانيوم (Ti) رابع أكثر المعادن وفرةً من حيث التركيب في القشرة الأرضية، بنسبة تبلغ حوالي 0.5% (38). وتشير تقديرات أخرى إلى أنه العنصر التاسع من حيث الوفرة، بمتوسط تركيز يبلغ حوالي 0.63% [39]

إن الجمع بين الخصائص الفيزيائية والكيميائية (مثل مقاومة التآكل وانخفاض التفاعلية الحيوية) والميكانيكية يجعله مادة جاذبة للعديد من التطبيقات في مجالات الطيران، والطب، والصناعة، وغيرها [38]

1.7.2.2 التركيب البلوري :

يتواجد TiO_2 في ثلاثة أشكال بلورية رئيسية هي: الروتايل (Rutile)، والأناتاز (Anatase)، والبروكيت (Brookite). ويتميز بثباتية عالية نتيجة الرابطة القوية بين أيون التيتانيوم رباعي التكافؤ (Ti^{4+}) وأيون الأكسيد ثنائي التكافؤ السالب (O^{2-})، مما يجعله خاملاً كيميائياً إلى حد كبير [39]

1.7.2.3 الخصائص العامة لثاني أكسيد التيتانيوم :

1.7.2.3.1 الخصائص البصرية :

يُعد ثاني أكسيد التيتانيوم صبغة بيضاء شديدة الانعكاس والعتمة، وله قدرة كبيرة على تشتيت الضوء، وهو ما يمنحه لونه الأبيض المميز. لذلك يُستخدم كصبغة في الدهانات، والأحبار، واللدائن، ومستحضرات التجميل [40]

1.7.2.3.2 الخصائص التحفيزية الضوئية :

يمتلك TiO_2 خصائص تحفيز ضوئي فريدة، أي أنه قادر على تحفيز بعض التفاعلات الكيميائية عند تعرضه للضوء، وذلك لقدرته على توليد أزواج من الإلكترونات والثقوب عند امتصاص فوتونات ذات طاقة كافية. تُستغل هذه الخاصية في تطبيقات مثل تحليل الملوثات العضوية، وتنقية الهواء والماء [41]

1.7.2.3.3 الثبات الكيميائي :

يكون ثاني أكسيد التيتانيوم مستقراً كيميائياً ومقاوماً لمعظم العوامل الكيميائية الشائعة مثل الأحماض المخففة، والقواعد، والمذيبات العضوية. إلا أنه قد يصبح متفاعلاً عند درجات الحرارة المرتفعة، أو في وجود بعض العوامل المؤكسدة القوية [42]

1.7.3 جسيمات أكسيد النيكل النانوية (NiO) :

1.7.3.1 التعريف :

تُحضّر جسيمات أكسيد النيكل النانوية من سلائف مختلفة، وذلك بفضل خصائصها المغناطيسية والحرارية والتحفيزية والبصرية. وقد جعلتها هذه الخصائص موضوعاً رئيسياً لعدد كبير من الأوراق العلمية، نظراً لمساحتها السطحية الكبيرة، وخصائصها الامتزازية غير المعتادة، وعيوب سطحها، ونشاطها السريع [43,44]

تُستخدم جسيمات NiO النانوية بشكل واسع في عدد من التطبيقات مثل: المحفزات، والحساسات (الكواشف)، والنوافذ الذكية، وخلايا الوقود، وتخليق مواد للتطبيقات التكنولوجية [45,46]

1.7.3.2 خصائص جسيمات أكسيد النيكل النانوية :

1.7.3.2.1 الخصائص البصرية:

يُعتبر مطيافية الامتصاص من أهم التقنيات لدراسة الخصائص البصرية لجسيمات أكسيد النيكل النانوية، وذلك نتيجة تفاعلها مع الإشعاع الكهرومغناطيسي. لوحظت هذه الخصائص في طيف الامتصاص لجسيمات NiO النانوية المكلسة عند درجة حرارة 500 درجة مئوية. تم الكشف عن قمة امتصاص قوية وعريضة في مدى الأطوال الموجية 350-450 نانومتر، حيث بلغت طاقة فجوة النطاق (فجوة الطاقة) $E_g = 2.93$ إلكترون فولت. يرجع هذا الاتساع في فجوة النطاق لجسيمات NiO النانوية إلى تأثير الحبس الكمي للبلورات الصغيرة، وذلك بوجود إلكترونات التوصيل في حالة تفاعل، وتحدث التقلبات نتيجة عدة عوامل منها: حجم الجسيمات النانوية وشكلها، وطبيعة الوسط المحيط. فعندما تقترب جسيمات النيكل بما فيه الكفاية من بعضها البعض، تنشأ تفاعلات بينها تؤدي إلى تعديل النتائج المحصلة [47]

1.7.3.2.2 الخصائص التحفيزية:

تعتمد قدرة أي مادة على العمل كمحفز في نظام معين على طبيعتها الكيميائية وخصائص سطحها [34]. وتتوقف فعالية أكسيد النيكل على طريقة تحضيره. يُستخدم أكسيد النيكل كمصيدة كيميائية وكاشف للغازات (مثل الفورمالديهايد، وثاني أكسيد الكربون، والهيدروجين). كما يمتلك NiO خصائص تحفيزية قوية جداً وواحدة، وذلك بفضل فعاليته في تحليل وتخليق وتحويل المواد العضوية (مثل التكرير الهيدروجيني للبنزين، وتحويل الهيدروكربونات، وهدرجة النفط الثقيل). وكغيره من المحفزات، تعتمد فعالية أكسيد النيكل في النظام بشكل رئيسي على طريقة تركيبه، وخصائص سطحه، وطبيعته الكيميائية، وعملية إضافة الشوائب إليه. هذه الخصائص الفيزيائية والكيميائية المتعددة تجعل منه مادة ذات أهمية خاصة في مجال البطاريات، ومحفزاً ممتازاً في معالجة مياه الصرف الصحي من الأصباغ العضوية [48]

1.7.3.2.3 الخصائص المغناطيسية:

تمتلك جسيمات أكسيد النيكل النانوية التي يتراوح قطرها بين 20 و 200 نانومتر خصائص مغناطيسية قوية وعالية. كما تظهر هذه الجسيمات عزماً مغناطيسياً صافياً على السطح، وذلك بسبب النسبة الكبيرة

بين مساحة السطح والحجم، على الرغم من أن المادة في حالتها الكتلية تكون مضادة للمغناطيسية الحديدية (Antiferromagnetic) عند مقارنة السلوك المغناطيسي لعينة تحتوي على جسيمات نانوية ذات أحجام مختلفة، تظهر بعض الصعوبات، مثل: تغير كثافة العينة بتغير حجم الجسيمات، وتغير حجم الجسيمات مع درجة الحرارة، وتغير الخصائص البنيوية للجسيمات تبعاً لحجمها [49,50,51]

1.7.3.2.4 الخصائص السطحية :

ترتبط الخصائص السطحية ارتباطاً وثيقاً بالترتيبات الإلكترونية والبنائية، بل ويمكن القول إنها تنبثق عنها. من نتائج تصغير الحجم هو الانتشار الكبير الذي يمثل النسبة المئوية للذرات على السطح مقارنة بالعدد الكلي للذرات المتاحة في الجسيمات النانوية. فعلى سبيل المثال، في الجسيمات النانوية الكروية من NiO، تمتلك ذرات السطح عدد تناسق منخفض، وتشكل روابط أقل، وبالتالي فهي أقل استقراراً من الذرات في الطبقات الداخلية. كما تمتلك هذه المواقع ألفة أكبر لتكوين الروابط. تتمتع جسيمات NiO النانوية بشكل عام بهندسة منتظمة على شكل متعدد سطوح مكون من تراسم متراسم للذرات المعدنية في طبقات متماسكة حول الذرة الأساسية. مما يدل على أنه كلما صغر حجم جسيمات NiO النانوية، زادت النسبة المئوية للذرات الموجودة على السطح [52]

1.7.3.2.5 الخصائص التحفيزية الضوئية :

تظهر خاصية التحفيز الضوئي كأداة فعالة في وجود الضوء، إذ تستخدم أنواعاً مؤكسدة لتفكيك المواد العضوية. وهي تقنية ناجعة لإزالة الملوثات نظراً لبساطتها وفعاليتها. تم استخدام العديد من أكاسيد المعادن، ومنها أكسيد النيكل، كمواد مازة (ممتزة). وعلى الرغم من أنها شديدة التفاعل مع المركبات العضوية، إلا أنه بسبب انطلاق (ارتشاح) أيونات المعادن القابلة للأكسدة والاختزال من المواد المازة، فإن جسيمات NiO النانوية تُعتبر محفزاً أو مادة مازة أكثر فعالية نظراً لمتانتها الممتازة، وحساسيتها الضوئية العالية، وألفتها الامتزازية المرتفعة [53]

1.7.3.3 تطبيقات جسيمات أكسيد النيكل النانوية:

تمتلك الجسيمات النانوية، سواء كانت بسيطة أو معقدة التركيب، خصائص فيزيائية وكيميائية فريدة، وتقدم مزايا يمكن استغلالها في العديد من التطبيقات الطبية، والبيولوجية الطبية، والبيئية، والتجارية التي تهم المهنيين والمصنعين والمستهلكين.

1.7.3.3.1 التطبيقات الطبية:

يتيح تطوير تقنيات النانو اليوم أدوات صغيرة تمتلك خصائص وقدرة على زيادة الفعالية العلاجية في تطبيقات متقدمة في الطب الحيوي. تُظهر هذه التطبيقات الواعدة إمكانية تحسين الاستهداف العلاجي، وجعل العلاجات أكثر أماناً مع آثار جانبية أقل، وهي محور اهتمام الباحثين، ومن الأمثلة على ذلك علاجات الأورام، والسرطان، والأمراض الجلدية [54]

1.7.3.3.2 التطبيقات التجميلية الجلدية:

يسعى قطاع مستحضرات التجميل باستمرار إلى تحسين خصائص هذه المنتجات من حيث الشفافية، والللمعان، والخصائص البصرية. ولهذا الغرض، تستهدف الدراسات استخدام الجسيمات النانوية في المستحلبات الدقيقة للتركيبات التجميلية. حيث تُستخدم الأشكال الجسيمية النانوية لمكوناتها بهدف تحسين الحماية من الأشعة فوق البنفسجية، والاختراق الجلدي، واللون. فعلى سبيل المثال، يُستخدم الفوليرين بشكل رئيسي في مكياج الوجه (كحل العيون، الماسكارا، أحمر الخدود، أحمر الشفاه، طلاء الأظافر، وغيرها) [54]

1.7.3.3.3 التطبيقات في الإلكترونيات والخلايا الضوئية:

في صناعة الإلكترونيات والاتصالات، تتيح المواد النانوية سرعات معالجة أسرع وقدرة تخزين أكبر. يُقدم أكسيد النيكل، بفضل خصائصه الكهروضوئية، أغشية مسامية تمنح سعة وقدرة فائقتين، مما يسمح باستخدامه في صناعة البطاريات، والمكثفات الفائقة، وشاشات العرض المسطحة الملونة، وكذلك الخلايا الشمسية التي يعتمد تشغيلها على التأثير الكهروضوئي، وحساسات الغازات [55]

1.7.3.3.4 التطبيقات في الهندسة الزراعية:

أدت المواد النانوية المستخرجة من المحاصيل والأشجار إلى فتح سوق آخر لمنتجات مبتكرة من المواد والأجسام ذات الأبعاد النانوية، مثل: الأسمدة النانوية، ومبيدات الأعشاب النانوية التي تجمع بين مبيدات الأعشاب والطلاءات النانوية [56]

1.8 طرق تشخيص الأكاسيد النانوية:

تُستخدم الطرق التالية لتوصيف الأكاسيد النانوية

1.8.1 حيود الأشعة السينية (DRX) :

يمكن استخدام تقنيات حيود الأشعة السينية لتحديد حالة التبلور في الرواسب، وكذلك للتعرف على الأطوار البلورية الموجودة في العينة. تعتمد هذه الطريقة على دراسة تفاعل الأشعة السينية مع المادة. عندما تسقط الأشعة السينية على المادة، فإنها تصدر موجات لها نفس الطور ونفس الطول الموجي في جميع الاتجاهات. يؤدي هذا التشتت إلى حدوث تداخل بين الموجات المتماثلة الصادرة من كل مستوى ذري، مما يُنتج موجات حيود تعتمد خصائصها على البنية البلورية للمادة. تحدد قانون براج مواقع حزم الحيود (57)

$$n\lambda = 2 d \sin \theta$$

حيث:

n: رتبة الحيود

λ : الطول الموجي للأشعة السينية (بالأنغستروم)

d: المسافة بين المستويات البلورية

θ : زاوية براج (بالدرجات)

1.8.2 مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) :

يعتبر الطيف تحت الأحمر من أكثر الأطياف استخداماً في التحليل الوظيفي، حيث يقابل التغيرات المتزامنة في الطاقات الاهتزازية والدورانية. تعتمد هذه التقنية على تسليط طاقة قريبة من طاقة الاهتزاز على العينة، مما يُحدث انتقالاً مباشراً بين مستويين اهتزازيين عن طريق امتصاص طاقة الإشعاع الساقط [58]

يُعرف المجموعات الوظيفية عادةً من خلال وجود أو غياب حزم الامتصاص المسجلة في الطيف تحت الأحمر. يعتمد امتصاص المادة للأشعة تحت الحمراء على طبيعة مكوناتها والروابط التي تربطها. هذه التقنية المطيافية عالية الانتقائية تُستخدم غالباً للتعرف على المركبات الكيميائية، كما يمكنها تقديم معلومات هامة حول التفاعلات بين الجزيئية وداخل الجزيئية، والبنية الجزيئية، والتنظيم المادي للمادة [59]

1.8.3 مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis) :

مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية هي تقنية طيفية تستخدم فوتونات ذات أطوال موجية تتراوح بين فوق البنفسجي (200-400 نانومتر) والمرئي (400-750 نانومتر) والقريب من تحت الأحمر (750-1400 نانومتر)

عند تعريض الجزيئات أو الأيونات أو المعقدات لإشعاع في هذا المدى الطولي الموجي، يمكن أن تحدث انتقالات إلكترونية واحدة أو أكثر. معظم الركائز المحللة تكون في المحلول، ولكن يمكن أن تكون أيضاً في الطور الغازي، ونادراً في الحالة الصلبة.

المبدأ العام :

تُستخدم هذه التقنية لقياس كمية الضوء فوق البنفسجي أو المرئي الممتصة من قبل المكونات الذائبة في المحلول، ثم حساب نسبة شدة الشعاعين في مجال UV-Vis (60).

