الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة
كلية الكيمياء

مذكرة مقدمة لنيل متطلبات شهادة ماستر أكاديمي
في الكيمياء
التخصص: كيمياء تطبيقية

من إعداد الطالبة: لبوابي رحمة

بعنـــــوان :

تحضير السيليكا النانوية من الرمل الصحراوي بطريقة خضراء GreenSilica

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

محمد الأخضر بالفار	أستاذ التعليم العالي	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	رئيسا
لويزة زنخري	أستاذ التعليم العالي	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	مناقشا
مسعودة دقموش	أستاذ التعليم العالي	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	مؤطرا

السنة الجامعية:2026/2025

بسم الله الرحمن الرحيم

الإهداء

﴿ يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ﴾

صدق الله العظيم

وقال رسول الله ﷺ:

"من سلك طريقاً يلتمس فيه علماً، سهل الله له به طريقاً إلى الجنة"

رواه مسلم

إلى تراب وطني الجزائر.. الذي لم يكن أبداً قاحلاً، بل كان كنزاً ينتظر من يغوص في أعماقه.

إلى نبات الأثل الذي علمني أن العطاء لا يحتاج إلى ظروف مثالية، بل إلى إرادة تنبت من قلب الصحراء.

إلى من قالوا لي: "البحث في الرمل لن يخرج بذهب"، فأثبتُ لهم أن الرمل يمكن أن يصبح سيليكا تنير المستقبل.

إلى أمي: يا من كانت دعواتها سر توفيقي، وسهرها على راحتي هو وقود مشواري.

إلى أبي: يا من علمني أن التعب ثمين حين يقود إلى هدف نبيل.

إلى **اختي** و**إخوتي**: الذين كانوا لي سنداً وعوناً، وشاركوني لحظات التعب والفرح، وكانت كلماتهم المشجعة دافعاً لي لمواصلة المسير.

والى من كان لروحي سكنا ولطموحي دافعا الى القلب الخفي من شاركني عناء الايام

بكلماته لمن كان خلف الكواليس سندا وداعما لا يغيب..

إلى أصدقائي الأعزاء: الذين وقفوا بجانبي، وتقاسموا معي هموم وأفراح هذه الرحلة، وكانوا خير رفيق في درب العلم.

إلى كل باحثة جزائرية تؤمن أن العلم لا يعرف حدوداً، وأن الصحراء يمكن أن تكون منصة انطلاق نحو العالم.

أهديكم **"GreenSilica"**.. حلم تحول إلى حقيقة، ورمل تحول إلى قيمة، وإثبات أن الجزائر قادرة.

شكر وتقدير

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله وتوفيقه أكملت هذا العمل المتواضع.

أمام لحظة الفراغ من هذه المذكرة، تتزاحم في قلبي مشاعر الشكر والعرفان لكل من ساهم في إنجاح هذا العمل، وساندني على درب العلم والمعرفة.

فبكل الحب والتقدير، أتقدم بجزيل الشكر إلى من كانت لي خير معين وأفضل مرشد، إلى أستاذتي الفاضلة "دقموش مسعودة" واستاذ" ميلودي محمد"، التي لم يبخلو عليّ يوماً بنصح أو توجيه، وكانو لي سنداً في كل خطوة. أسأل الله أن يجزيهما عني خير الجزاء، وأن يبارك في علمهما وعملهما.

كما أتقدم بخالص الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة الذين قبلوا قراءة هذا العمل وتقييمه، سائل الله أن يوفقهم ويسدد خطاهم.

ولا أنسى شكر كل من ساندني وساعدني، خاصة مخبر الكيمياء التحليلية و مخبر الأشغال العمومية لولاية ورقلة، ومخبر الفيزياء بكلية الرياضيات وعلوم المادة، ومخبر جيولوجيا الصحراء، الذين فتحوا لي أبوابهم لإجراء التحاليل اللازمة لهذا البحث.

أشكر كل من وقف بجانبي، ودعمني بكلمة أو بنصيحة، وشكراً لكل من آمن بقدرتي على تحقيق هذا الحلم.

وشكراً لكل من علمني حرفاً، فرفعني به درجات.

والشكر الأكبر والأخير لله رب العالمين.

لبوابي رحمة

الفهرس

المقدمة العامة : 2

I . المفاهيم العلمية للسيليكا النانوية 4

I .1.المفاهيم العلمية والمبادئ :..... 4

I .1.1.التعريفات والمعايير الدولية:..... 4

I .1.1.2.الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد النانوية : 4

I .1.2.تعريف السيليكا النانوية : 5

I .1.2.1.التصنيف حسب الحجم والأبعاد : 5

I .1.2.2.التركيب الكيميائي والبلوري للسيليكا :..... 5

I .1.2.3.الخصائص الفيزيوكيميائية للسيليكا النانوية : 7

I .1.2.4.الفرق بين السيليكا التقليدية والنانوية :..... 7

I .1.3.الرمل الصحراوي كمصدر مستدام للسيليكا 8

I .1.4. السيليكا (SiO_2) 10

I .1.5.الكوارتز:..... 11

I .1.5.4. تطبيقات الكوارتز المتنوعة في الصناعة الجزائرية: 13

المراجع 17

II. المنهجية الخضراء ومراجعة الأبحاث 21

II.1. الكيمياء الخضراء 21

II. 1.1. لماذا الكيمياء الخضراء؟ 21

ب . التحول الجذري: من المعالجة إلى المنع: 21

II. 1.1.1. التعريف العلمي والتأسيس : 21

II. 1.1.2. المبادئ التوجيهية الأساسية :..... 22

1. مبدأ الاستباقية 22

3 . مبدأ الدورة الحياتية..... 22

II. 1.2.المبادئ الاثنا عشر للكيمياء الخضراء:..... 23

II .2. الرماد النباتي كمصدر طبيعي 28
المراجع 33
III . وصف للنبتة *Tamarix articulata* (الطرفاء المُفصَّلة أو الأثل) 37
III .1. الصفات العامة للعائلة التاماريكية (*Tamaricaceae*) 37
III .2. وصف جنس الطرفاء (*Tamarix*) 37
III .1.2. نبذة تاريخية: 37
III .3.الخصائص النباتية والبيولوجية لجنس الطرفاء 39
III .1.3. الشكل العام: 39
III .4. خصائص الطرفاء المفصلة (*Tamarix articulata*) 43
المراجع 46
IV – العمل التطبيقي 49
مقدمة : 49
IV. 1. المواد المستخدمة 49
IV. 1.1. الأجهزة و الادوات والمواد الأولية: 49
IV. 2. مخطط العمل لاستخراج السيليكا من العينة: 51
IV. 3. طريقة العمل : 52
IV. 1.3. جمع العينة الرمل : 52
IV. 2.3. جمع عينات نبات الأثل (الطرفاء المُفصَّلة): 54
IV. 4. المعالجة الفيزيائية 54
IV. 1.4. معالجة الرمل الصحراوي: 54
IV. 2.4. معالجة نبات الأثل (الطرفاء المُفصَّلة): 56
IV. 5. المعالجة الكيميائية 59
IV. 1.5. تحضير المحلول القلوي من رماد الأثل 59
IV. 2.5. استخلاص السيليكات من الرمل 63
IV. 3.5. حفظ محلول السيليكات 64
IV. 4.5. ترسيب السيليكا 64

IV. 4.5. فصل جسيمات السيليكا.....64
IV. 5.5.استخلاص السيليكا (مع تحسين الظروف).....64
IV.6. مطيافية الأشعة تحت الحمراء (Fourier Transform Infrared Spectroscopy – FTIR)65
V. النتائج والمناقشة.....67
مقدمة :.....67
V.1.توصيف الرمل:.....67
V.1.1.التحليل الحبيبي للرمل:.....67
V.1.3. تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) للرمل:.....69
V.1.4. تحليل ضمان الأشعة السينية للرمل:.....70
V.2.توصيف المحلول القلوي :.....71
V.2.1. مردود رماد الأثل :.....71
V.2.2. قياس الأس الهيدروجيني (pH) :.....71
V.2.3. تقدير القلوية الكلية :.....71
V.3. استخلاص وترسيب السيليكا.....71
V.4.توصيف السيليكا النانوية المنتجة :.....72
V.4.1.تحليل الأشعة تحت الحمراء (FTIR) :.....72
V.5. تحسين الظروف (عينة العالية).....73
المراجع.....75
الخلاصة العامة.....77
1)التوصيات.....79
2) الأفاق المستقبلية.....79
مشروع اقتصادي: مؤسسة ناشئة لتحضير السيليكا النانوية من رمل صحراوي بطريقة خضراء.....81
1.اسم المشروع:.....81
الملخص.....85

قائمة الأشكال

الفصل الاول:المفاهيم العلمية للسيليكا النانوية		
الشكل (1)	صورة تمثل الجسيمات النانوية تحت المجهر	4
الشكل (2)	أشكال حبيبات الرمل	8
الشكل (3)	مراحل استخلاص كوارتز	10
الشكل (4)	البنية البلورية للكوارتز α-Quartz وβ-Quartz	12
الفصل الثاني:المنهجية الخضراء ومراجعة الأبحاث		
الشكل (1)	التصميم من أجل مستقبل كيميائي صديق للبيئة	25
الشكل (2)	صور مجهرية إلكترونية ماسحة (SEM) تظهر شكل وحجم جسيمات الرماد	29
الفصل الثالث:وصف للنبتة *Tamarix articulata* (الطرفاء المُفصَّلة أو الأثل)		
الشكل (1)	الخصائص النباتية الرئيسية لعائلة التاماريكية	38
الشكل (2)	شكل متفرع من جنس *Tamarix articulate*	39
الشكل (3)	الأوراق الأعرض من الطول في *Tamarix L*	40
الشكل (4)	الأوراق الأعرض من الطول في *Tamarix pauciovulata*	41
الشكل (5)	الإزهار : (أ) *Tamarix gallica*، (ب)*Tamarix Africana*	41
الشكل (6)	شكل حبوب بعض الأنواع من جنس *Tamarix L*	42
الشكل (7)	الشكل العام في *Tamarix articulatavahll*	43
الشكل (8)	ازهار *Tamarix articulate*	45
الشكل (9)	أوراق وبذور *Tamarix articulate*	45
الفصل الرابع:العمل التطبيقي		
الشكل (1)	صورة لموقع العينة الحاسي الخفيف	53
الشكل (2)	صورة لموقع العينة النقوسة	53
الشكل (3)	صورة لموقع العينة العالية	53
الشكل (4)	صورة لعينة حاسي الخفيف	53
الشكل (5)	صورة لعينة النقوسة	53
الشكل (6)	صورة لعينة العالية	53
الشكل (7)	صورة لشجرة نبات الاثل	54
الشكل (8)	صورة لغسل العينات الثلاث	55
الشكل (9)	صورة تجفيف الرمل في الفرن الكهربائي	55
الشكل (10)	صورة لطحن الرمل بواسطة هاون	56
الشكل (11)	صورة لعينة النبات بعد التجفيف	57
الشكل (12)	صورة لفرن الكهربائي	58
الشكل (13)	صورة الرماد الناتج لنبات الاثل	58

الشكل (14)	صورة قبل معايرة المحلول	61
الشكل (15)	صورة بعد معايرة المحلول	61
الشكل (16)	صورة قبل معايرة المحلول	62
الشكل (17)	صورة بعد معايرة المحلول	62
الشكل (18)	صورة قبل تسخين المزيج	63
الشكل (19)	صورة عند انتهاء التسخين	63
الشكل (20)	صورة مطياف الأشعة تحت الحمراء FTIR	65
الفصل الخامس: مناقشة النتائج		
الشكل (1)	صورة لتحليل حيود الأشعة السينية لعينة حاسي الخفيف	69
الشكل (2)	صورة لتحليل حيود الأشعة السينية لعينة العالية	69
الشكل (3)	صورة لتحليل حيود الأشعة السينية لعينة نقوسة	69
الشكل (4)	صورة لتحليل ضمان الأشعة السينية لعينة حاسي الخفيف	70
الشكل (5)	صورة لتحليل ضمان الأشعة السينية لعينة العالية	70
الشكل (6)	صورة لتحليل ضمان الأشعة السينية لعينة نقوسة	70
الشكل (7)	صورة لطيف الأشعة تحت الحمراء لعينة حاسي الحفيف	72
الشكل (8)	صورة لطيف الأشعة تحت الحمراء لعينة العالية	72
الشكل (9)	صورة لطيف الأشعة تحت الحمراء لعينة نقوسة	72
الشكل (10)	صورة لطيف الأشعة تحت الحمراء لعينة العالية بعد التعديل	73

قائمة الجداول

الفصل الاول:المفاهيم العلمية للسيليكا النانوية		
الجدول (1)	الفرق بين السيليكا التقليدية والنانوية	7
الجدول (2)	أهم الخصائص الفيزيائية للكوارتز	12
الفصل الثاني:المنهجية الخضراء ومراجعة الأبحاث		
الجدول (1)	جدول دوري للكيمياء الخضراء	22
الفصل الرابع:العمل التطبيقي		
الجدول (1)	المواد والأجهزة المستخدمة	49
الجدول (2)	الادوات المستعملة وسعتها	50
الجدول (3)	الاحداثيات الجغرافية لمناطق جمع عينات الرمل	52
الفصل الخامس:مناقشة النتائج		
الجدول (1)	جدول نتائج التحليل الحبيبي للعينات الثلاث	67
الجدول (2)	جدول نتائج التحاليل الكيميائية البسيطة	68

قائمة المخططات

الفصل الرابع:العمل التطبيقي		
الشكل	مخطط العمل لاستخراج السيليكا من العينة	51
الشكل	مخطط تحضير المحلول القلوي من رماد الأثل	60

المقدمة العامة

المقدمة العامة :

تُعد السيليكا النانوية من أهم المواد النانوية المستخدمة في مجالات البناء، معالجة المياه، الزراعة، والطب، وذلك بفضل خصائصها الفيزيائية والكيميائية الفريدة كالمساحة السطحية العالية والتفاعلية المتزايدة .[1]تعتمد الطرق التقليدية لتحضيرها على مواد كيميائية خطرة ومكلفة مثل هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) وحمض الهيدروكلوريك(HCl) ، مما يزيد من التلوث البيئي والاعتماد على الاستيراد. تهدف هذه الدراسة إلى تحضير السيليكا النانوية من الرمل الصحراوي بطريقة خضراء ومستدامة، باستخدام رماد نبات الأثل كمصدر قلوي طبيعي وعصير الليمون كحمض طبيعي للترسيب.

الإشكالية:

كيف يمكن تحضير سيليكا نانوية نقية من الرمل الصحراوي بطريقة خضراء باستخدام رماد نبات الأثل وعصير الليمون؟

الأهداف:

- توصيف الرمال الصحراوية المستخدمة (التحليل الحبيبي، الكبريتات، الكربونات، XRD، XRF).
- تحضير محلول قلوي من رماد نبات الأثل وتحديد خصائصه (مردود الرماد، pH، القلوية الكلية).
- استخلاص السيليكات من الرمل وترسيب السيليكا النانوية باستخدام عصير الليمون.
- توصيف السيليكا النانوية المنتجة بواسطة FTIR.
- مقارنة قابلية العينات الثلاث (نقوسة، حاسي خفيف، العالية) للاستخلاص وتحديد تأثير نقاوة الرمل وبلوريته على مردود الاستخلاص.