تتطبق قوانين الامتصاص على طيف الامتصاص فوق البنفسجي والمرئي وحتى تحت الأحمر. يعطى هذا القانون بالعلاقة التالية:

$$A = \log(I/I_0) = \epsilon * L * C$$

حيث:

A: الامتصاصية (Absorbance)

I: شعاع الضوء الداخل

I₀: شعاع الضوء الخارج

L: سمك خلية التحليل

ε: معامل الامتصاص المولي

C: تركيز المادة الممتصة

1.8.4 مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDS) :

المبدأ العام :

تستخدم مطيافية تشتيت الطاقة الأشعة السينية الناتجة عن حزمة إلكترونية ساقطة على العينة. كما ذكر سابقاً، فإن تفاعل حزم الإلكترونات مع المادة يُنتج إشارات متنوعة، منها الأشعة السينية. عند حدوث

تفاعل غير مرئي بين حزمة الإلكترونات وسطح العينة، تؤدي الإلكترونات المنبعثة إلى تأين الذرة ثم فقدانها للإثارة بانبعث أشعة سينية مميزة لتلك الذرة (تزداد طاقة الأشعة السينية بزيادة العدد الذري Z). تُحصل على هذه الأشعة السينية عن طريق التحليل الكيميائي الدقيق (EDS) وتُستخدم لمعرفة التركيب الذري للعينة [61]

1.8.5 المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) :

يُعدّ المجهر الإلكتروني الماسح (Microscope Électronique à Balayage – MEB) تقنية متقدمة للتكبير تعتمد على حزمة من الإلكترونات الموجهة نحو سطح العينة للحصول على معلومات دقيقة حول بنيتها السطحية. وتتميز الصور الناتجة عن MEB بدقة عالية وثلاثية الأبعاد، مما يجعله أداة أساسية في دراسة المواد في مختلف المجالات العلمية والصناعية [62]. يتكوّن جهاز MEB من مصدر إلكترونات عالي الطاقة يُسمى المدفع الإلكتروني (Electron Gun) ، والذي يقوم بتوليد حزمة إلكترونية يتم تسريعها بواسطة نظام جهد عالٍ، ثم تركيزها باستخدام عدسات مكثفة (Condenser lenses) وفتحات دقيقة (Apertures) [63]. بعد ذلك، يتم توجيه الحزمة الإلكترونية بواسطة ملفات المسح (Scan coils) لمسح سطح العينة بدقة. وعند تفاعل الإلكترونات مع سطح المادة، تنتج عدة إشارات أهمها الإلكترونات الثانوية (Secondary electrons)، والإلكترونات المرتدة (Backscattered electrons)، إضافة إلى الأشعة السينية المميزة (Characteristic X-rays). يتم التقاط هذه الإشارات بواسطة كواشف خاصة وتحويلها إلى صور تُعرض على شاشة الحاسوب [64].

خاتمة

في السنوات الأخيرة، عرفت علوم النانو تطوراً كبيراً أدى إلى ظهور مواد ذات خصائص مميزة، خاصة البنى النانوية وتقنيات تحضيرها وتوصيفها وتصنيفها حسب أبعادها، كما تُعد الأكاسيد النانوية من أهم هذه المواد نظراً لخصائصها وتعدد تطبيقاتها، مما يجعلها محوراً مهماً في البحث العلمي الحديث مع آفاق واعدة للتطور رغم بعض التحديات التقنية.

المراجع :

1. Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2019). The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25(1), 112.
2. Tedjani, M. L. (2022). Optimizing the Biosynthesis Temperature of Iron Oxide Nanoparticles Using Moringa Oleifera Extract and Study of their Biological Activities..
3. Silvestre, J., Silvestre, N., & De Brito, J. (2016). Review on concrete nanotechnology. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(4), 455–485 .
4. Ayachi, A. A. (2015). Synthèse des nanoparticules d’oxydes métalliques pour des applications photocatalytiques solaires (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Département De Physique, Université MENTOURI, CONSTANTINE..(
5. Vijayaraghavan, K., & Ashokkumar, T. (2017). Plant–mediated biosynthesis of metallic nanoparticles: A review of literature, factors affecting synthesis, characterization techniques and applications. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(5), 4866–4883 .
6. Kumari, S., & Sarkar, L. (2021). A review on nanoparticles: structure, classification, synthesis & applications. *Journal of Scientific Research*, 65(8), 42–46.
7. Samak, D. H., El–Sayed, Y. S., Shaheen, H. M., El–Far, A. H., Abd El–Hack, M. E., Noreldin, A. E., ... & Abdel–Daim, M. M. (2020). Developmental toxicity of carbon nanoparticles during embryogenesis in

- chicken. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(16), 19058–19072.
8. EL-Ghwas, D. E., Elkhateeb, W. A., Akram, M., & Daba, G. M. (2021). Nanoparticles: characterization, biological synthesis and applications. *Open Access Journal of Microbiology & Biotechnology*, 6(2).
 9. Uzair, B., Liaqat, A., Iqbal, H., Mena, B., Razzaq, A., Thiripuranathar, G., ... & Mena, F. (2020). Green and cost-effective synthesis of metallic nanoparticles by algae: Safe methods for translational medicine. *Bioengineering*, 7(4), 129.
 10. Garg, R., Rani, P., Garg, R., & Eddy, N. O. (2021). Study on potential applications and toxicity analysis of green synthesized nanoparticles. *Turkish Journal of Chemistry*, 45(6), 1690–1706.
 11. Singh, V., Yadav, P., & Mishra, V. (2020). Recent advances on classification, properties, synthesis, and characterization of nanomaterials. *Green synthesis of nanomaterials for bioenergy applications*, 83–97.
 12. Lal, R. K. S. (2014). Synthesis of organic nanoparticles and their applications in drug delivery and food nanotechnology: a review. *Journal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology*, 3(04).
 13. Barhoum, A., García-Betancourt, M. L., Jeevanandam, J., Hussien, E. A., Mekkawy, S. A., Mostafa, M., ... & Bechelany, M. (2022). Review on natural, incidental, bioinspired, and engineered nanomaterials: history, definitions, classifications, synthesis, properties, market, toxicities, risks, and regulations. *Nanomaterials*, 12(2), 177.

14. Singh, S., Kumar, V., Romero, R., Sharma, K., & Singh, J. (2019). Applications of nanoparticles in wastewater treatment. In *Nanobiotechnology in bioformulations* (pp. 395–418). Cham: Springer International Publishing .
15. 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.
16. Anu Mary Ealia, S., & Saravanakumar, M. P. (2017, November). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 263, No. 3, p. 032019). IOP Publishing .
17. Bhagyaraj, S. M., & Oluwafemi, O. S. (2018). Nanotechnology: the science of the invisible. In *Synthesis of inorganic nanomaterials* (pp. 1–18). Woodhead Publishing.
18. Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., ... & Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top–down and bottom–up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. *Advances in colloid and interface science*, 300, 102597.
19. Asha, A. B., & Narain, R. (2020). Nanomaterials properties. In *Polymer science and nanotechnology* (pp. 343–359). Elsevier.

20. Bhagyaraj, S. M., & Oluwafemi, O. S. (2018). Nanotechnology: the science of the invisible. In *Synthesis of inorganic nanomaterials* (pp. 1–18). Woodhead Publishing.
21. Reghunadhan, A., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2018). Mechanical property analysis of nanomaterials. In *Characterization of Nanomaterials* (pp. 191–212). Woodhead Publishing.
22. Huang, C., Chen, X., Xue, Z., & Wang, T. (2020). Effect of structure: A new insight into nanoparticle assemblies from inanimate to animate. *Science advances*, 6(20), eaba1321.
23. Kianfar, E. (2020). Catalytic properties of nanomaterials and factors affecting it importance & applications of nanotechnology. *MedDocs Publishers*, 5(4), 22–25.
24. Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., & Kalaskar, M. G. (2019). Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of drug delivery science and technology*, 53, 101174.
25. Salavati–Niasari, M., Davar, F., & Mir, N. (2008). Synthesis and characterization of metallic copper nanoparticles via thermal decomposition. *Polyhedron*, 27(17), 3514–3518.
26. Mann, S., Burkett, S. L., Davis, S. A., Fowler, C. E., Mendelson, N. H., Sims, S. D., ... & Whilton, N. T. (1997). Sol– gel synthesis of organized matter. *Chemistry of materials*, 9(11), 2300–2310.

27. Kuppusamy, P., Yusoff, M. M., Maniam, G. P., & Govindan, N. (2016). Biosynthesis of metallic nanoparticles using plant derivatives and their new avenues in pharmacological applications—An updated report. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 24(4), 473–484.
28. Hasan, S. (2015). A review on nanoparticles: their synthesis and types. *Res. J. Recent Sci*, 2277, 2502.
29. d'Orleans, C. (2003). Elaboration par implantation ionique de nanoparticules de cobalt dans la silice et modifications de leurs propriétés sous irradiation d'électrons et d'ions de haute énergie (Doctoral dissertation, Université Louis Pasteur–Strasbourg I.)
30. Rokbani, H., Daigle, F., & Aji, A. (2018). Combined effect of ultrasound stimulations and autoclaving on the enhancement of antibacterial activity of ZnO and SiO₂/ZnO nanoparticles. *Nanomaterials*, 8(3), 129.
31. Fan, F., Feng, Y., Tang, P., & Li, D. (2015). Facile synthesis and photocatalytic performance of ZnO nanoparticles self-assembled spherical aggregates. *Materials Letters*, 158, 290–294.
32. Poirel, E. (2017). Bienfaits psychologiques de l'activité physique pour la santé mentale optimale. *Santé mentale au Québec*, 42(1), 147–164.
33. Vaseem, M., Umar, A., & Hahn, Y. B. (2010). ZnO nanoparticles: growth, properties, and applications. *Metal oxide nanostructures and their applications*, 5(1), 10–20.

34. BARANI, D. (2020). Optimisation des conditions opératoires de synthèse verte de nanoparticules de ZnO à l'aide d'extrait des feuilles de Phoenix Dactylifera. L (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra.)
35. Nardello–Rataj, V., & Bonte, F. (2008). Chimie et cosmétiques. l'actualité chimique, (323–324), 10.
36. Mohanpuria, P., Rana, N. K., & Yadav, S. K. (2008). Biosynthesis of nanoparticles: technological concepts and future applications. Journal of nanoparticle research, 10(3), 507–517.
37. Adam, F., & Drouillard, I. (2007). Sulfamides et associations. Encycl Méd Chir, Maladies.
38. Froes, F. (Ed.). (2015). Titanium: physical metallurgy, processing, and applications. ASM international.
39. Wang, J. (2014). Nanoparticules à base d'oxyde de titane par pyrolyse laser: synthèse, propriétés et application au photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université Paris Sud–Paris XI.)
40. Azouani, R. (2009). Elaboration de nouveaux nanomatériaux photocatalytiques actifs sous rayonnement visible (Doctoral dissertation, Université Paris–Nord–Paris XIII.)
41. Simon, P. (2011). Synthèse de nanoparticules d'oxydes de titane par pyrolyse laser–Etude des propriétés optiques et de la structure électronique (Doctoral dissertation, Université Paris Sud–Paris XI.)

42. Gervasi, J. (2018). Conception d'un procédé photocatalytique d'élimination de micropolluants organiques persistants (MOPs) en vue de l'application de potabilisation des eaux naturelles.
43. Xin, X., Lü, Z., Zhou, B., Huang, X., Zhu, R., Sha, X., ... & Su, W. (2007). Effect of synthesis conditions on the performance of weakly agglomerated nanocrystalline NiO. *Journal of Alloys and Compounds*, 427(1-2), 251-255.
44. Wu, Y., He, Y., Wu, T., Chen, T., Weng, W., & Wan, H. (2007). Influence of some parameters on the synthesis of nanosized NiO material by modified sol-gel method. *Materials Letters*, 61(14-15), 3174-3178.
45. Ni, X., Zhang, Y., Tian, D., Zheng, H., & Wang, X. (2007). Synthesis and characterization of hierarchical NiO nanoflowers with porous structure. *Journal of Crystal Growth*, 306(2), 418-421.
46. Karthik, K., Selvan, G. K., Kanagaraj, M., Arumugam, S., & Jaya, N. V. (2011). Particle size effect on the magnetic properties of NiO nanoparticles prepared by a precipitation method. *Journal of Alloys and compounds*, 509(1), 181-184.
47. Adekunle, A. S., Oyekunle, J. A., Oluwafemi, O. S., Joshua, A. O., Makinde, W. O., Ogunfowokan, A. O., ... & Ebenso, E. E. (2014). Nanoparticles towards the degradation of nitrite (NO₂⁻) and nitric oxide (NO). *International Journal of Electrochemical Science*, 9(6), 3008-3021.

48. Makhlouf, S. A. (2004). Magnetic properties of Cr₂O₃ nanoparticles. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 272, 1530–1532.
49. Rai, A. K., Anh, L. T., Park, C. J., & Kim, J. (2013). Electrochemical study of NiO nanoparticles electrode for application in rechargeable lithium–ion batteries. *Ceramics International*, 39(6), 6611–6618.
50. Duan, W. J., Lu, S. H., Wu, Z. L., & Wang, Y. S. (2012). Size effects on properties of NiO nanoparticles grown in alkalisalts. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(49), 26043–26051.
51. Winkler, E., Zysler, R. D., Mansilla, M. V., & Fiorani, D. (2005). Surface anisotropy effects in NiO nanoparticles. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 72(13), 132409.
52. Ramesh, M., Rao, M. P. C., Anandan, S., & Nagaraja, H. (2018). Adsorption and photocatalytic properties of NiO nanoparticles synthesized via a thermal decomposition process. *Journal of Materials Research*, 33(5), 601–610.
53. Youta, C. L. D. (2012). Utilisation de nanoparticules pour délivrer des protéines dans les épithéliums respiratoires: caractérisation des mécanismes impliqués (Doctoral dissertation, Université du Droit et de la Santé–Lille II.)
54. Ghalmi, Y. (2019). Etude du comportement électrochimique et optique de couches minces d'oxyde de nickel (NiO): application en photovoltaïques (Doctoral dissertation.)

55. Gour, A., & Jain, N. K. (2019). Advances in green synthesis of nanoparticles. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, 47(1), 844–851.
56. Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*, 12(7), 908–931.
57. Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-ray diffraction techniques for mineral characterization: A review for engineers of the fundamentals, applications, and research directions. *Minerals*, 12(2), 205.
58. Patterson, A. L. (1939). The Scherrer formula for X-ray particle size determination. *Physical review*, 56(10), 978.
59. Servant, L., Le Bourdon, G., & Buffeteau, T. (2011). Comprendre la spectroscopie infrarouge: principes et mise en oeuvre. *Photoniques*, (53), 68–73.
60. Rajeshkumar, S., & Bharath, L. V. (2017). Mechanism of plant-mediated synthesis of silver nanoparticles—a review on biomolecules involved, characterisation and antibacterial activity. *Chemico-biological interactions*, 273, 219–227.
61. Sahu, N., Soni, D., Chandrashekhar, B., Sarangi, B. K., Satpute, D., & Pandey, R. A. (2013). Synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Cynodon dactylon* leaves and assessment of their antibacterial activity. *Bioprocess and biosystems engineering*, 36(7), 999–1004.

62. Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2018). Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis (4th ed.). Springer.
63. Reimer, L. (1998). Scanning electron microscopy: Physics of image formation and microanalysis (2nd ed.). Springer.
64. Echlin, P. (2009). Handbook of sample preparation for scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Springer.

الفصل الثاني: نبات السدر و التخليق الأخضر

II مقدمة :

شهدت النباتات الطبية اهتمامًا متزايدًا في السنوات الأخيرة بسبب احتوائها على مركبات فعالة ذات خصائص بيولوجية متعددة، مما جعلها تدخل في العديد من المجالات الطبية والصناعية والبيئية. ومن بين هذه النباتات نبات السدر *Ziziphus spina-christi* الذي يُعتبر من النباتات المنتشرة في المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية، خاصة في شمال إفريقيا والشرق الأوسط.

ويتميز نبات السدر باحتوائه على العديد من المركبات الكيميائية الفعالة مثل الفلافونويدات والتانينات والصابونينات، والتي تمنحه خصائص مضادة للبكتيريا والفطريات والأكسدة، الأمر الذي جعله محل اهتمام الدراسات الحديثة خاصة في مجال الكيمياء الخضراء وتحضير الجسيمات النانوية [1]

II.1 التعريف بنبات السدر :

السدر هو شجرة دائمة الخضرة تنتمي إلى الفصيلة السدرية (Rhamnaceae) ، ويُعرف أيضًا باسم النبق. يتميز النبات بأوراقه البيضاوية اللامعة وأشواكه الحادة، كما تنتج الشجرة ثمارًا صغيرة مستديرة صالحة للأكل.