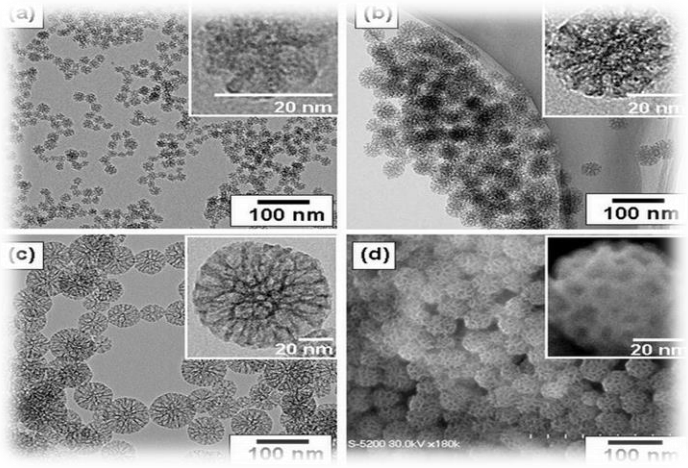
الفصل الأول :
المفاهيم العلمية للسيليكا النانوية

I - المفاهيم العلمية للسيليكا النانوية

I -1-المفاهيم العلمية والمبادئ :

I-1-1.التعريفات والمعايير الدولية:

يعرف علم النانو بأنه فهم المادة والتحكم فيها على المقياس النانوي (1-100 نانومتر)، وهو مقياس يساوي حوالي 10 أضعاف قطر ذرة الهيدروجين [1]. طبقاً للمنظمة الدولية للمعايير (ISO)، تُعرف الجسيمات النانوية بأنها تمتلك أبعاداً خارجية تتراوح بين 1 و 100 نانومتر [2]. تتميز المواد في هذا المقياس بخصائص فريدة ترجع إلى زيادة نسبة الذرات السطحية، مما يزيد النشاط السطحي والتفاعلية الكيميائية [3].



الشكل (1): صورة تمثل الجسيمات النانوية تحت المجهر[4]

I-1-2.1.الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد النانوية :

تتميز المواد النانوية بخصائص فريدة تعود إلى سببين رئيسيين: زيادة نسبة الذرات السطحية وتأثير الحبس الكمومي [3].

أ- الخصائص الفيزيائية:

- **بصرية:** يتغير لون المادة بتغير حجمها بسبب تأثير الحبس الكمومي [5].
- **حرارية:** تنخفض درجة حرارة الانصهار بشكل ملحوظ (الذهب السائب 1064°م مقابل نانو الذهب 300-500°م).

- **ميكانيكية:** تزداد الصلابة والمتانة.

ب- الخصائص الكيميائية:

- **تفاعلية عالية:** بسبب كثرة الذرات السطحية غير المشبعة بروابط [3].
- **تحفيز نانوي:** فعالية عالية في تسريع التفاعلات الكيميائية.

I-1-2.تعريف السيليكا النانوية :

تُعرف السيليكا النانوية (Silica Nanoparticles - SNPs) على أنها جسيمات ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) التي يقل بعدها في واحد أو أكثر من الأبعاد عن 100 نانومتر، وتتميز بخصائص فريدة تنشأ بشكل أساسي من صغر حجمها وزيادة نسبة مساحة سطحها إلى حجمها [6].

I-1-2-1.التصنيف حسب الحجم والأبعاد :

يمكن تصنيف المواد النانوية السيليكاتية حسب أبعادها النانوية إلى ثلاث فئات رئيسية:

1) **مواد صفرية الأبعاد (D0):** حيث تكون جميع الأبعاد الثلاثة في النطاق النانوي، مثل الجسيمات النانوية الكروية[7] .
2) **ب) مواد أحادية البعد (D1):** حيث يكون بعد واحد فقط خارج النطاق النانوي، مثل الأنابيب النانوية والأسلاك النانوية [8].
3) **ج) مواد ثنائية الأبعاد (D2):** حيث يكون بعدان خارج النطاق النانوي، مثل الألواح والصفائح النانوية[9] .

I-1-2-2.التركيب الكيميائي والبلوري للسيليكا :

أ. الأشكال البلورية للسيليكا:

توجد السيليكا (SiO_2) في الطبيعة في عدة أشكال بلورية رئيسية، كل منها يتميز بترتيب ذري فريد وخصائص فيزيائية مميزة. تتمثل الأشكال البلورية الرئيسية في:

1. **الكوارتز (α-quartz و β-quartz):** يعتبر الكوارتز الشكل الأكثر شيوعاً للسيليكا البلورية في القشرة الأرضية. يتميز الكوارتز ببنية ثلاثية الميل تتكون من رباعيات وجوه السيليكون-الأكسجين (SiO_4) المرتبطة ببعضها البعض لتشكل هيكلاً حلزونياً [10].

2. **الكريستوباليت (Cristobalite):** يظهر هذا الشكل البلوري في درجات الحرارة المرتفعة ويتكون من شبكة مكعبة مركزية الوجوه من رباعيات وجوه SiO_4 [10]. يعتبر الكريستوباليت أقل كثافة من الكوارتز بحوالي 15%[11] .
3. **التريديميت (Tridymite):** يمتلك هذا الشكل بلورية سداسية ويوجد عادة في الصخور البركانية. يتميز بوجود قنوات في بنيته البلورية تسمح بمرور الجزيئات الصغيرة[12] .
4. **السيليكا غير المتبلورة (Amorphous silica):** تفتقر هذه الأشكال إلى الترتيب البلوري المنتظم وتشمل المواد مثل الزجاج والسيليكا الهلامية [13].

ب. البنية المجهرية والمسامية:

تتميز السيليكا النانوية ببنية مسامية معقدة يمكن تصنيفها حسب حجم المسام[13] :

1. **المسام الدقيقة (Micropores):** قطرها أقل من 2 نانومتر، تظهر عادة في زيوليتات السيليكا [14].
2. **المسام المتوسطة (Mesopores):** قطرها بين 2-50 نانومتر، مميزة لمواد مثل MCM-41 و [15] SBA-15.
3. **المسام الكبيرة (Macropores):** قطرها أكبر من 50 نانومتر، موجودة في السيليكا الهلامية المسامية .

ج. التركيب السطحي والكيميائي :

يتميز سطح السيليكا النانوية بوجود مجموعات السيلانول (Si-OH) التي تلعب دوراً حاسماً في التفاعلات الكيميائية[16] . تظهر الدراسات أن كثافة مجموعات السيلانول على سطح السيليكا تتراوح بين 4-8 مجموعات لكل نانومتر مربع .

تخضع مجموعات السيلانول لتفاعلات متنوعة تشمل[17] :

- تفاعلات التكثيف (Condensation)
- التفاعلات مع المركبات العضوية
- تكوين الروابط الهيدروجينية

I-1-2-3.الخصائص الفيزيوكيميائية للسيليكا النانوية :

أولاً: الخصائص الفيزيائية النانوية

- مساحة سطحية عالية (50-1000 م²/غ) وحجم نانوي (1-100 نانومتر) [18]
- مسامية منتظمة (قطر المسام 2-50 نانومتر) [19]
- ثبات حراري عالي (حتى 1200°م) وشفافية بصرية [19]

ثانياً: الخصائص الكيميائية النانوية

- سطح نشط يحتوي على مجموعات سيلانول [20] (Si-OH)
- قابلية عالية للتعديل السطحي بربط مجموعات عضوية
- شحنة سطحية متغيرة (زيتا المحتمل ±10 إلى ±50 mV) حسب pH الوسط [20]
- تفاعلية كيميائية متزايدة بسبب كثرة الذرات السطحية [19]

I-1-2-4.الفرق بين السيليكا التقليدية والنانوية :

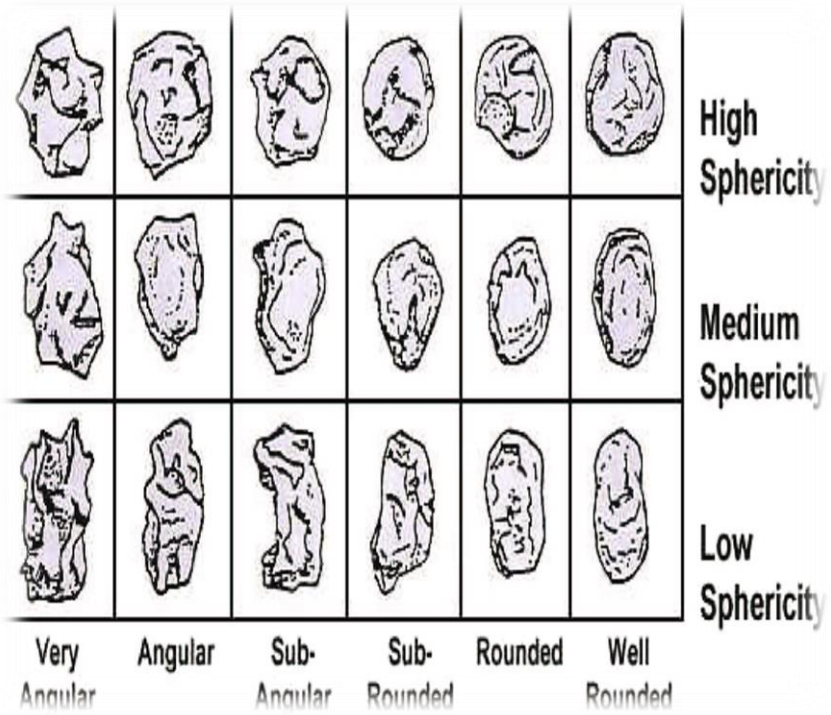
الجدول (1): الفرق بين السيليكا التقليدية والنانوية [21]

الخاصية	السيليكا التقليدية	السيليكا النانوية
نسبة السطح الى الحجم	منخفضة (1-10 م²/غ)	عالية جداً (50-1000 م²/غ)
النشاط السطحي	محدود	عالي جدا
التفاعلية الكيميائية	متوسطة	عالية جدا
الانتشارية	بطيئة	سريعة جدا
الخصائص البصرية	ثابتة	تعتمد على الحجم والشكل
السمية المحتملة	منخفضة	تعتمد على الحجم والشكل

I-1-3.الرمل الصحراوي كمصدر مستدام للسيليكا

I-1-3-1. التكوين الجيولوجي والمصدر الطبيعي:

يُعد الرمل الصحراوي منتجاً نهائياً لعمليات التجوية الفيزيائية والكيميائية المستمرة للصخور السيليكاتية على مدى فترات جيولوجية طويلة [22]. تتكون الصحاري الكبرى في العالم من رواسب رملية هائلة تنتقل عبر عمليات النقل الريحي، مما يؤدي إلى فرز الحبيبات حسب الحجم والكثافة[23]. يتراوح حجم حبيبات الرمل الصحراوي النموذجي بين 0.063 و2 ملم، مع هيمنة للفئة 0.1-0.5 ملم في معظم البيئات الصحراوية [24].



الشكل (2): أشكال حبيبات الرمل[25]

I-1-3-2. التركيب الكيميائي المتغير:

يختلف التركيب الكيميائي للرمل الصحراوي بشكل كبير حسب المصدر الصخري الأصلي والعمليات الثانوية. بشكل عام، يهيمن ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) على التركيب، لكن النقاوة تتأثر بعوامل متعددة

المكونات الرئيسية:

- SiO_2: 70-95% (اعتماداً على نضج الرمل)
- Al_2O_3: 1-10% (من الفلسبار والمعادن الطينية)
- Fe_2O_3: 0.5-5% (كأكاسيد أو ضمن المعادن الثقيلة)
- CaO, MgO, K_2O, Na_2O: نسب متفاوتة حسب المعادن الإضافية

الشوائب المؤثرة:

- أكاسيد الحديد: تعطي اللون الأحمر/الأصفر وتقلل النقاوة البصرية [26]
- المعادن الثقيلة: قد تكون موجودة بنسب ضئيلة في بعض المناطق.
- المواد العضوية: عادة منخفضة في الصحاري الجافة.

I-1-3.3. أهمية مادة الرمل في الصـناعة :

يعتبر الرمل مادة أولية حيوية في العديد من الصناعات الأساسية وتوفره يؤدي الى سهولة معالجته مما يجعله خياراً اقتصادياً مهما. ومن مجالات استخدامه:

- **صناعة الزجاج :** يُعتبر رمل السيليكا (الكوارتز (المادة الرئيسية في صناعة الزجاج، إذ يمنح الزجاج شفافيته وقوته ومقاومته الكيميائية العالية.
- **صناعة الخرسانة والبناء :** يُستخدم الرمل في خلطات الخرسانة مع الإسمنت والحصى، كما يدخل في صناعة الطوب وقوالب البناء.
- **صناعة السيراميك والخزف :** يدخل رمل السيليكا في صناعة السيراميك والبلاط والأدوات الصحية نظرا لخواصه الحرارية والكيميائية.
- **تنقية المياه :** يستخدم الرمل كوسيط ترشيح فعال في محطات معالجة المياه لإزالة الشوائب والملوثات
- **صناعة رقائق السيليكون والألياف الزجاجية :** يُستخلص السيليكون من رمل الكوارتز الصناعة الشرائح الإلكترونية والألياف الزجاجية المستخدمة في الاتصالات والصناعات المتقدمة .

- **الصناعات الكيميائية والمنظفات :** يدخل الرمل في إنتاج بعض المواد الكيميائية والمنظفات الصناعية. لأجل هذه الخصائص في الصناعة، لا بد من استخلاص الكوارتز من مصادره الطبيعية ومعالجته للوصول إلى درجات النقاء المطلوبة تبدأ عملية الاستخلاص باختيار مصادر خام الكوارتز، مثل الكثبان الرملية أو الصخور الحاوية على الكوارتز ، ثم تمر بعدة مراحل تشمل السحق، والغسل والتصنيف، والفصل المغناطيسي، والتعويم والترشيح الحمضي وصولا إلى إنتاج رمل كوارتز عالي النقاء يلبي متطلبات الصناعات الدقيقة(94,95). كما في الشكل التالي:

الشكل (3): مراحل استخلاص كوارتز[27]

I-4-1. السيليكا (SiO_2)

I-4-1-1. التعريف الكيميائي

السيليكا هي أكسيد السيليكون، وصيغتها الكيميائية SiO_2. تتكون من ذرة سيليكون واحدة مرتبطة بذرتي أكسجين، وتتواجد في الطبيعة بنسبة كبيرة في الرمال والصخور [28]

I-1-4-2. أشكال السيليكا في الطبيعة

توجد السيليكا في الطبيعة في شكلين رئيسيين :

- الأول هو السيليكا البلورية، حيث تكون الذرات مرتبة بشكل منتظم، ومن أمثلتها الكوارتز، التريديميت، والكريستوباليت.
- الثاني هو السيليكا غير المتبلورة، حيث تكون الذرات غير مرتبة، ومن أمثلتها السيليكا الهلامية والأوبال والزجاج البركاني [29].