وينمو النبات في البيئات الحارة والجافة، ويتميز بقدرته العالية على مقاومة الجفاف والملوحة، مما يجعله من النباتات الملائمة للمناطق الصحراوية [1]

II.1.1 الاسم العلمي والتصنيف النباتي :

الاسم العلمي لنبات السدر هو : *Ziziphus spina-christi*

ويُصنف نباتيًا كما يلي :

التصنيف المعلومات

المملكة	Plantae
الشعبة	Magnoliophyta
الطائفة	Magnoliopsida
الرتبة	Rosales

Rhamnaceae	الفصيلة
Ziziphus	الجنس
Ziziphus spina-christi	النوع

جدول II-1 تصنيف نبات السدر

II.1.2 الوصف النباتي لنبات السدر:

يتميز نبات السدر بشجرة متوسطة الحجم قد يصل ارتفاعها إلى أكثر من 10 أمتار، ولها جذع قوي متفرع يحتوي على أشواك حادة. الأوراق بيضاوية الشكل ذات لون أخضر لامع وتحتوي على ثلاثة عروق رئيسية واضحة.

أما الثمار فهي مستديرة الشكل يتغير لونها من الأخضر إلى الأصفر ثم البني عند النضج، وتحتوي على بذرة صلبة. كما يمتلك النبات جذورًا عميقة تساعده على امتصاص المياه من التربة الجافة، مما يمنحه قدرة كبيرة على التأقلم مع الظروف البيئية القاسية [2]

II.1.3 التركيب الكيميائي لنبات السدر :

يحتوي نبات السدر على العديد من المركبات الكيميائية الفعالة التي تمنحه خصائصه العلاجية والبيولوجية، ومن أهم هذه المركبات:

- الفلافونويدات (Flavonoids)
- التانينات (Tannins)
- الصابونينات (Saponins)
- القلويدات (Alkaloids)
- المركبات الفينولية
- مضادات الأكسدة الطبيعية
- الزيوت الطيارة

وقد أظهرت الدراسات الكيميائية أن هذه المركبات تلعب دورًا مهمًا في النشاط المضاد للبكتيريا والفطريات والالتهابات [3]

التأثير البيولوجي	
مضاد للأكسدة والالتهابات	الفلافونويدات
مضاد للبكتيريا والفطريات	التانينات
نشاط مضاد للميكروبات	الصابونينات
تأثيرات علاجية مختلفة	القلويدات
حماية الخلايا من الأكسدة	المركبات الفينولية

جدول II-2 يوضح أهم المركبات الكيميائية في نبات السدر

II.1.4 أماكن التواجد والانتشار :

ينتشر نبات السدر في العديد من المناطق الجافة وشبه الجافة حول العالم، خاصة في الجزائر، تونس، المغرب، مصر، المملكة العربية السعودية، السودان واليمن [1] وينمو النبات عادة في البيئات الصحراوية ذات درجات الحرارة المرتفعة، كما يتحمل الجفاف ونقص المياه والملوحة، مما يجعله من النباتات الملائمة للمناطق القاحلة.

II.1.5 التطبيقات الحديثة لنبات السدر :

II.1.5.1 تطبيقات السدر في الكيمياء الخضراء :

استُعملت مستخلصات نبات السدر في تحضير الجسيمات النانوية المعدنية بطريقة صديقة للبيئة، حيث تعمل المركبات النباتية الموجودة في الأوراق كمختزلات ومثبتات طبيعية أثناء عملية التخليق [4] وقد ساهمت هذه الطريقة في تقليل استعمال المواد الكيميائية السامة المستخدمة في الطرق التقليدية، مما جعلها من أهم تطبيقات الكيمياء الخضراء الحديثة.

II.1.5.2 التطبيقات المضادة للبكتيريا والفطريات :

أثبتت الدراسات أن مستخلصات نبات السدر تمتلك نشاطاً قوياً ضد العديد من أنواع البكتيريا والفطريات، ويرجع ذلك إلى احتوائه على مركبات فينولية وفلافونويدات ذات فعالية حيوية مرتفعة [5] كما استُعملت هذه الخصائص في تطوير مواد طبيعية مضادة للميكروبات وفي تحسين الخصائص الصحية لبعض المواد الصناعية.

II.1.5.3 تطبيقات السدر في مواد البناء الصديقة للبيئة :

أصبحت المستخلصات النباتية تُستخدم في تطوير مواد بناء حديثة ذات خصائص بيئية وصحية، ومن بينها نبات السدر الذي يمكن استعماله لتحسين الخصائص المضادة للبكتيريا والفطريات في الطوب البيئي.

كما تساعد المركبات الطبيعية الموجودة في النبات على تقليل الاعتماد على المواد الكيميائية الصناعية، مما يدعم توجهات التنمية المستدامة والكيمياء الخضراء [6]

II.1.5.4 تطبيقات السدر في الصناعات الدوائية والتجميلية :

يُستخدم نبات السدر في تحضير العديد من المنتجات التجميلية والطبية بسبب خصائصه المضادة للأكسدة والالتهابات، حيث يدخل في صناعة:

- الشامبو الطبيعي
- الصابون النباتي
- الكريمات الجلدية
- المستحضرات المضادة للبكتيريا

كما تُجرى أبحاث حديثة لاستعمال مستخلصاته في تصنيع مواد دوائية طبيعية ذات فعالية علاجية مرتفعة [7]

II.1.5.5 تطبيقات السدر في مجال النانو تكنولوجيا :

حظي نبات السدر باهتمام واسع في مجال النانو تكنولوجيا، حيث استُخدمت مستخلصاته النباتية في تخليق الجسيمات النانوية المعدنية مثل أكسيد الزنك وأكسيد النيكل وأكسيد التيتانيوم. وقد أظهرت هذه الجسيمات المحضرة حيويًا خصائص مضادة للبكتيريا والفطريات، إضافة إلى تحسين بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد الصناعية [4]

خلاصة:

يتضح من خلال هذا الفصل أن نبات السدر يُعتبر من النباتات المهمة ذات القيمة الطبية والبيئية والصناعية، وذلك بفضل احتوائه على العديد من المركبات الكيميائية الفعالة ذات الخصائص المضادة للبكتيريا والفطريات والأكسدة.

كما أظهرت الدراسات الحديثة أهمية هذا النبات في مجالات الكيمياء الخضراء وتحضير الجسيمات النانوية وتطوير مواد بناء صديقة للبيئة، مما يجعله من النباتات الواعدة في التطبيقات العلمية الحديثة.

المراجع :

- [1] El Maaiden, E., et al. "Genus Ziziphus: A comprehensive review on ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological properties." Journal of Ethnopharmacology, 2020.
- [2] Hussein, A., et al. "Phytoconstituents of Zizyphus spina-christi fruits and their antimicrobial activity." Food Chemistry, 2002.
- [3] Nawwar, M., et al. "Leaf flavonoids of Ziziphus spina-christi." Phytochemistry, 1984.
- [4] El Maaiden, E., et al. "Green synthesis applications of Ziziphus plant extracts in nanotechnology." Journal of Ethnopharmacology, 2020.
- [5] Al-Harbi, F., et al. "Determination of antibacterial activity of Ziziphus spina-christi leaf extracts." The Open Dentistry Journal, 2025.
- [6] Sameh, S., et al. "Environmental and biological applications of Ziziphus species." 2020، ضمن مراجعة علمية شاملة،
- [7] Elaloui, M., et al. "Anti-inflammatory activity of Ziziphus spina-christi." Phytomedicine, 2016

الجزء التطبيقي

الفصل الثالث : التحضير الأخضر لجسيمات أكسيد
الزنك وأكسيد النيكل وثاني أكسيد التيتانيوم ودراسة
خصائصها المضادة للبكتيريا والفطريات

III مقدمة :

تعتبر عملية التحضير الأخضر وسيلة بديلة لتحضير الجسيمات النانوية باستخدام الموارد الطبيعية مثل النباتات الطبية والكائنات الحية الدقيقة. تتميز هذه الطريقة بتكلفتها المنخفضة وثباتها كما انها صديقة للبيئة، إلى جانب كونها أقل سمية وآمنة للاستخدام في أغراض التشخيص والعلاج. بما أن التحضير الأخضر يعتمد على مصادر متنوعة من المواد، فإنه يمثل طريقة مبتكرة واعدة لتصنيع الجسيمات النانوية ولقد نجحت دراسات عديدة سابقة في تصنيع (ZnO, NiO, TiO₂) باستخدام مستخلصات نباتية مختلفة [1,2]

وسنتطرق في هذا الفصل الى البروتوكول المتبع لتصنيع الأخضر ZnO, TiO₂, NiO بواسطة المستخلص النباتي للسدر والنتائج المتحصل عليها لفعاليتها ضد البكتيريا. وكذلك نتائج التشخيص بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB)، التحليل الطيفي للأشعة المرئية والفوق البنفسجية spectroscopy visible-UV، والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء IR-FT، وحيود الأشعة السينية (RDX).

III.1 نبات السدر (*Ziziphus spina-christi*) :

يُعد نبات السدر من النباتات التي تنتمي إلى فصيلة Rhamnaceae، وهو شجر دائم الخضرة ينتشر في المناطق الجافة وشبه الجافة، خاصة في شمال إفريقيا والشرق الأوسط. يتميز بقدرتها على التكيف مع التربة الرملية والصخرية والظروف المناخية القاسية، تتميز أوراقه البيضوية الخضراء وثماره المعروفة باسم "النق"، الغنية بالعناصر الغذائية. باحتوائه على مركبات كيميائية فعالة بيولوجيًا، مثل الفلافونويدات، الصابونينات، التانينات، والبوليفينولات، مما يمنحه خصائص مضادة للأكسدة والبكتيريا والفطريات [3].

استُخدم السدر منذ القدم في الطب التقليدي، حيث تُستعمل أوراقه في علاج الأمراض الجلدية وتعقيم الجروح، والعناية بالشعر والبشرة. كما أظهرت الدراسات الحديثة أن المستخلصات النباتية للسدر تمتلك نشاطاً بيولوجياً مهماً، مما يجعله مورداً واعداً في التطبيقات الصيدلانية والبيئية.

في مجال الكيمياء الخضراء، تستخدم مستخلصاته الغنية بالمركبات الفينولية كعامل مختزل ومثبت في تحضير الجسيمات النانوية لأكاسيد معدنية مثل، ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO₂) أكسيد الزنك (ZnO) أكسيد النيكل (NiO) مما يمثل بديلاً مستداماً صديقاً للبيئة.



الشكل III-1 صورة نبات السدر وأوراقه

III.2 البروتوكول التجريبي للتصنيع الأخضر للأكاسيد الثلاثة :

III.2.1 المواد المستخدمة :

نترات الزنك, كلوريد النيكل ,هيدروكسيد الصوديوم ,ثاني أكسيد التيتانيوم, ماء مقطر, مستخلص مائي لنبات السدر

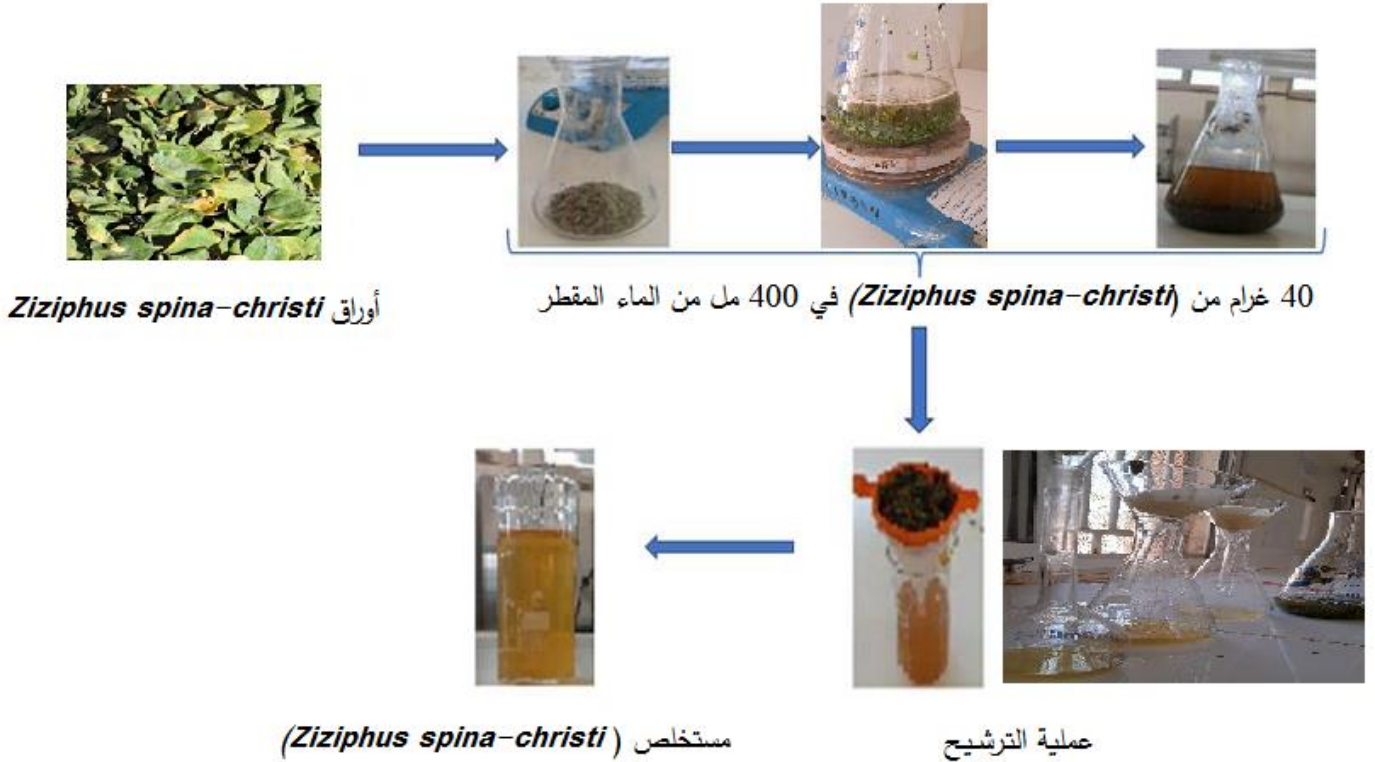
III.2.2 تحضير المستخلص المائي لنبات السدر :

المرحلة الأولى: التحضير الأولي للنبات

تحضير المستخلص المائي تم اقتناء نبات السدر من مشتلة تماسين بولاية تقرت، حيث تم اختيار أوراقه بعناية. بعد ذلك، نُزعت الأوراق من الأغصان وغُسلت جيدًا بالماء المقطر لإزالة الأتربة والشوائب العالقة. ثم تُركت لتجف لمدة يومين تحت الظل وفي درجة حرارة الغرفة، وذلك للحفاظ على المركبات الفعالة الموجودة فيها ومنع تدهورها بفعل أشعة الشمس المباشرة.

المرحلة الثانية : تحضير المستخلص

أخذنا 40 غرام من ورق السدر في دورق مع 400 مل ماء مقطر وتركت لمدة ساعة تقريبا فوق جهاز الرج المغناطيسي تحت درجة حرارة لا تتجاوز 60 درجة مئوية .
بعد مرور المدة المحددة نقوم بترشيح الخليط بورق الترشيح فنحصل على مستخلص السدر .
وبعد عملية الترشيح نقوم بتجميع المستخلص في قارورة عاتمة للضوء ويوضع في الثلاجة عند درجة 4 درجة مئوية لحين الاستخدام.