I-1-4-3. أهمية السيليكا

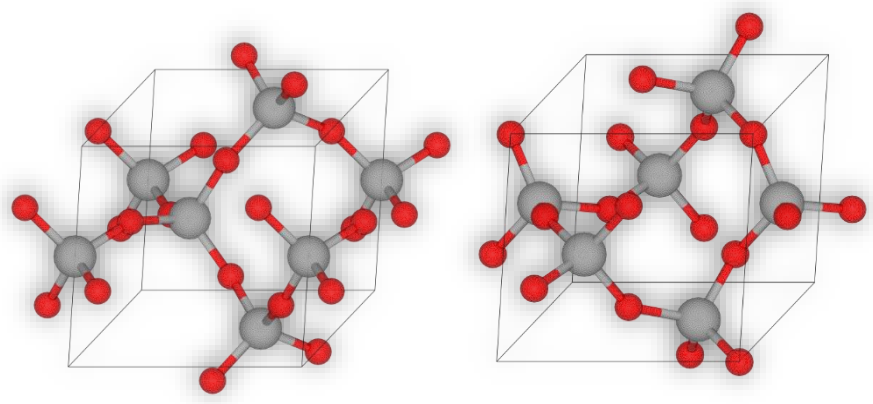
تعتبر السيليكا من أكثر المعادن وفرة في القشرة الأرضية، حيث تشكل حوالي 59% من وزن القشرة الأرضية. تدخل السيليكا في العديد من الصناعات، فهي تستخدم في مواد البناء كالإسمنت والخرسانة والزجاج، وفي الإلكترونيات كالألياف البصرية ورقائق السيليكون، وفي معالجة المياه كمواد مازة للملوثات، وفي مستحضرات التجميل كمواد مالئة ومكثفة، وفي الصناعات الدوائية كسواغ في الأدوية وحامل للمواد الفعالة.

I-1-5.الكوارتز:

I-1-5-1.التعريف والبنية البلورية :

الكوارتز هو معدن يتكون من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2)، وتبنيه البلوري مبني على وحدات رباعيات السطوح (SiO_4) حيث ترتبط هذه الرباعيات مع بعضها البعض بمشاركة ذرات الأكسجين لتشكل شبكة ثلاثية الأبعاد قوية ومستقرة [30].

يوجد الكوارتز في شكلين بلوريين رئيسيين: الكوارتز-α (alpha-quartz) الذي يتبلور في النظام الثلاثي (trigonal) عند درجة حرارة الغرفة، والكوارتز-β (beta-quartz) الذي يتبلور في النظام السداسي (hexagonal) عند درجات حرارة أعلى من 573°م [31] .



الشكل (4): البنية البلورية للكوارتز α-Quartz و β-Quartz

I-2.5-1. خصائص الفيزيائية للكوارتز :

تميز الكوارتز (SiO_2) بصلابة عالية تبلغ 7 درجات على مقياس موس، وكثافة تصل إلى 2.65 غ/سم³، وبريق زجاجي (Vitreous) ومكسر محاري الشكل (Conchoidal fracture) . يتبلور الكوارتز في النظام الثلاثي (Trigonal) في درجة حرارة الغرفة (α-quartz) ويتحول إلى النظام السداسي (Hexagonal) عند 573°م (β-quartz) . كما يتميز بخصائص بصرية فريدة مثل معامل انكسار يتراوح بين 1.543 و 1.554، إلى جانب خاصية الكهرباء الانضغاطية (Piezoelectricity) التي تجعله يدور مستوى استقطاب الضوء . تبلغ درجة انصهاره حوالي 1650-1713°م [32] .

الجدول (2): أهم الخصائص الفيزيائية للكوارتز[27]

الخاصية	القيمة	الوحدة
الكتلة الحجمية	2.65	g/cm³
قرينة الانكسار	1.543	-
درجة حرارة الانصهار	1710	C°
معامل المرونة	54	GPa

مقاومة الضغط	1200	MPa

I-1-5-3.خصائص الكيميائية للكوارتز

أ. مقاومة التآكل والتفاعلات الكيميائية:

يعتبر الكوارتز من أكثر المعادن مقاومة للتآكل الكيميائي في الطبيعة، وذلك بفضل استقرار الروابط القوية بين ذرات السيليكون والأكسجين في تركيبته. هذه المقاومة الاستثنائية للتأكل تجعله خياراً مثالياً للتطبيقات التي تتطلب مواد ذات ديمومة عالية وتحمل للظروف القاسية، خاصة في البيئات الكيميائية العدوانية[27]

ب-التفاعل مع المعادن:

يتميز الكوارتز بمقاومته العالية للتفاعل مع معظم المعادن في ظروف درجة الحرارة والضغط العاديين. ومع ذلك، يمكن أن يتفاعل مع بعض المعادن النشطة مثل الألومنيوم في ظروف خاصة، خاصة عند درجات الحرارة المرتفعة، حيث يمكن أن يحدث اختزال لثاني أكسيد السيليكون [27,33].

ت-التفاعل مع الهيدروكربونات:

يظهر الكوارتز مقاومة عالية للتفاعل مع الهيدروكربونات الصلبة والسائلة، مما يجعله مناسباً للتطبيقات البترولية والصناعات الكيميائية العضوية. هذه الخاصية تجعله مادة مثالية للاستخدام في أنابيب نقل المواد الهيدروكربونية وأوعية التخزين[27,33].

ث - استخدامه كعامل صهر :

بفضل ثباته الكيميائي والحراري، يستخدم الكوارتز كعامل صهر في صناعة المعادن فعند درجات الحرارة العالية، يساعد الكوارتز على خفض درجة انصهار المعادن وتسهيل عملية الصهر، مع الحفاظ على ثباته وعدم تفاعله مع المعادن المنصهرة[33].

I-1-5-4. تطبيقات الكوارتز المتنوعة في الصناعة الجزائرية:

1. الطاقة الشمسية (الخلايا الكهروضوئية)

يُعد الكوارتز عالي النقاوة المادة الخام الأساسية لإنتاج السيليكون المعدني (Metallurgical Grade Silicon)، وهو المكون الرئيسي للخلايا الشمسية. أظهرت العديد من الدراسات العلمية إمكانية استغلال الرمال الجزائرية في هذا المجال:

- **رمل الجلفة (Djelfa) :**

أجرى باحثو مركز البحث في تكنولوجيا أشباه الموصلات للطاقات (CRTSE) دراسة لتحسين عملية الغسل الحمضي لرمل الكوارتز من منطقة الجلفة، حيث تم رفع نسبة السيليكا من 97% إلى 98.5% باستخدام منهجية تصميم التجارب (DOE)، وتم تحديد الظروف المثلى: حجم حبيبات 276.9 ميكرومتر، تركيز حمض 21.15%، وزمن غسل 6 ساعات [34].

- **رمل بسكرة (Biskra) :**

تناولت دراسة نشرت في Open Chemistry (2018) توصيف رمال الكثبان الرملية في منطقة بسكرة، وأظهرت أن العينات تحتوي على نسبة نقاوة عالية من السيليكا تصل إلى 97.6% مع بلورية عالية، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في التطبيقات الكهروضوئية [35].

- **رمل مستغانم (Mostaganem) :**

نشرت دراسة في Acta Physica Polonica A (2016) حول رمال منطقة مستغانم، وأظهرت أن العينات تتمتع بنقاوة عالية جداً تصل إلى 99.5% من السيليكا، مع تحديد المعاملات البلورية (نظام بلوري سداسي، مجموعة فراغية P3221، أبعاد خلية الوحدة a=b=4.9030 Å, c=5.3999 Å)، مما يؤهلها لإنتاج السيليكون النقي المستخدم في الخلايا الشمسية [36].

- **كوارتز إيدوغ (Edough) :**

أظهرت دراسة نشرت في Journal of Renewable Energies (2018) أن كوارتز منطقة إيدوغ بالجزائر يحتوي على نقاوة تتراوح بين 97 و 98% من السيليكا، وهي نسبة عالية تؤهله ليكون مادة أولية لإنتاج السيليكون بعد تطبيق عمليات تنقية أولية [37].

- **الحجر الرملي الكوارتزي (شمال الجزائر) :**

في دراسة حديثة، تم تطوير بروتوكول متكامل لتنقية الحجر الرملي الكوارتزي، حيث تم رفع نسبة السيليكا من 89.15% إلى 99.28% باستخدام الغربلة الحبيبية والفصل المغناطيسي والغسل الحمضي، وهو مستوى كافٍ لإنتاج السيليكون المعدني [38].

- **رواسب درعيسة (Draissa) :**

أظهرت دراسة نُشرت في مجلة Silicon (2022) أن استخدام تقنية الطفو الرغوي العكسي (Reverse Flotation) على رواسب الكوارتز في منطقة درعيسة مكن من رفع نقاوة السيليكا إلى 99.6%، مما يجعلها مناسبة لإنتاج السيليكون للتطبيقات البصرية وصناعة الليزر [38].

2. صناعة الزجاج الشمسي (Solar Glass)

في تطور صناعي كبير، أعلنت مجموعة كيبينغ الصينية (Kibing Group)، إحدى كبريات شركات تصنيع الزجاج في العالم، في أغسطس 2025 عن مشروع استثماري ضخم في الجزائر. يتضمن المشروع:

· إقامة مصنع لإنتاج الزجاج الشمسي بطاقة إنتاجية تصل إلى 1.53 مليون طن سنوياً.

· وحدة لمعالجة وتثمين الرمال السيليسية فائقة النقاء بطاقة 1.08 مليون طن سنوياً.

· خلق 3000 منصب شغل مباشر، مع تحقيق نسبة إدماج محلي تصل إلى 90% [39].

يهدف هذا المشروع إلى استغلال احتياطيات الجزائر الهائلة من رمال السيليكا وبناء سلسلة تصنيع متكاملة في قطاع الطاقة الشمسية، مما يعزز موقع الجزائر كمركز إقليمي للطاقات المتجددة في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا [40].

3. الكوارتز في صناعة المواد النانوية

بسبب صلابته وخصائصه الكيميائية، أصبح الكوارتز الطبيعي مصدراً مهماً لإنتاج جسيمات السيليكا النانوية (Nanometric Silica). أظهرت دراسة شاملة نُشرت في Arabian Journal of Geosciences (2021) حول رمال وادي سوف (شرق الجزائر) أن حجم البلورات

(Crystallite Size) للكوارتز في هذه الرمال يقع ضمن المقياس النانوي، مما يفتح الباب أمام استخدامها مباشرة في تطبيقات النانو وتقنيات المواد المتطورة بعد عمليات تنقية بسيطة. أظهر التحليل الكيميائي أن العينات تحتوي على نسبة عالية من السيليكا تصل إلى 94% مع محتوى منخفض من أكاسيد الحديد والألمنيوم [41].

المراجع

1. Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M. & Rizzolio, F. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine. *Molecules* **25**, 112 (2019).

2. Lu, J. *et al.* Chiral Plasmonic Nanochains *via* the Self-Assembly of Gold Nanorods and Helical Glutathione Oligomers Facilitated by Cetyltrimethylammonium Bromide Micelles. *ACS Nano* **11**, 3463–3475 (2017).

3. Roduner, E. Size matters: why nanomaterials are different. *Chemical society reviews* **35**, 583–592 (2006).

4. Janardan, S. *et al.* Assessment on the antibacterial activity of nanosized silica derived from hypercoordinated silicon (iv) precursors. *RSC advances* **6**, 66394–66406 (2016).

5. Alivisatos, A. P. Semiconductor Clusters, Nanocrystals, and Quantum Dots. *Science* **271**, 933–937 (1996).

6. Singh, P., Srivastava, S. & Singh, S. K. Nanosilica: Recent Progress in Synthesis, Functionalization, Biocompatibility, and Biomedical Applications. *ACS Biomater. Sci. Eng.* **5**, 4882–4898 (2019).

7. Khan, I., Saeed, K. & Khan, I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry* **12**, 908–931 (2019).

8. Xia, Y. *et al.* One-Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications. *Advanced Materials* **15**, 353–389 (2003).

9. Tan, C. *et al.* Recent Advances in Ultrathin Two-Dimensional Nanomaterials. *Chem. Rev.* **117**, 6225–6331 (2017).

10. Gündüz, M. & Asan, K. MagMin_PT: An Excel-based mineral classification and geothermobarometry program for magmatic rocks. *Mineralogical Magazine* **87**, 1–9 (2023).

11. Dove, M. T. Theory of displacive phase transitions in minerals. *American Mineralogist* **82**, 213–244 (1997).

12. Gerya, T. V., Maresch, W. V., Podlesskii, K. K. & Perchuk, L. L. Semi-empirical Gibbs free energy formulations for minerals and fluids for use in thermodynamic databases of petrological interest. *Phys Chem Minerals* **31**, (2004).

13. Kihara, K. An X-ray study of the temperature dependence of the quartz structure. *European Journal of Mineralogy* 63–78 (1990).

14. Graetsch, H., Fl□rke, O. W. & Miehe, G. Structural defects in microcrystalline silica. *Phys Chem Minerals* **14**, 249–257 (1987).

15. Dezfoli, A. R. A. & Adabavazeh, Z. Adjustment of oxygen transport phenomena for Czochralski silicon crystal growth. *Heliyon* **10**, (2024).

16. Kresge, a C., Leonowicz, M. E., Roth, W. J., Vartuli, J. C. & Beck, J. S. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *nature* **359**, 710–712 (1992).

17. Zhuravlev, L. T. The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **173**, 1–38 (2000).

18. Stöber, W., Fink, A. & Bohn, E. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range. *Journal of colloid and interface science* **26**, 62–69 (1968).

19. Brinker, C. J. & Scherer, G. W. *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. (Gulf Professional Publishing, 1990).

20. Chan, S. H. A review on solubility and polymerization of silica. *Geothermics* **18**, 49–56 (1989).

21. Pye, K. & Tsoar, H. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. (Springer Science & Business Media, 2008).

22. Pettijohn, F. J., Potter, P. E. & Siever, R. *Sand and Sandstone*. (Springer Science & Business Media, 2012).

23. Goudie, A. S. *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. (Cambridge university press, 2013).

24. Pye, K. & Tsoar, H. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. (Springer Science & Business Media, 2008).

25. Kasper-Zubillaga, J. J., Linares López, C. & Espino de la Fuente Muñoz, C. A. Provenance of opaque minerals in coastal sands, western Gulf of Mexico, Mexico. *Boletin de la sociedad Geologica Mexicana* **68**, 323–338 (2016).

26. Scheuvens, D., Schütz, L., Kandler, K., Ebert, M. & Weinbruch, S. Bulk composition of northern African dust and its source sediments — A compilation. *Earth-Science Reviews* **116**, 170–194 (2013).

27. Wenden, H. E. Ionic diffusion and the properties of quartz I. The direct current resistivity. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials* **42**, 859–888 (1957).

28. Chan, S. H. A review on solubility and polymerization of silica. *Geothermics* **18**, 49–56 (1989).

29. Bergna, H. E. & Roberts, W. O. *Colloidal Silica: Fundamentals and Applications*. (CRC press, 2005).

30. Mozzi, R. L. & Warren, n B. The structure of vitreous silica. *Applied Crystallography* **2**, 164–172 (1969).

31. Heaney, P. J. Structure and chemistry of the low-pressure silica polymorphs. *Silica: physical behavior, geochemistry, and materials applications* 1–40 (2019).

32. Shehu, J. & Yelwa, N. A. INVESTIGATION OF THE SOLID MINERAL DEPOSITS IN KANO STATE'S SCHIST BELT USING GEOCHEMICAL ANALYSIS. *Fudma Journal of Sciences* **6**, 394–401 (2022).

33. Cerda, R. M. *Understanding Quartz Crystals and Oscillators*. (Artech House, 2014).

34. Kefaifi, A., Sahraoui, T., Kheloufi, A. & Bobocioiu, E. Optimization of Quartz Sand Leaching Process Using Design Experiments Method (DOE). *Silicon* **11**, 1481–1488 (2019).