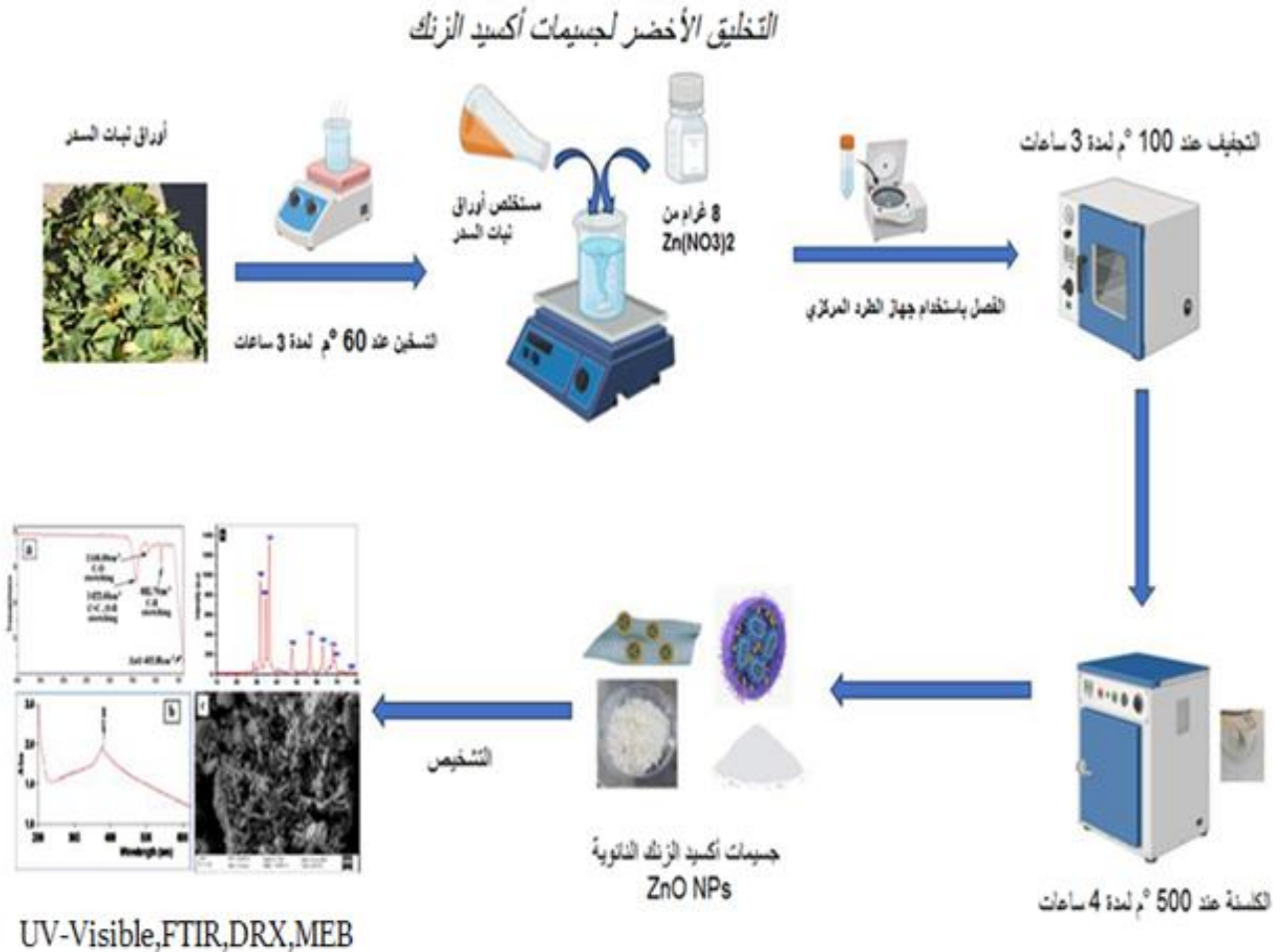


الشكل III-2 رسم تخطيطي يوضح بروتوكول تحضير مستخلص نبات السدر

المرحلة الثالثة: التحضير الأخضر لجسيمات أكسيد الزنك وثاني أكسيد التيتانيوم وأكسيد النيكل النانوية

III.2.3 تصنيع جسيمات أكسيد الزنك النانوية ZNO NPS :

تم في هذه التجربة إذابة 8 غ من نترات الزنك و 4 غ من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) في 100 مل من الماء المقطر، ثم وُضع المزيج على جهاز التحريك المغناطيسي. بعد ذلك، أُضيف 100 مل من المستخلص النباتي المحضر مسبقًا بشكل تدريجي مع التحريك المستمر. سُخِّن المزيج عند درجة حرارة 60 °م مع استمرار التحريك لمدة 3 ساعات، حيث لوحظ تشكل جسيمات أكسيد الزنك النانوية. تم فصل الراسب المتشكل باستخدام جهاز الطرد المركزي، ثم جُمع ووُضع في فرن التجفيف عند درجة حرارة 100 °م لمدة 3 ساعات. بعد ذلك، طُحنت العينة للحصول على مسحوق ناعم. وأخيرًا، خضعت العينة لعملية التكليل عند درجة حرارة 500 °م لمدة 4 ساعات بهدف تحسين التبلور والتخلص من الشوائب، ليتم الحصول في النهاية على مسحوق أبيض من جسيمات أكسيد الزنك النانوية جاهز للتخليق.



III.2.4 تحضير جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم TIO₂NPs :

تم تحضير جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية انطلاقاً من إذابة 8 غ من TiO₂ و 4 غ من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) في 100 مل من الماء المقطر، حيث خضع المزيج لتحريك مغناطيسي مستمر لضمان التجانس. عقب ذلك، أُضيف 100 مل من المستخلص النباتي بشكل تدريجي مع الحفاظ على التحريك.

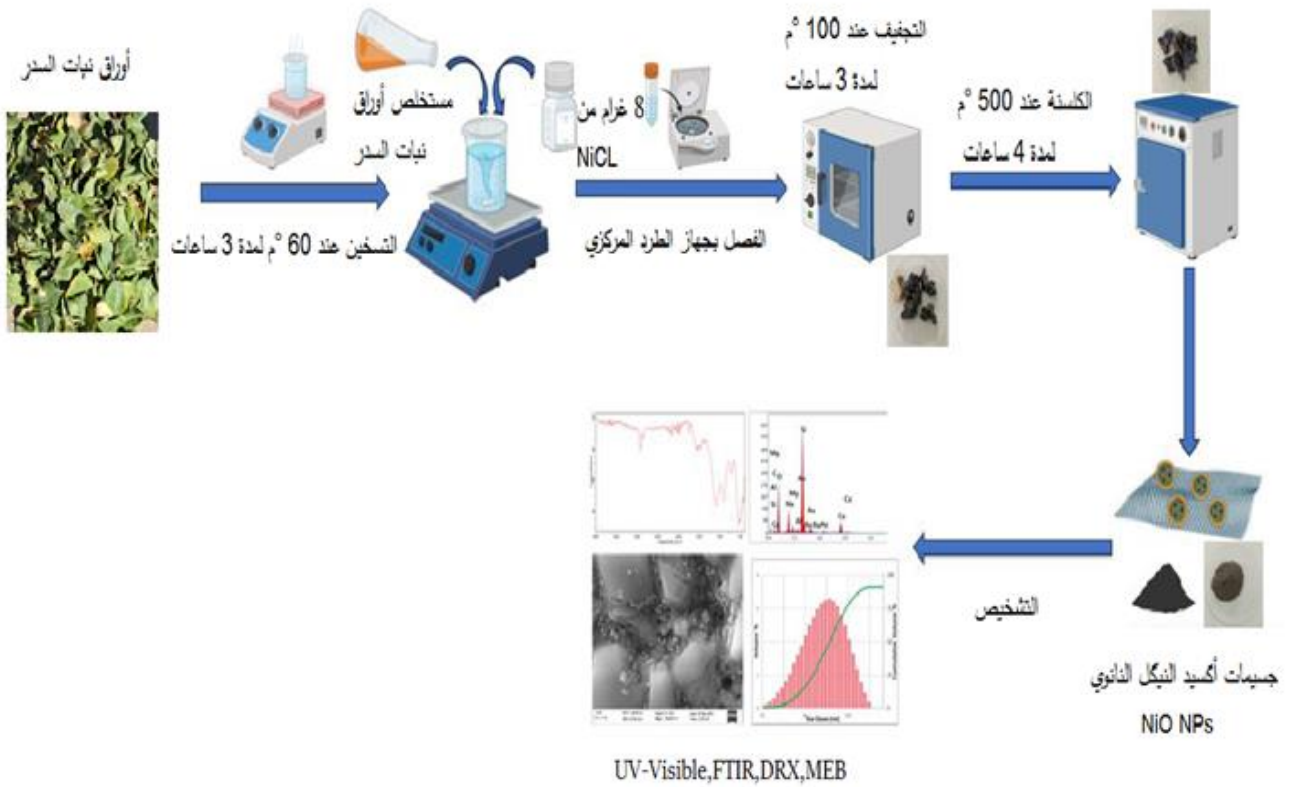
تم تسخين الوسط التفاعلي عند 60 °م لمدة 3 ساعات، مما أدى إلى تشكل الراسب النانوي. بعد انتهاء التفاعل، فُصل الراسب باستخدام جهاز الطرد المركزي، ثم جُمع وخضع لعملية تجفيف عند 100 °م لمدة 3 ساعات. لاحقاً، تم طحن العينة للحصول على مسحوق ناعم، قبل أن تُكلسن عند 500 °م لمدة 4 ساعات بهدف تحسين البنية البلورية وإزالة الشوائب.



الشكل III-4 رسم تخطيطي يوضح بروتوكول تحضير جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم

III.2.5 تصنيع جسيمات أكسيد النيكل NiO NPs :

اعتمد تحضير جسيمات أكسيد النيكل النانوية على إذابة 8 غ من كلوريد النيكل مع 4 غ من هيدروكسيد الصوديوم في 100 مل من الماء المقطر، ثم وُضع المحلول تحت التحريك المغناطيسي لضمان التجانس. تلا ذلك إضافة 100 مل من المستخلص النباتي تدريجيًا مع استمرار التحريك، ثم تسخين المزيج عند 60 °م لمدة 3 ساعات، مما أدى إلى تكوّن الراسب النانوي. بعد اكتمال التفاعل، تم فصل الناتج باستعمال جهاز الطرد المركزي، وجمع الراسب المتشكل ليُجفف عند 100 °م لمدة 3 ساعات. عقب ذلك، خضعت العينة لعملية طحن للحصول على مسحوق ناعم، ثم أُجريت لها عملية التكليل عند 500 °م لمدة 4 ساعات بهدف تحسين الخصائص البنيوية وإزالة الشوائب.



الشكل III-5 رسم تخطيطي يوضح بروتوكول تحضير جسيمات أكسيد النيكل بواسطة مستخلص نبات السدر

مرحلة تحضير الطين :

تم جمع عينة الطين المستعملة في هذه الدراسة من منطقة محلية (محيط الشباب احدى الغابات الواقعة في اقليم بلدية المقارين). بعد جمع العينة خضعت لعملية تحضير أولي شملت إزالة الشوائب والأحجار الكبيرة، تليها عملية التجفيف في الهواء الطلق لمدة معينة تحت الظل. بعد ذلك تم طحن الطين للحصول على مسحوق ناعم ومتجانس، بهدف تسهيل استخدامه في تحضير الطوب وضمان تجانس الخلطة مع الأكاسيد النانوية.

مرحلة دمج الأكاسيد :

بعد تحضير الطين، تم دمج مع الأكاسيد النانوية المحضرة بنسب وزنية محددة، بعد ذلك، تم مزج الخليطين بشكل جيد لضمان تجانس توزيع الأكاسيد داخل العينة. ثم تم تشكيل العينات وإدخالها إلى فرن حراري عند درجة C°600 لمدة 4 ساعات من أجل المعالجة الحرارية وتحسين الخواص البنوية والميكانيكية للطوب المحضر

العينة	الوزن	ZnO	TiO ₂	NiO
A	10 g	0.5 g	0.5 g	0.5 g
B	10 g	1 g	1 g	1 g

الشكل III-6 جدول يوضح نسب الأكاسيد مع الأوزان لكل عينة

بعد انتهاء المعالجة الحرارية والتبريد، تم استخراج العينات من الفرن وتحضيرها لإجراء التحاليل المخبرية إضافة إلى اختبارات ميكروبيولوجية لتقييم الفعالية المضادة للبكتيريا والفطريات للطوب المحضر.

III.3 دراسة النشاط المضاد للبكتيريا :

تُعد البكتيريا من أكثر الكائنات الدقيقة انتشاراً في البيئة، وقد يؤدي نمو بعض أنواعها على الأسطح ومواد البناء إلى زيادة التلوث الميكروبي والتأثير سلباً على جودة البيئة الداخلية للمباني، خاصة في الأماكن الرطبة وضعيفة التهوية [1,2]. لذلك اتجهت الأبحاث الحديثة إلى تطوير مواد بناء ذات خصائص مضادة للميكروبات، ومن بين أكثر المواد الواعدة في هذا المجال الأكاسيد المعدنية النانوية مثل أكسيد الزنك (ZnO) وأكسيد النيكل (NiO) وأكسيد التيتانيوم (TiO₂)، نظراً لقدرتها على تثبيط نمو

الكائنات الدقيقة من خلال إتلاف الأغشية الخلوية وإنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية (3) [ROS،4]. وفي إطار هذه الدراسة، تم تقييم النشاط المضاد للبكتيريا للطوب المدعم بهذه الأكاسيد والمحضر بالتخليق الأخضر باستعمال مستخلص نبات السدر، وذلك باستخدام السلالات البكتيرية المرجعية *Escherichia coli* و *Pseudomonas aeruginosa* و *Staphylococcus aureus*، لتمثيل البكتيريا سالبة الغرام وموجبة الغرام نظراً لأهميتها الطبية والبيئية، إضافة إلى استخدامها الواسع في اختبارات النشاط المضاد للبكتيريا ودراسة مدى حساسيتها تجاه المواد المحضرة [1،3].

III.3.1 بكتيريا *Escherichia coli* :

تُعد *Escherichia coli* بكتيريا سالبة الغرام، عصوية الشكل، تنتمي إلى عائلة *Enterobacteriaceae* تعيش بصورة طبيعية في أمعاء الإنسان والحيوانات، وتُستخدم على نطاق واسع كمؤشر للتلوث الميكروبي في الدراسات البيئية والصحية. تتميز هذه البكتيريا بوجود غشاء خارجي غني بالليبيدات عديدة السكاريد، مما يمنحها مقاومة إضافية تجاه العديد من العوامل المضادة للبكتيريا [1،2]

تم اختيار *Escherichia coli* في هذه الدراسة لتمثيل البكتيريا سالبة الغرام ولتقييم قدرة الأكاسيد المعدنية النانوية على اختراق الجدار الخلوي وتثبيط نمو هذا النوع من البكتيريا.

III.3.2 بكتيريا *Pseudomonas aeruginosa* :

تُعد *Pseudomonas aeruginosa* بكتيريا سالبة الغرام، عصوية الشكل، واسعة الانتشار في التربة والمياه والبيئات الرطبة. وتتميز بقدرتها العالية على تكوين الأغشية الحيوية (Biofilms) ، إضافة إلى مقاومتها المرتفعة للعديد من المضادات الحيوية والعوامل المضادة للميكروبات، مما يجعلها من أكثر البكتيريا صعوبة في المكافحة [2،3]

تم اختيارها في الدراسة الحالية لأنها تُعد نموذجاً مناسباً لتقييم فعالية الطوب المدعم بالأكاسيد النانوية ضد البكتيريا المقاومة والقادرة على الاستقرار على الأسطح المختلفة.

III.3.3 بكتيريا *Staphylococcus aureus* :

تُعد *Staphylococcus aureus* بكتيريا موجبة الغرام، كروية الشكل، تتجمع عادةً في شكل عناقيد. توجد بشكل طبيعي على الجلد والأغشية المخاطية للإنسان، إلا أنها قد تسبب العديد من الالتهابات والأمراض عند انتقالها إلى الأنسجة الحساسة. وتُستخدم هذه البكتيريا بكثرة في اختبارات النشاط المضاد للبكتيريا باعتبارها نموذجاً للبكتيريا موجبة الغرام [1،3]

تم اختيارها لتمثيل البكتيريا موجبة الغرام ودراسة مدى حساسية هذا النوع تجاه الأكاسيد المعدنية المحضرة بالتخليق الأخضر ومقارنة النتائج المتحصل عليها مع البكتيريا سالبة الغرام.