35. Boussaa, S. A., Kheloufi, A. & Zaourar, N. B. Sand Dune Characterization for Preparing Metallurgical Grade Silicon. *Open Chemistry* **16**, 1227–1232 (2018).

36. Boussaa, S. A., Kheloufi, A., Zaourar, N. B., Kefaifi, A. & Kerkar, F. Characterization of silica quartz as raw material in photovoltaic applications. in *AIP Conference Proceedings* vol. 1758 030043 (AIP Publishing LLC, 2016).

37. Boussaa, S. A., Kheloufi, A. & Zaourar, N. B. Sand Dune Characterization for Preparing Metallurgical Grade Silicon. *Open Chemistry* **16**, 1227–1232 (2018).

38. Medjahed, S. *et al.* Quartz Ore Beneficiation by Reverse Flotation for Silicon Production. *Silicon* **14**, 87–97 (2022).

39. Le groupe chinois Kibing Group présente un projet de production de verre solaire en Algérie. *Radio Algérienne* http://news.radioalgerie.dz/fr/node/69892.

40. Zerouali, M. Energies renouvelables : le groupe chinois Kibing Group présente un projet de production de verre solaire en Algérie. *AL24 News* https://al24news.dz/fr/energies-renouvelables-le-groupe-chinois-kibing-group-presente-un-projet-de-production-de-verre-solaire-en-algerie/ (2025).

41. Meftah, N., Hani, A., Merdas, A., Sadik, C. & Sdiri, A. A holistic approach towards characterizing the El-Oued siliceous sand (eastern Algeria) for potential industrial applications. *Arab J Geosci* **14**, 2486 (2021).

الفصل الثاني :
المنهجية الخضراء ومراجعة الأبحاث

II ـ المنهجية الخضراء ومراجعة الأبحاث

II-1- الكيمياء الخضراء

II- 1-1. لماذا الكيمياء الخضراء؟

أ ـ نقطة البداية: الأزمة البيئية الكيميائية:

أدى التطور الصناعي والتكنولوجي في القرن العشرين إلى إنتاج كميات هائلة من المواد الكيميائية الاصطناعية، كثير منها ثبتت سميته وتأثيره الضار على الصحة والبيئة. لاحظت راشيل كارسون في كتابها المؤثر "الربيع الصامت" (1962) أن المبيدات الكيميائية مثل الـDDT تتراكم في السلسلة الغذائية وتسبب أضراراً بيئية جسيمة [1]. شكل هذا العمل نقطة تحول في الوعي البيئي العالمي، وأبرز الحاجة الملحة لإعادة التفكير في الطريقة التي نصمم وننتج بها المواد الكيميائية.

ب ـ التحول الجذري: من المعالجة إلى المنع:

استجابة لهذه التحديات، تطورت الكيمياء البيئية كحقل علمي يدرس مصير وتأثير الملوثات الكيميائية في البيئة، ويطور طرقاً لمعالجتها بعد تولدها. ومع ذلك، أدرك العلماء أن هذا النهج "المعالج عند المصب" له حدود جوهرية: فهو رد فعل على المشكلة بدلاً من منعها، وغالباً ما ينقل التلوث من وسط إلى آخر (مثل نقل الملوثات من الماء إلى الطين) [2].

من هنا نشأ مفهوم الكيمياء الخضراء كفلسفة استباقية تهدف إلى تصميم العمليات الكيميائية منذ البداية لتكون آمنة ومستدامة، بدلاً من التعامل مع عواقبها لاحقاً. بينما تركز الكيمياء البيئية على "كيف نتعامل مع النفايات الخطرة؟"، تركز الكيمياء الخضراء على "كيف نمنع تولد النفايات الخطرة أصلاً؟"[3]

II- 1-1.1. التعريف العلمي والتأسيس :

عرّف بول أناستاس وجون وارنر، مؤسسا المجال، الكيمياء الخضراء في كتابهم المؤسس سنة 1998 بأنها: "تصميم المنتجات والعمليات الكيميائية التي تقلل أو تزيل استخدام وتوليد المواد الخطرة" [4]. هذا التعريف يضع ثلاثة أهداف مركزية:

1. تقليل الاستخدام: استبدال الكواشف الخطرة بأخرى آمنة
2. منع التوليد: تصميم عمليات لا تنتج مواد خطرة كمنتجات ثانوية
3. الاستدامة الشاملة: مراعاة الجوانب الاقتصادية والاجتماعية والبيئية

II- 2.1-1. المبادئ التوجيهية الأساسية :

تستند الكيمياء الخضراء إلى ثلاث قواعد توجيهية أساسية تميزها عن المقاربات التقليدية:

1. مبدأ الاستباقية

تتعامل الكيمياء الخضراء مع المشكلات البيئية قبل حدوثها، من خلال التصميم الذكي للجزيئات والعمليات. هذا يتطلب فهماً عميقاً لعلاقة البنية بالنشاط والسمية[5] .

2 . مبدأ الذرية

تهدف إلى تحقيق أقصى كفاءة ذرية، حيث تتحول معظم ذرات المواد المتفاعلة إلى منتجات مفيدة، مع تقليل الفاقد إلى أدنى حد. يقاس هذا بـ الكفاءة الذرية التي قدمها باري تروست [6].

3 . مبدأ الدورة الحياتية

تأخذ في الاعتبار الدورة الكاملة للمادة، من استخراج المواد الخام، مروراً بالتصنيع والاستخدام، وانتهاءً بالتخلص النهائي. هذا يتجاوز حدود المصنع ليشمل التأثير البيئي الشامل [7].

الجدول (1): جدول دوري للكيمياء الخضراء[8]

II- 2-1.المبادئ الاثنا عشر للكيمياء الخضراء:

المبدأ الأول: منع النفايات

يستند هذا المبدأ إلى نظرية الحماية الوقائية التي تنص على أنه عندما يكون هناك تهديد بحدوث ضرر جسيم أو لا رجعة فيه، لا ينبغي استخدام عدم اليقين العلمي الكامل كمبرر لتأخير اتخاذ إجراءات فعالة لمنع التدهور البيئي [8]. في سياق الكيمياء، يعني هذا أن التصميم الوقائي للعمليات الكيميائية هو استراتيجية أكثر فعالية من المعالجة العلاجية للنفايات بعد تولدها.

المبدأ الثاني: اقتصاد الذرات

يعتمد هذا المبدأ على مفهوم الكفاءة التركيبية الذي قدمه باري تروست [9] رياضياً، يمكن التعبير عنه بالعلاقة:

$$\mathrm{AE} = \frac{\text{MWالمنتج}}{\text{MW المواد المتفاعلة}} \times 100\%$$

حيث AE هي الكفاءة الذرية (Atom Economy)، وMW هي الكتلة الجزيئية. هذا المبدأ يستمد أساسه من قانون حفظ المادة في الكيمياء، مع إضافة البعد الاقتصادي والبيئي لتحقيق الاستخدام الأمثل للمواد الأولية.

المبدأ الثالث: تخليق مواد كيميائية أقل خطورة

يستند هذا المبدأ إلى علم السموم الكيميائي ونظرية العلاقة بين البنية والسمية [5]. تنص النظرية على أن السمية الكيميائية ليست عشوائية، بل يمكن التنبؤ بها بناءً على الخصائص التركيبية للجزيئات، مما يسمح بتصميم جزيئات أقل سمية مع الحفاظ على الفعالية الوظيفية.

المبدأ الرابع: تصميم مواد كيميائية أكثر أماناً

يرتكز هذا المبدأ على مفهوم الكيمياء الخضراء الحاسوبية التي تستخدم النمذجة الجزيئية والمحاكاة الحاسوبية للتنبؤ بخصائص السلامة للمركبات الكيميائية قبل تخليقها فعلياً [10]. هذا يمثل انتقالاً من النهج التجريبي التقليدي إلى النهج التصميمي القائم على الفهم النظري.