III.3.4 أهمية السلالات البكتيرية المختارة في هذه الدراسة :

يعود اختيار *Staphylococcus aureus* و *Pseudomonas aeruginosa* و *Escherichia coli* إلى كونها من أكثر السلالات البكتيرية استخداماً في تقييم النشاط المضاد للبكتيريا. كما أنها تمثل تراكيب خلوية مختلفة تسمح بدراسة تأثير أكاسيد الزنك والنيكل والتيتانيوم على مجموعة واسعة من البكتيريا. ويُعد نجاح هذه الأكاسيد في تثبيط نمو هذه السلالات مؤشراً مهماً على إمكانية استخدامها في إنتاج طوب بناء مضاد للبكتيريا وصدىق للبيئة، مما يساهم في تحسين الخصائص الصحية لمواد البناء والحد من التلوث الميكروبي داخل المباني [3,4].

III.3.5 تقييم النشاط المضاد للبكتيريا للمركبين النانويين A1 و A2 باستخدام تقنية الانتشار في الآبار

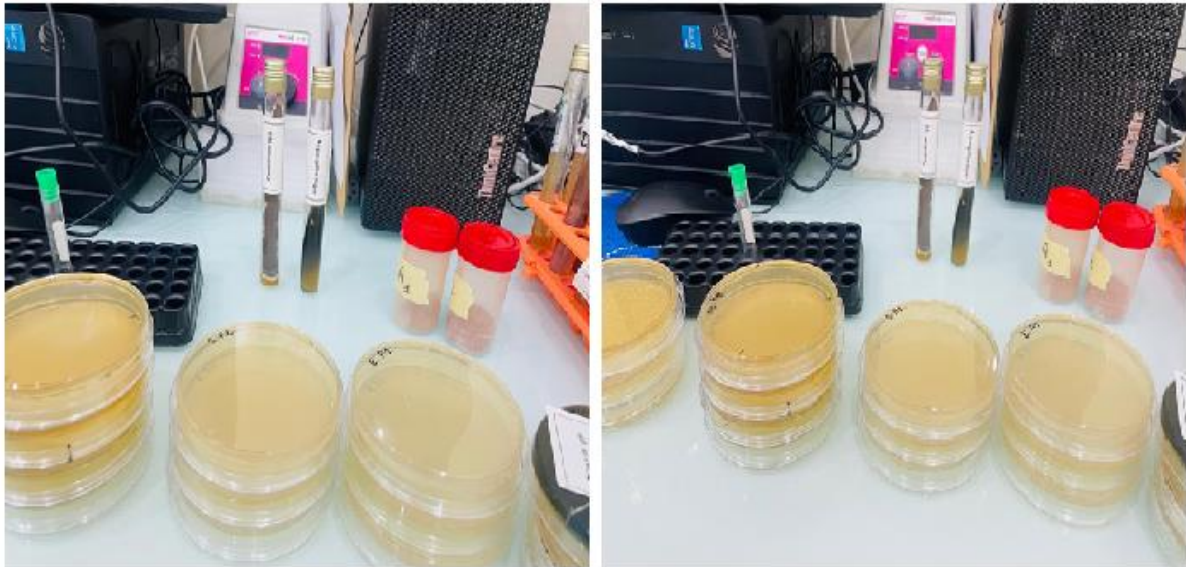
III.3.5.1 البروتوكول المتبع :

تم تقييم النشاط المضاد للبكتيريا للمركبين النانويين المصنعين A1 و A2 ضد ثلاث سلالات بكتيرية مرجعية هي *Escherichia coli* ATCC 25922 و *Staphylococcus aureus* ATCC 25932 و *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 باستخدام تقنية الانتشار في الآبار (Agar-Well Diffusion Method).

تم تحضير أطباق وسط **Mueller-Hinton Agar (MHA)** وفق الإجراءات الميكروبيولوجية القياسية. كما تم تحضير مزارع بكتيرية حديثة النمو (24 ساعة) في مرق **Mueller-Hinton** ، ثم عُذلت كثافة المعلقات البكتيرية لتوافق معيار **0.5 McFarland** (ما يعادل تقريباً 1×10^6 وحدة مكونة للمستعمرات/مل) باستخدام محلول ملحي معقم بتركيز 0.9 % NaCl. نُشرت المعلقات البكتيرية بشكل متجانس على كامل سطح أطباق الآغار باستخدام مساحات قطنية معقمة للحصول على نمو بكتيري متجانس.

بعد التلقيح، تُركت الأطباق لتجف تحت ظروف معقمة لمدة تقارب 15 دقيقة، ثم أُنشئت آبار بقطر 6 مم باستعمال مقاب معقم. أُضيف إلى كل بئر 50 ميكرو لتر من معلقات المركبين النانويين A1 و A2 عند أربعة تراكيز مختلفة هي 40 : و20 و10 و5 ملغ/مل. وقبل الاستعمال، تم تشتيت المركبات النانوية في الماء المقطر المعقم وإخضاعها للموجات فوق الصوتية لضمان الحصول على معلق متجانس ومستقر.

استُخدم الماء المقطر المعقم كشاهد سلبي، في حين استُخدم المضاد الحيوي Gentamicin بتركيز مكافئ لـ 10 ميكروغرام/قرص كشاهد إيجابي للتحقق من حساسية السلالات البكتيرية وصحة الاختبار. حُضنت الأطباق هوائياً عند 37 °م لمدة 24 ساعة. بعد انتهاء فترة الحضانة، تم تقييم النشاط المضاد للبكتيريا بقياس أقطار مناطق التثبيط (مم) المتشكلة حول الآبار باستعمال قدم قياس رقمية (Digital Caliper)، مع احتساب قطر البئر ضمن القياس النهائي. واعتُبرت منطقة تثبيط يزيد قطرها عن 6مم دليلاً على وجود نشاط مضاد للبكتيريا [5]



الشكل III-7-صورة البروتوكول المتبع لتقييم النشاط المضاد للبكتيريا

III.4 النتائج والمناقشة :

III.4.1 التشخيص :

تم تصنيع جسيمات أكسيد الزنك وأكسيد النيكل وثاني أكسيد التيتانيوم النانوية باستخدام مستخلص اوراق نبات السدر (*Ziziphus spina-christ*) وتم توصيفها باستخدام المجهر الالكتروني الماسح MEB, الأشعة المرئية والفوق بنفسجية UV-Visible, التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FTIR , وحيود الأشعة السينية DRX , وتحليل مطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية EDX.

III.4.1.1 تحليل الأشعة المرئية والفوق بنفسجية :

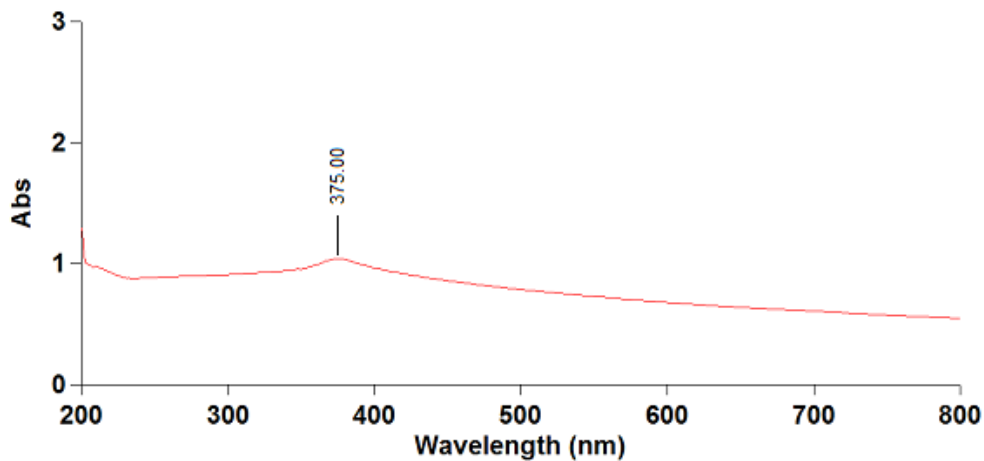
تم استخدام تقنية التحليل الطيفي لامتصاص الأشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV-Vis) لدراسة الخصائص البصرية لجسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي TiO2NPs المصنع بواسطة مستخلص نبات *Ziziphus spina-christi* ، إذ تم قياس أطيايف الامتصاص البصري في نطاق الطول الموجي 800 - 200 نانومتر

Sample Name: Scan Zn2 rep

Collection Time 30-Apr-26 11:04:09 AM

Peak Table
Peak Style Peaks
Peak Threshold 0.0100
Range 800.00nm to 200.00nm

Wavelength (nm)	Abs
375.00	1.042
209.00	0.982



الشكل III-8 طيف الامتصاص للأشعة المرئية والفوق بنفسجية لجسيمات اكسيد الزنك المحضرة

- يُظهر منحنى الأشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV-Vis) لعينة أكسيد الزنك سلوك المادة في المدى الطيفي بين 200 و800 نانومتر. وقد حدد الجهاز قمتين للامتصاص: الأولى عند طول موجي 375 نانومتر بقيمة امتصاص 1.042، والثانية عند طول موجي 209 نانومتر بقيمة امتصاص 0.982. تعكس هذه القمم مناطق الامتصاص الرئيسية للعينة.

Sample Name: Scan Ti 3

Collection Time

30-Apr-26 10:57:11 AM

Peak Table

Peak Style

Peaks

Peak Threshold

0.0100

Range

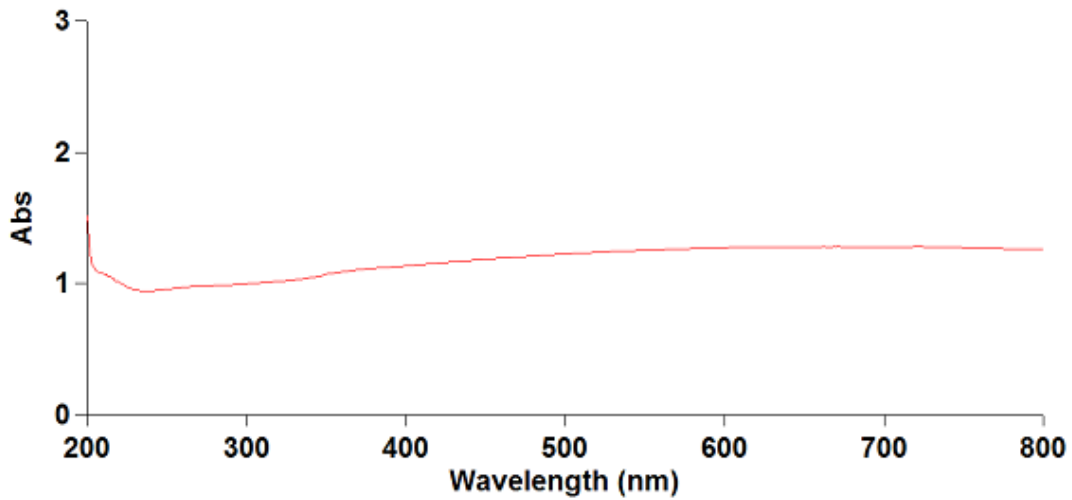
800.00nm to 200.00nm

Wavelength (nm)

Abs

719.00

1.282



الشكل III-9 طيف الامتصاص للأشعة المرئية والفوق بنفسجية لجسيمات ثاني اكسيد التيتانيوم المحضرة

- يُبين المنحنى لعينة أكسيد التيتانيوم كيف تتفاعل المادة مع الضوء في المدى بين 200 و800 نانومتر. يظهر المنحنى امتصاصاً قوياً في بداية القياس، كما سجل الجهاز قمة امتصاص واضحة عند الطول الموجي 719 نانومتر بقيمة 1.282.

Sample Name: Scan Ni

Collection Time

30-Apr-26 11:08:21 AM

Peak Table

Peak Style

Peak Threshold

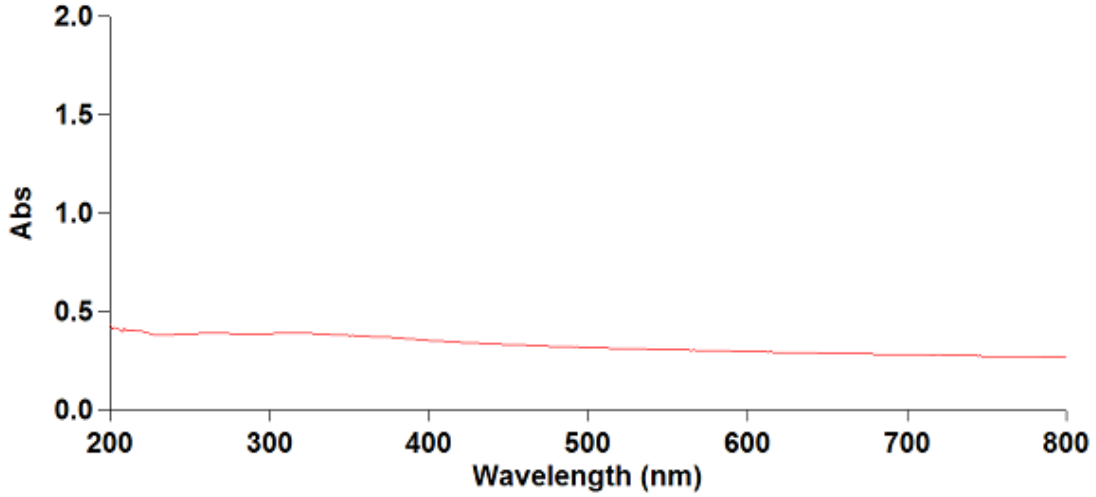
Range

Peaks

0.0100

800.00nm to 200.00nm

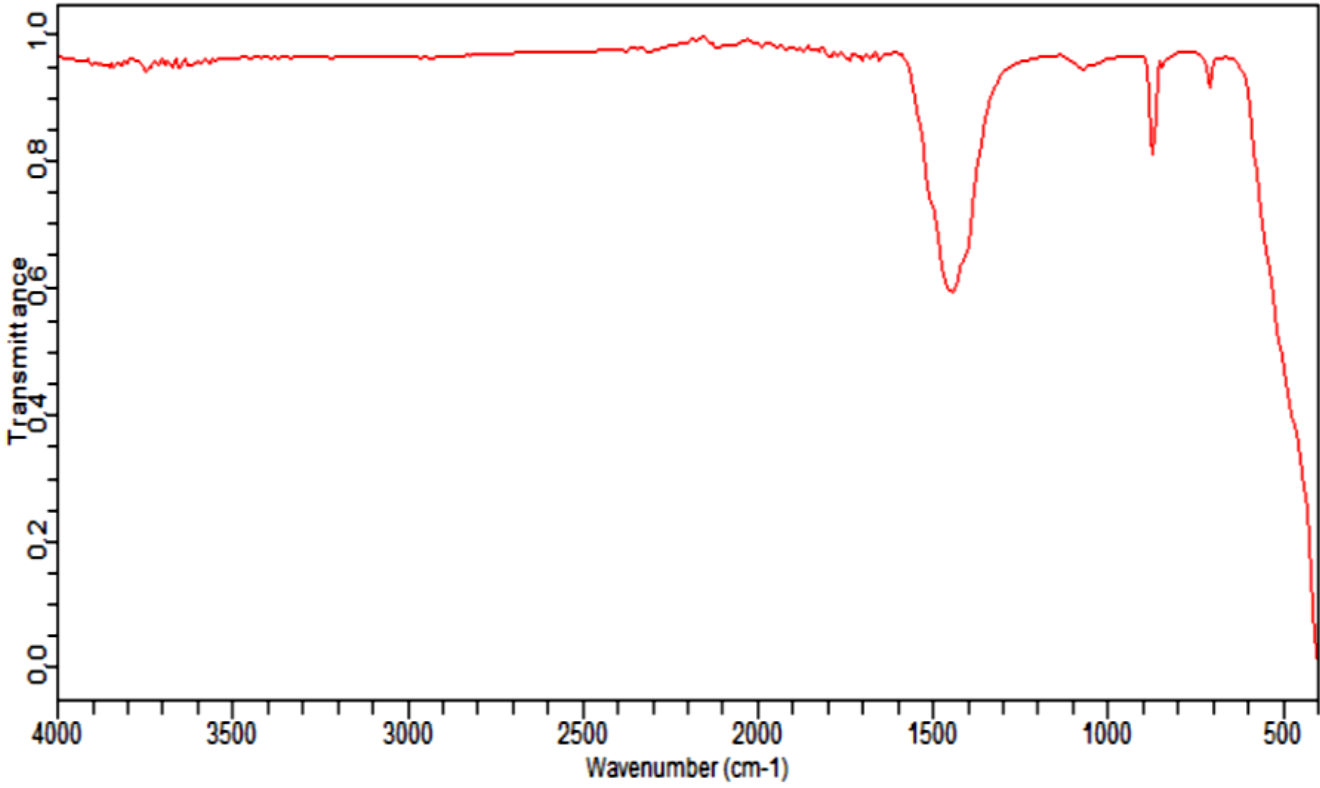
Wavelength (nm)	Abs
310.00	0.392
209.00	0.414



الشكل III-10 طيف الامتصاص للأشعة المرئية وال فوق بنفسجية لجسيمات اكسيد النيكل المحضرة

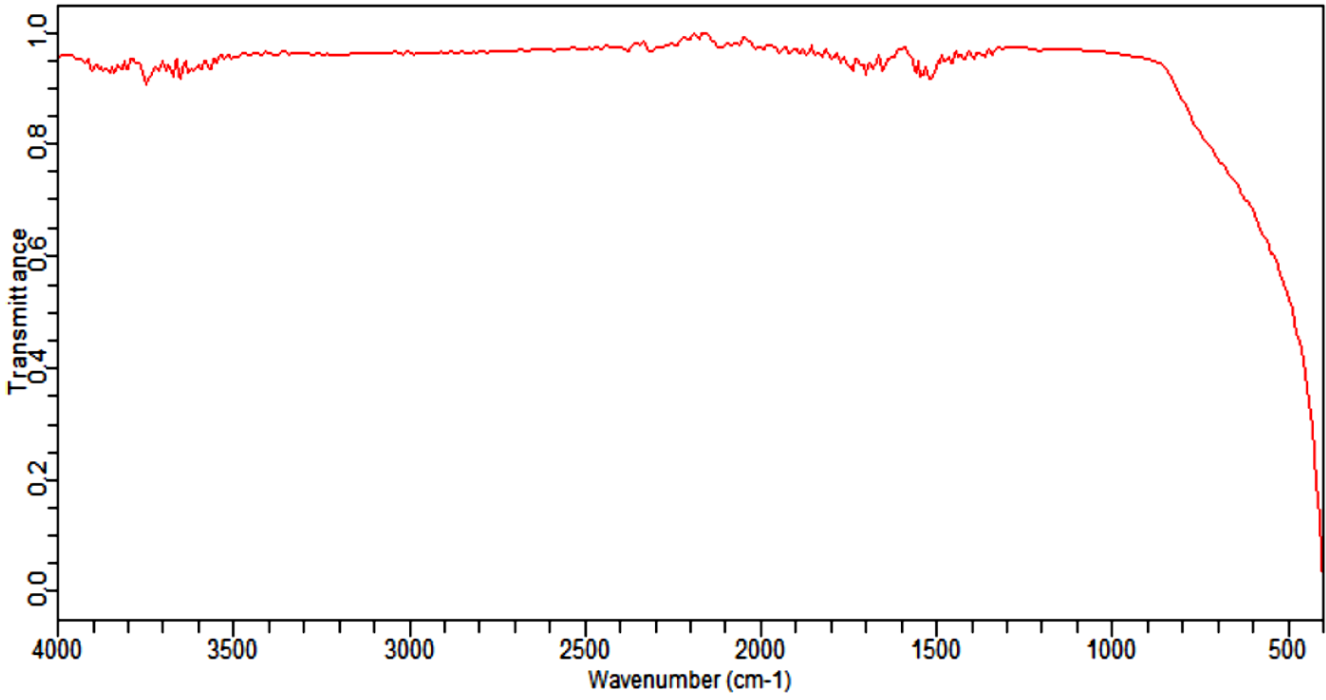
- يُبين منحنى الامتصاص الضوئي (UV-Vis) لعينة النيكل سلوكها في المدى الطيفي الممتد من 200 إلى 800 نانومتر. أظهرت النتائج تسجيل قمتين للامتصاص عند الطولين الموجيين 310 نانومتر (بامتصاص 0.392) و 209 نانومتر (بامتصاص 0.414). يعكس هذا النمط الطبيعة البصرية لهذه المادة.

III.4.1.2 التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء :



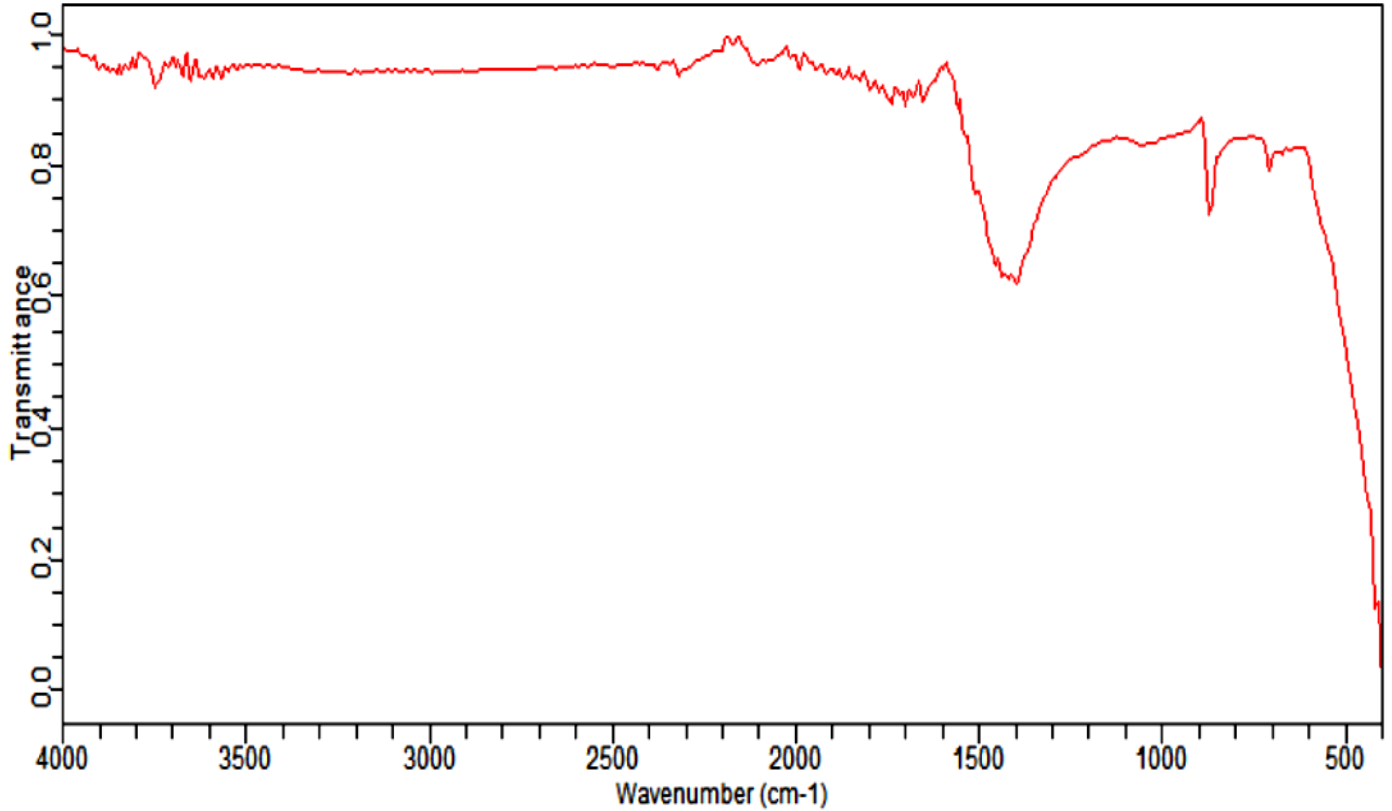
الشكل 11-III طيف FT-IR لجسيمات ZnONPs

*في طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لجسيمات أكسيد الزنك النانوية (ZnO NPs) ، ظهرت حزمة عند حوالي 1500 سم⁻¹ تُنسب إلى اهتزازات روابط C=C العطرية مع احتمال مساهمة بعض المجموعات العضوية الممتصة على سطح الجسيمات. كما لوحظت حزمة عند حوالي 900 سم⁻¹ تعود أساسًا إلى اهتزازات روابط C-H في المركبات العطرية أو الألكينات. أما القمة الواقعة بين 550 و 600 سم⁻¹ فتُعد مميزة لجسيمات ZnO ، حيث تُعزى إلى اهتزازات الرابطة (phonon vibrations) Zn-O ، وتؤكد هذه النتائج تكوّن جسيمات أكسيد الزنك النانوية بنجاح.



الشكل 11-III طيف FT-IR لجسيمات TiO₂NPs

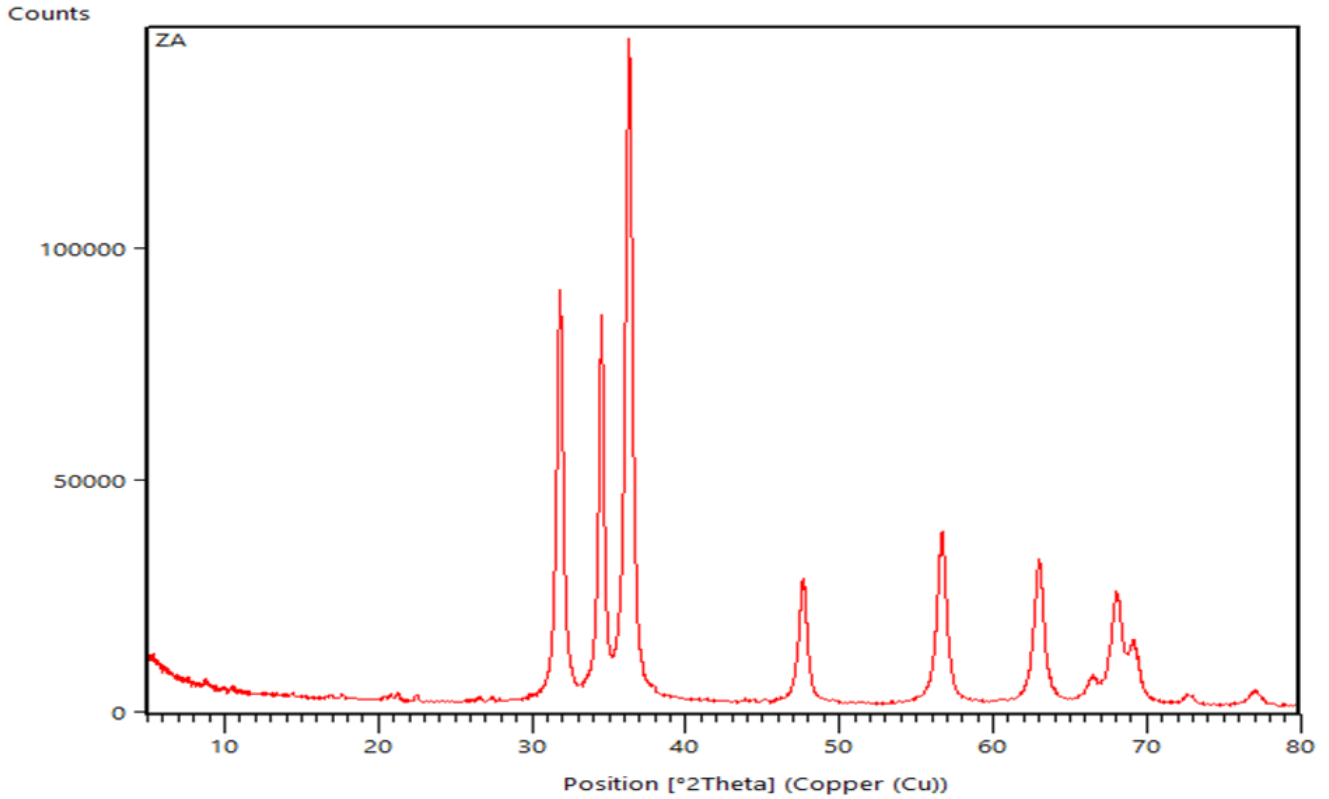
*أظهر طيف الأشعة تحت الحمراء (IR) لجسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية (TiO₂ NPs) حزمة عريضة في المجال 700–500 سم⁻¹، وهي مميزة لاهتزاز الرابطة Ti–O، مما يؤكد تشكل رابطة المعدن–الأكسجين، كما هو موضح في الشكل



الشكل 12-III طيف FT-IR لجسيمات NiONPs

* أظهر تحليل الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) لعينة أكسيد النيكل (NiO) وجود عدة حزم امتصاص مميزة أكدت تشكل المركب المحضر. حيث ظهرت حزمة عريضة في المجال 3600–3200 سم⁻¹ تعود إلى اهتزازات رابطة O–H الناتجة عن الماء الممتص أو مجموعات الهيدروكسيل السطحية. كما سُجلت حزمة قرب 1650–1500 سم⁻¹ مرتبطة بانحناء جزيئات الماء الممتص، إضافة إلى قمة ضعيفة قرب 1100–1000 سم⁻¹ تشير إلى وجود آثار بسيطة لمركبات عضوية أو اهتزازات رابطة C–O. أما الحزمة الرئيسية فقد ظهرت في المجال 650–450 سم⁻¹، خاصة قرب 560–520 سم⁻¹، وهي مميزة لاهتزاز رابطة Ni–O، مما يؤكد نجاح تحضير أكسيد النيكل. كما تدل النتائج على نقاوة العينة وتوافقها مع البنية البلورية المميزة لـ NiO.

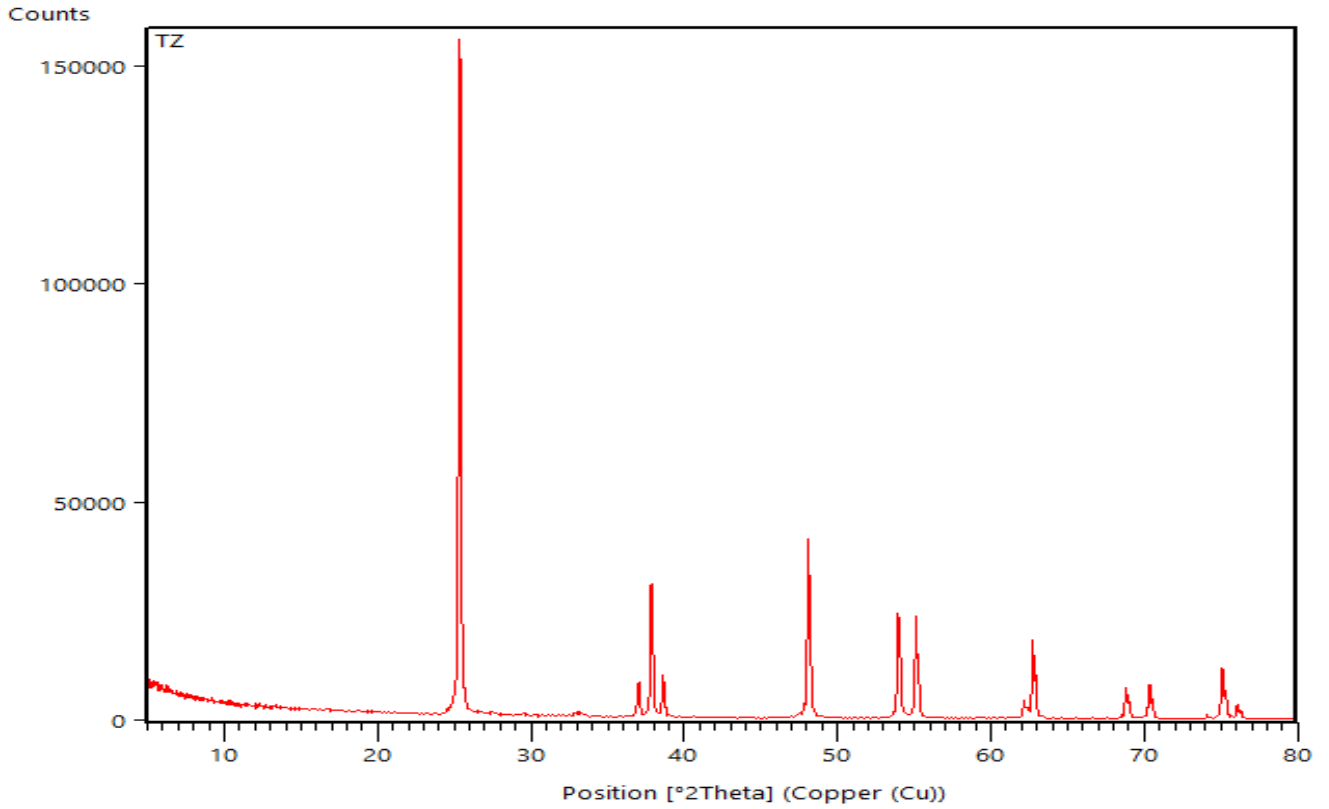
III.4.1.3 تحليل حيود الأشعة السينية :



الشكل III-12 طيف DRX لجسيمات ZnONPs

*أكسيد الزنك (ZnO):

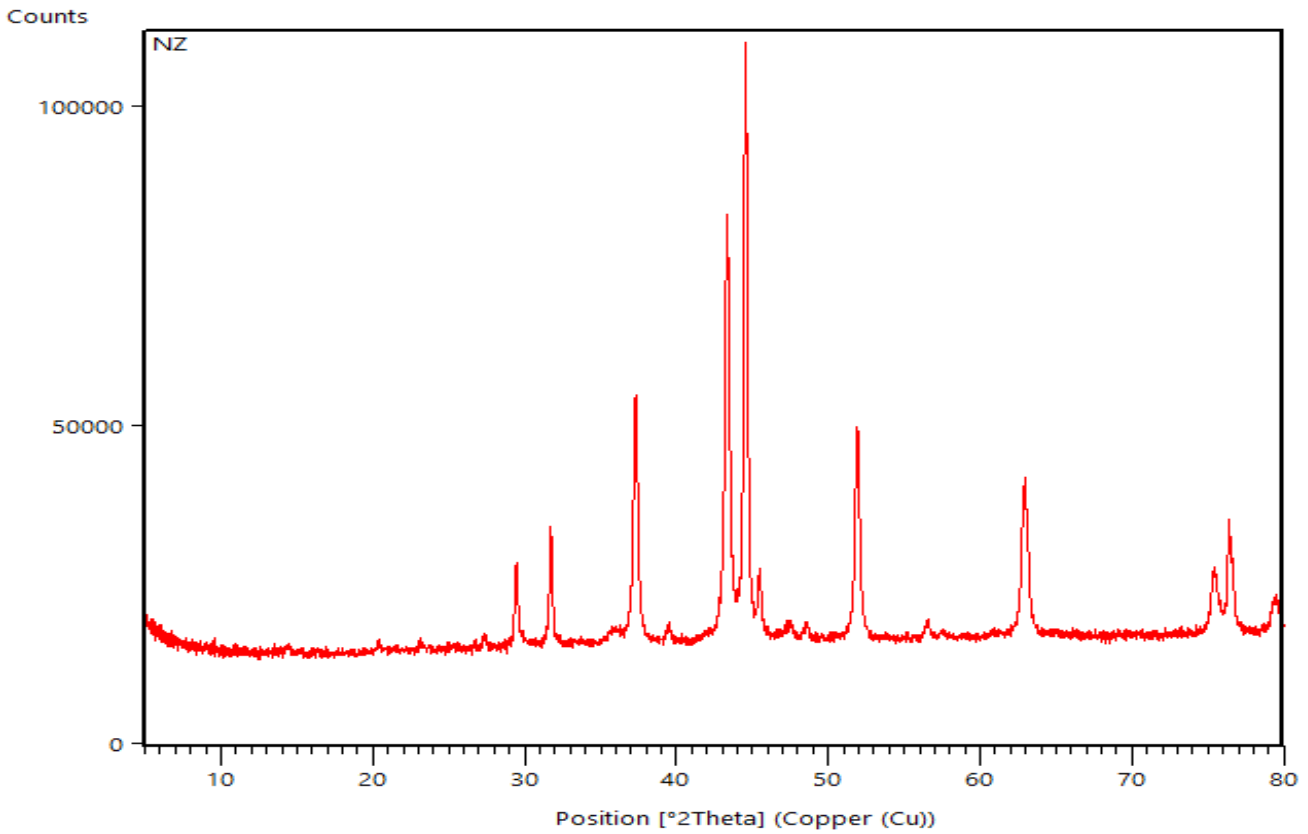
تمت دراسة البنية وحجم جزيئات أكسيد الزنك النانوية باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (DRX) بواسطة جهاز حيود الأشعة السينية عند زاوية 02° . يوضح مخطط حيود الأشعة السينية لجزيئات أكسيد الزنك النانوية المحضرة أن صور الحيود تظهر قمماً بلورية حادة وواضحة موزعة على كامل الطيف، مما يدل على الطبيعة البلورية الجيدة للعينة. يمكن إسناد المستويات البلورية الظاهرة إلى بنية الويرتزيت (Wurtzite) مثل (100)، (002)، (101)، (102)، (110) و (103) على التوالي، وقد أكدت هذه النتائج الطبيعة النانوية البلورية للجسيمات المحضرة.



الشكل 13-III طيف DRX لجسيمات TiO2NPs

*أكسيد التيتانيوم: (TiO₂)

تمت دراسة بنية وحجم جزيئات ثاني أكسيد التيتانيوم باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (DRX) بواسطة جهاز حيود الأشعة السينية عند زاوية 2θ 0.2 يوضح مخطط حيود الأشعة السينية لجزيئات TiO₂ النانوية المحضرة من مستخلص أوراق نبات السدر أن أنماط الحيود تمتد على كامل الطيف وتُظهر قمماً بلورية مميزة، مما يدل على الطبيعة النانوية والبلورية الجيدة للعينة. يمكن ملاحظة وجود مستويات بلورية مختلفة مثل (101)، (103)، (004)، (200)، (105)، (211)، (204) و(116)، والتي تؤكد وجود الطور الأناز 101 مع احتمال ظهور الطور الروتيل 105، مما يثبت نجاح التحضير.



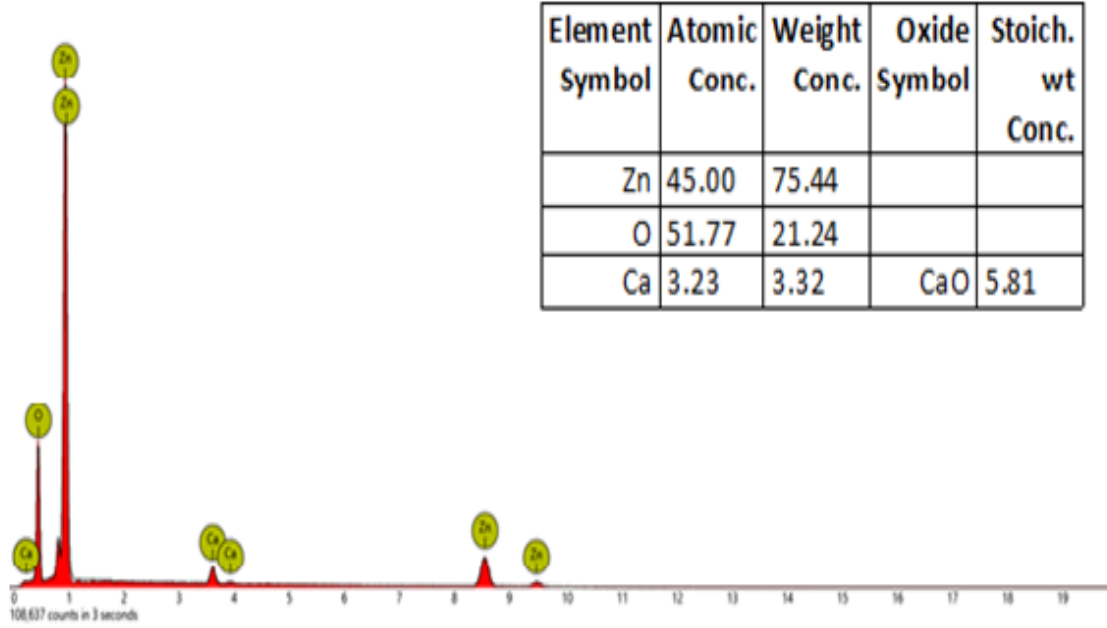
الشكل 14-III طيف DRX لجسيمات NiONPs

*أكسيد النيكل (NiO) :

تمت دراسة البنية وحجم جزيئات أكسيد النيكل باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (DRX) بواسطة جهاز حيود الأشعة السينية عند زاوية 2θ .

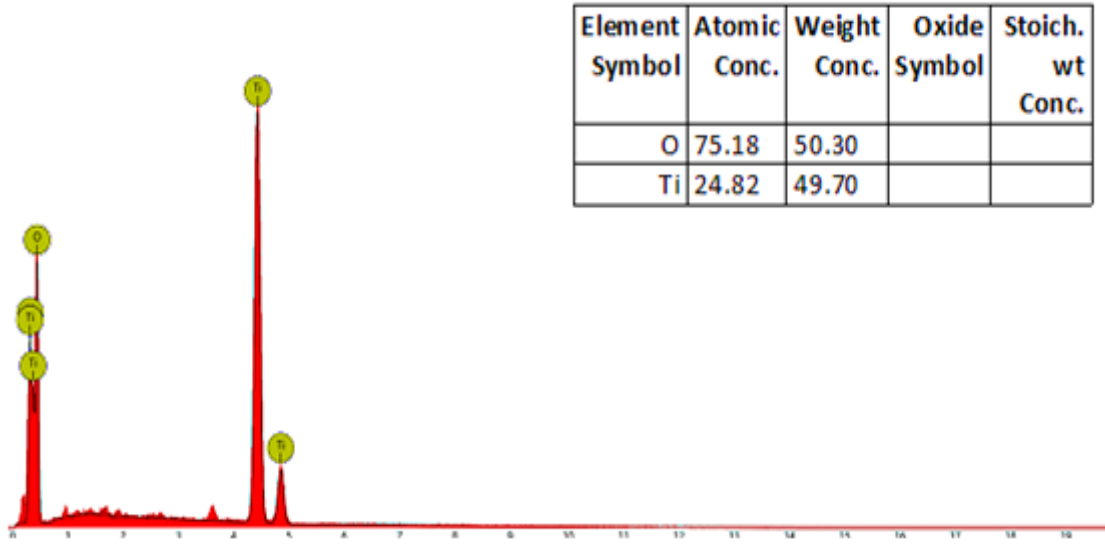
يوضح مخطط حيود الأشعة السينية لجزيئات أكسيد النيكل النانوية أن صور الحيود تُظهر قمماً واضحة وحادة موزعة على كامل الطيف، مما يدل على الطبيعة البلورية الجيدة للعينة. يمكن إسناد هذه القمم إلى المستويات البلورية المميزة للبنية المكعبة FCC من نوع ملح الصخور (Rock-salt structure) مثل (111)، (200)، (220) و(311)، وقد أكدت هذه النتائج الطبيعة النانوية البلورية لأكسيد النيكل المحضّر.

III.4.1.4 تحليل مطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية (EDX) :



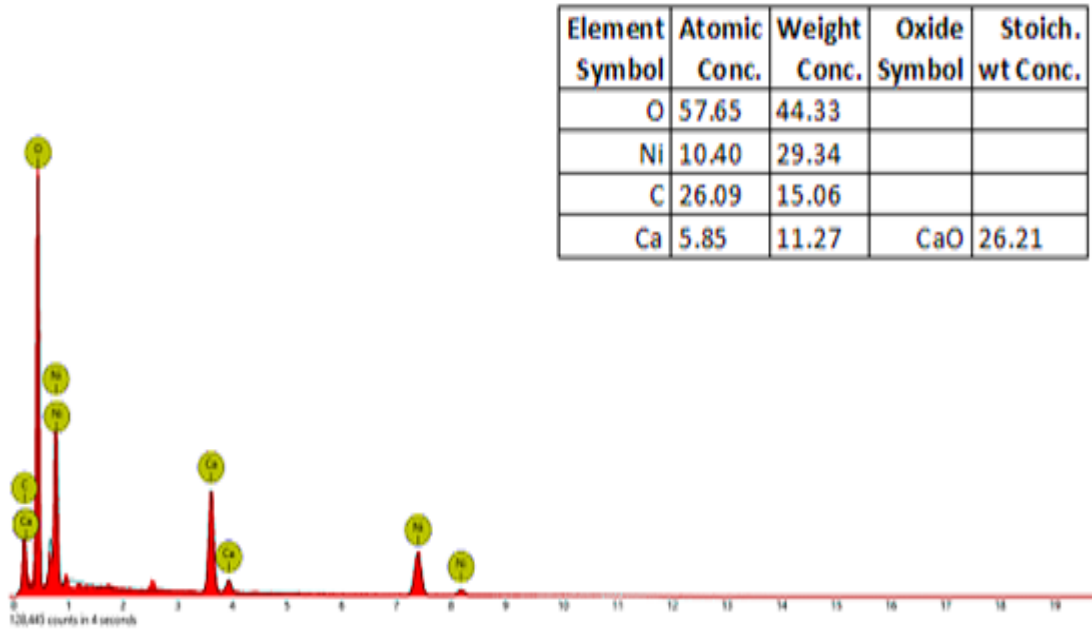
الشكل III-15 طيف EDX لجسيمات ZnONPs

- يوضح الشكل أعلاه نتائج تحليل مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بصورة مجهرية إلكترونية للعينة. كشف التحليل عن وجود عنصري الزنك (Zn) والأكسجين (O) كمكونات أساسية، بنسب تركيز وزني بلغت 75.44% و 21.24% على التوالي، مع وجود آثار للكالسيوم (Ca) بنسبة 3.32% (حُسبت كأكسيد الكالسيوم CaO بنسبة 15.81%). تؤكد هذه البيانات الطيفية والكمية التركيب الكيميائي للعينة، مما يعكس دقة التحليل في تحديد العناصر المكونة لها.



الشكل 16-III طيف EDX لجسيمات TiO₂


- النقاء الكيميائي المتوقع للمادة (مثل أكسيد التيتانيوم TiO₂), مع عدم ظهور أي قمم لعناصر غريبة، مما يعكس خلو يظهر في الشكل تحليل EDX للعينة، حيث أظهرت النتائج تكوّنهما من عنصري الأكسجين والتيتانيوم بنسب وزنية متقاربة (50.30% للأكسجين و49.70% للتيتانيوم). وتشير هذه النتائج إلى توافق تركيب العينة مع المنطقة المدروسة من شوائب عنصرية يمكن الكشف عنها بهذه التقنية

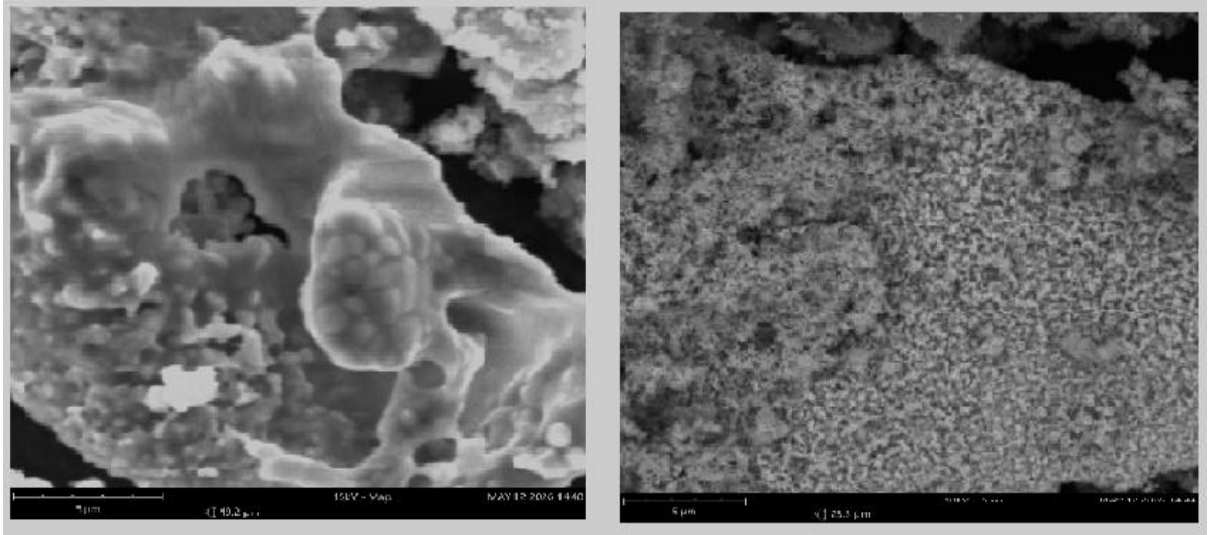


الشكل 17-III طيف EDX لجسيمات NiONPs

- يوضح الشكل تحليل (EDX) لعينة أكسيد النيكل، حيث أظهرت النتائج التركيب العنصري المكون من الأكسجين (O)، النيكل (Ni)، الكربون (C)، والكالسيوم (Ca). سجل الأكسجين أعلى تركيز ذري بنسبة 57.65%، يليه الكربون بـ 26.09%، والنيكل بـ 10.40%، بينما جاء الكالسيوم بنسبة 5.85% (والذي حُسب كأكسيد الكالسيوم CaO بنسبة وزن ستوكيومترية 26.21%). تشير البيانات إلى التوزيع العنصري في العينة، ويشير وجود الكربون والكالسيوم بجانب النيكل والأكسجين إلى تعقيد التركيب السطحي للمادة المدروسة، مما يعكس تفاعلات أو شوائب محتملة في العينة ضمن حدود حساسية جهاز التحليل.

III.4.1.5 تحليل صور المجهر الإلكتروني الماسح :

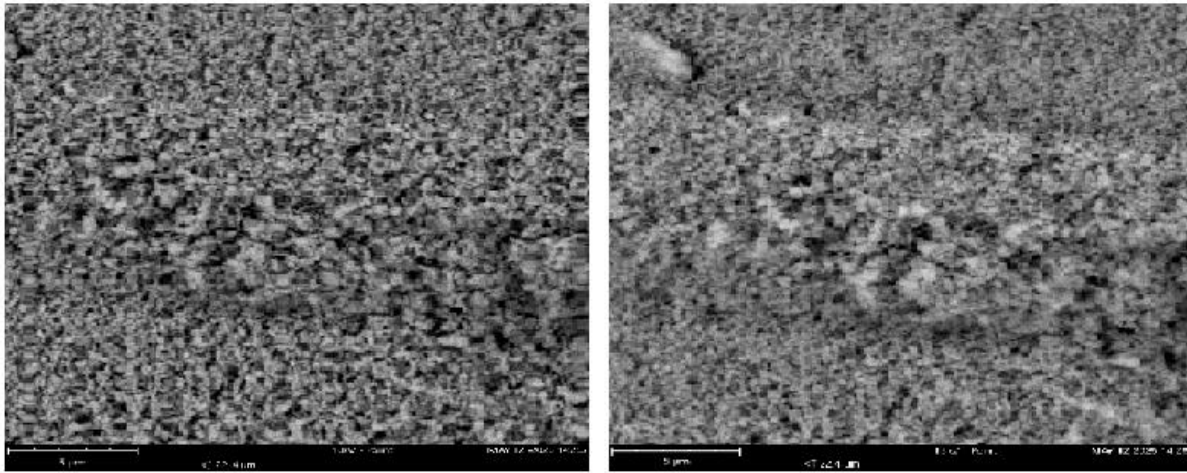
أكسيد الزنك : 



الشكل III-18 صورة لجسيمات ZnONPs المحضر بالمجهر الإلكتروني الماسح


أشارت صورة (MEB) إلى أن بعض الجسيمات النانوية مفصولة جيدًا عن بعضها البعض بينما كان معظمها موجودًا في شكل متكتل . يعود هذا التكتل الى التأثيرات الإلكترونية بالإضافة إلى تأثير العالق المائي

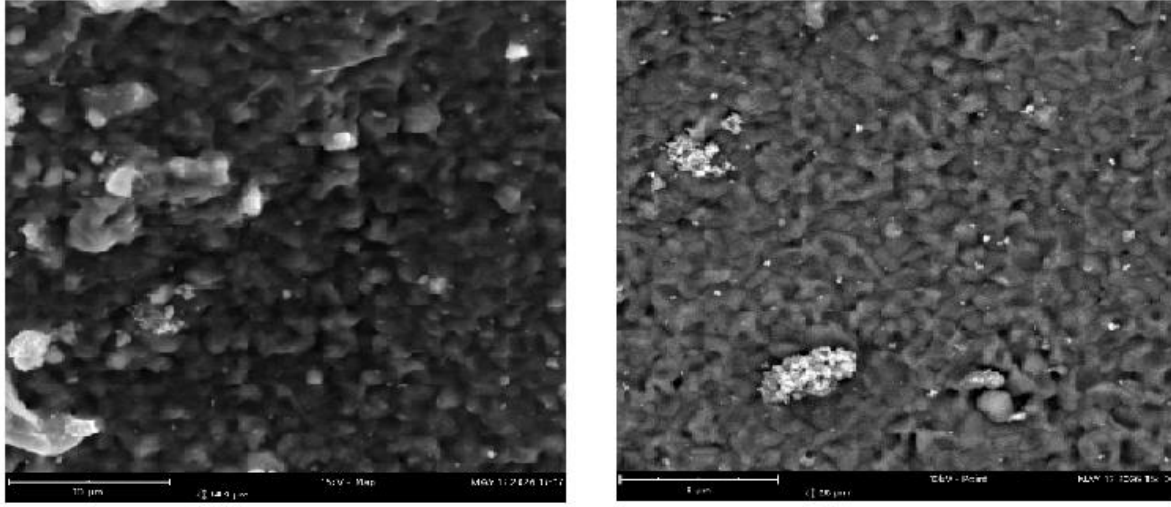
ثاني أكسيد التيتانيوم :



الشكل III-19 صورة لجسيمات TiO₂ المحضر بالمجهر الإلكتروني الماسح

أظهرت صورة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) لأكسيد التيتانيوم (TiO₂) أن المادة المحضرة تتكون من جسيمات دقيقة ذات أبعاد نانوية موزعة على سطح العينة. كما لوحظ وجود تجمعات للجسيمات في بعض المناطق مع توزيع شبه متجانس بأشكال بلورية مختلفة .

أكسيد النيكل : 



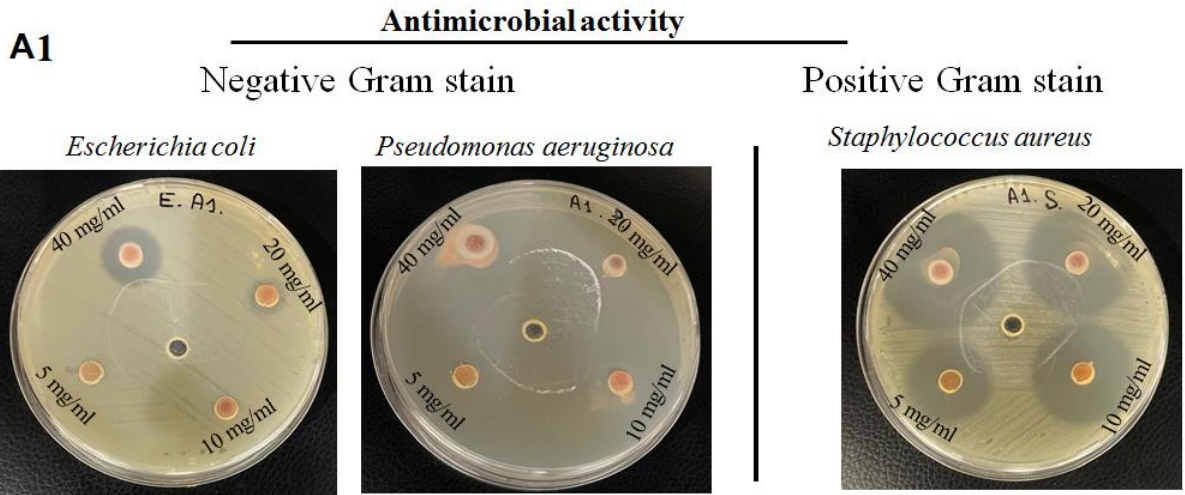
الشكل III-20 صورة لجسيمات NiNPs المحضر بالمجهر الإلكتروني الماسح

بينت صور (MEB) أن أكسيد النيكل المحضر يتكون من جسيمات نانوية صغيرة الحجم. كما لوحظ أن بعض الجسيمات منفصلة عن بعضها، بينما تجمعت أغلبها في شكل تكتلات. ويرجع ذلك إلى قوى التجاذب الموجودة بين الجسيمات النانوية، وهو سلوك شائع تم الإبلاغ عنه في العديد من الدراسات السابقة.

III.4.1.6 نتائج مضاد البكتيريا :

العينة A1 :

mg/mL	Microbial inhibition (mm) A1				Co . Neg.
	40	20	10	5	
<i>Escherichia coli</i> ATCC 25922	19	11	NI	NI	NI
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853	NI	NI	NI	NI	NI
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25932	36	33	32	29	NI



الشكل III-21 نتائج التثبيط لثلاث أنواع البكتيريا

أظهرت نتائج اختبار النشاط المضاد للبكتيريا للعينه A1 فعالية واضحة تجاه البكتيريا المدروسة، حيث سُجلت أكبر مناطق التثبيط ضد *Staphylococcus aureus* ، مما يدل على حساسية عالية لهذه البكتيريا للعينه. كما أظهرت العينه نشاطاً متوسطاً ضد *Escherichia coli* عند التراكيز المرتفعة، بينما لم يظهر أي تأثير عند التراكيز المنخفضة. في المقابل، لم تُسجل أي منطقة تثبيط ضد *Pseudomonas aeruginosa*. وتُعزى هذه النتائج إلى التأثير المضاد للبكتيريا للأكاسيد النانوية المضافة، والتي تساهم في إعاقة نمو الخلايا البكتيرية.

العينه A2:

	Microbial inhibition (mm) A2				Co . Neg.	
	mg/mL	40	20	10		5
<i>Escherichia coli</i> ATCC 25922		25	16	13	7	NI
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853		NI	NI	NI	NI	NI
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25932		33	30	29	27	NI

A2

Antimicrobial activity

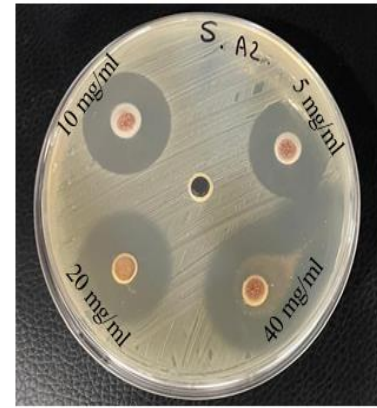
Negative Gram stain

Positive Gram stain

Escherichia coli

Pseudomonas aeruginosa

Staphylococcus aureus



الشكل III-21 نتائج التثبيط لثلاث أنواع من البكتيريا

بينت نتائج العينة A2 نشاطاً مضاداً للبكتيريا تجاه *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli*، حيث ازدادت مناطق التثبيط مع زيادة التركيز، مما يدل على وجود علاقة مباشرة بين التركيز والفعالية المضادة للبكتيريا. وقد كانت *Staphylococcus aureus* الأكثر حساسية للعينة، في حين أظهرت *Escherichia coli* حساسية متوسطة. أما *Pseudomonas aeruginosa* فلم تُظهر أي استجابة للعينة عند جميع التراكيز المختبرة، مما يعكس مقاومتها المرتفعة.

خلاصة :

في ختام هذه الدراسة، يمكن القول إن التحضير الأخضر للجسيمات النانوية لأكاسيد الزنك (ZnO) وأكسيد النيكل (NiO) وثاني أكسيد التيتانيوم (TiO₂) باستعمال المستخلص النباتي لنبات السدر يُعدّ طريقة فعالة وصديقة للبيئة مقارنة بالطرق الكيميائية التقليدية، حيث أظهرت النتائج نجاح عملية التخليق والحصول على جسيمات نانوية ذات بنية بلورية جيدة وخصائص فيزيائية وكيميائية متميزة. كما بينت تقنيات التوصيف المختلفة أن هذه الجسيمات تمتاز بحجم نانوي ومساحة سطحية مرتفعة، مما انعكس إيجاباً على نشاطها البيولوجي. وقد أثبتت الاختبارات البيولوجية فعالية معتبرة لهذه الأكاسيد في تثبيط نمو البكتيريا والفطريات، مع اختلاف التأثير حسب نوع الكائن الدقيق، وهو ما يؤكد قدرتها كمضادات ميكروبية واعدة. إضافة إلى ذلك، فإن إدماج هذه الجسيمات النانوية في الطوب البيئي ساهم في تحسين خصائصه الصحية ومنحه طابعاً مضاداً للكائنات الدقيقة، مما يفتح المجال أمام تطوير مواد بناء ذكية ومستدامة. وعليه، فإن هذه النتائج تعزز أهمية اعتماد تقنيات التخليق الأخضر واستغلال الموارد الطبيعية المحلية في إنتاج مواد نانوية ذات تطبيقات متعددة في المجالات البيئية والطبية والصناعية.

الدراسات المستقبلية :

1. تطوير مواد بناء نانوية ذكية ذات خصائص مضادة للكائنات الدقيقة.
2. دراسة التأثير التآزري بين أكاسيد ZnO و NiO و TiO₂ لتحسين فعاليتها.
3. استغلال الخصائص التحفيزية الضوئية في التنقية الذاتية وإزالة الملوثات.
4. تقييم استقرار وأداء المواد النانوية على المدى الطويل.
5. توسيع تطبيقاتها في المجالات البيئية والطبية.
6. تعزيز استخدام الموارد النباتية المحلية في التخليق الأخضر.
7. التوجه نحو التطبيق الصناعي للنانوتكنولوجيا الخضراء في مواد البناء المستدامة.

1. Madigan, M.T., Bender, K.S., Buckley, D.H., Sattley, W.M., & Stahl, D.A. (2021). Brock Biology of Microorganisms, 16th Edition, Pearson.
2. Tortora, G.J., Funke, B.R., & Case, C.L. (2021). Microbiology: An Introduction, 13th Edition, Pearson.
3. Willey, J.M., Sherwood, L.M., & Woolverton, C.J. (2020). Prescott's Microbiology, 11th Edition, McGraw–Hill.
4. Murray, P.R., Rosenthal, K.S., & Pfaller, M.A. (2023). Medical Microbiology, 10th Edition, Elsevier.
5. Bonev, B., Hooper, J., & Parisot, J. (2008). Principles of assessing bacterial susceptibility to antibiotics using the agar diffusion method. *Journal of antimicrobial chemotherapy*, 61(6), 1295–1301.
6. Kiehlbauch, J. A., Hannett, G. E., Salfinger, M., Archinal, W., Monserrat, C., & Carlyn, C. (2000). Use of the National Committee for Clinical Laboratory Standards guidelines for disk diffusion susceptibility testing in New York state laboratories. *Journal of clinical microbiology*, 38(9), 3341–3348.