المبدأ الخامس: استخدام مواد مساعدة أكثر أماناً

يستند هذا المبدأ إلى نظرية المذيبات وتصنيفات السمية القائمة على العلاقة الكمية بين البنية والنشاط للمذيبات الكيميائية [11]. طور الباحثون أدوات تصنيفية مثل دليل اختيار المذيبات الذي يصنف المذيبات حسب سميتها، القابلية للاشتعال، والتأثير البيئي.

المبدأ السادس: تصميم من أجل كفاءة الطاقة

يعتمد هذا المبدأ على الديناميكا الحرارية للعمليات الكيميائية وخاصة قانون هيس ومفهوم طاقة التنشيط . الهدف هو تقليل طاقة جيبس الحرة للتفاعل من خلال استخدام محفزات أو ظروف تفاعل مثلى [12].

المبدأ السابع: استخدام مواد أولية متجددة

يستمد هذا المبدأ أساسه من نظرية الاستدامة ومبادئ الكيمياء الحيوية . يركز على التحول من الاقتصاد الخطي القائم على استخراج الموارد واستهلاكها، إلى الاقتصاد الدائري القائم على إعادة التدوير والتجديد [13].

المبدأ الثامن: تقليل المشتقات

يستند هذا المبدأ إلى نظرية التركيب العضوي ومفهوم خطوات الحماية/إزالة الحماية . ينص على أن كل خطوة حماية إضافية تزيد من عدد خطوات التركيب وتقلل من الكفاءة الإجمالية وفقاً لمعادلة يلمز (Yilmaz Equation):

$$E_{Total} = \frac{E_1 \times E_2 \times \ldots \times E_n}{n}$$

حيث E_T هي الكفاءة الإجمالية، و E_i هي كفاءة كل خطوة، و n هو عدد الخطوات.

المبدأ التاسع: التحفيز

يعتمد هذا المبدأ على نظرية الحفز التي أسسها أوستفالد وفاريوس (Ostwald & Varjus) في القرن التاسع عشر. رياضياً، يمكن التعبير عن تأثير المحفزات من خلال معادلة أرهينيوس المعدلة (Modified Arrhenius Equation):

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

حيث يقلل المحفز من طاقة التنشيط E_a، مما يزيد من ثابت المعدل k في درجات حرارة منخفضة [14].

المبدأ العاشر: تصميم من أجل التحلل

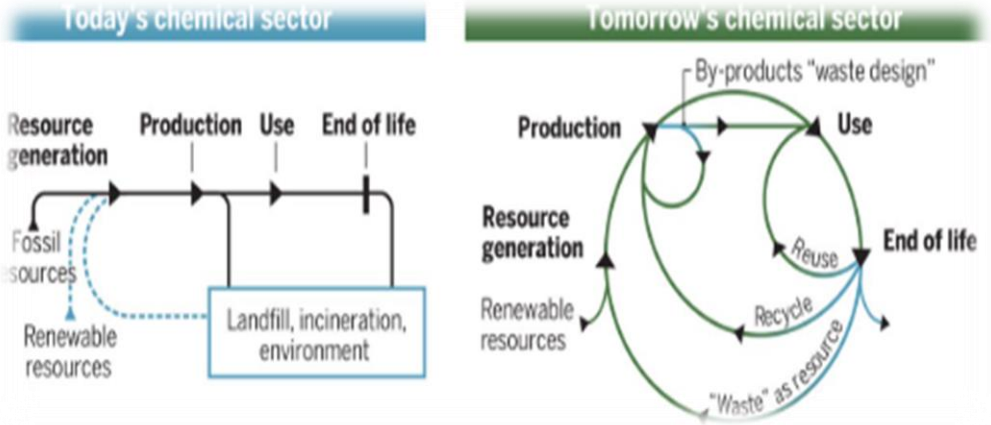
يستند هذا المبدأ إلى علم التحلل البيئي ونظرية التحلل البيولوجي . ينص على أن قابلية التحلل يمكن تصميمها في الجزيئات من خلال دمج مجموعات قابلة للتحلل المائي أو روابط ضعيفة إلكترونياً في البنية الجزيئية [15].

المبدأ الحادي عشر: التحليل الآني لمنع التلوث

يستمد هذا المبدأ أساسه من نظرية التحكم في العمليات وكيمياء التحليل الآني . ينص على أن المراقبة المستمرة للعمليات الكيميائية تسمح بالتحكم الأمثل وتقليل تولد النفايات [16].

المبدأ الثاني عشر: الكيمياء الأكثر أماناً لمنع الحوادث

يستند هذا المبدأ إلى نظرية المخاطر الكيميائية ومبادئ التصميم الآمن جوهرياً التي طورها تريفور كليتز [17]. تنص على أن السلامة يجب أن تكون سمة مصممة في العملية الكيميائية، وليس إضافة لاحقة.



الشكل (1): التصميم من أجل مستقبل كيميائي صديق للبيئة

3.مقاييس الأداء الأخضر

1.3.تعريف مقاييس الأداء الأخضر

مقاييس الأداء الأخضر هي أدوات كمية تُستخدم لقياس مدى "خضرة" أو استدامة عملية كيميائية، من خلال ترجمة المبادئ البيئية إلى مواصفات هندسية قابلة للقياس [4]. في المراحل المبكرة من تطور الكيمياء الخضراء، كانت "خضرة" منتج أو عملية كيميائية تُعبر عنها نوعياً بالاستناد إلى تحقيق أحد المبادئ الاثني عشر للكيمياء الخضراء [3]. ولكن سرعان ما أدرك الباحثون الحاجة الملحة إلى مقاييس كمية وموضوعية، خاصة لإجراء مقارنات موثوقة بين البدائل المختلفة [18]. واليوم، ترافق هذه المقاييس بشكل متزايد المقاييس التقليدية في الكيمياء العضوية وغير العضوية (كالمردود، زمن التفاعل، الانتقائية، حجم الجسيمات، المساحة السطحية)، ويشجع استخدامها في الأبحاث المقدمة لبعض المجلات العلمية المرموقة في هذا المجال [19].

1. الاقتصاد الذري

يُعرّف باري تروست (Barry Trost) في عام 1991 مفهوم الاقتصاد الذري، وهو مقياس يحدد النسبة المئوية لكتلة المواد المتفاعلة التي يتم دمجها في المنتج النهائي المطلوب [6]. يعتبر الاقتصاد الذري مفهوماً أساسياً في فلسفة الكيمياء الخضراء، وأحد أكثر المقاييس استخداماً لقياس "خضرة" عملية أو تخليق كيميائي . يمكن التعبير عنه بالعلاقة الرياضية التالية:

$$\mathrm{AE} = \frac{\text{المنتج MW}}{\text{المواد المتفاعلة MW}} \times 100\%$$

يعني الاقتصاد الذري الجيد أن معظم ذرات المواد المتفاعلة تندمج في المنتجات المرغوبة، وتتكون كميات قليلة فقط من المنتجات الثانوية غير المرغوب فيها، مما يقلل الأثر الاقتصادي والبيئي للتخلص من النفايات[20]. القيمة المثلى للاقتصاد الذري هي 100%. من المهم التمييز بين الاقتصاد الذري والمردود الكيميائي ، لأن العملية ذات المردود المرتفع يمكن أن تنتج مع ذلك كميات كبيرة من المنتجات الثانوية [21]. تشمل الأمثلة على التفاعلات ذات الاقتصاد الذري الضعيف تفاعل كانيزارو (Cannizzaro)، تفاعلات فيتيغ (Wittig) وسوزوكي (Suzuki)، وتخليق غابرييل (Gabriel)[22].

2. العامل البيئي

يقدم روجر شيلدون (Roger Sheldon) في عام 1992 مقياس العامل البيئي، وهو مفهوم أصبح أساسياً في الكيمياء المستدامة . العامل البيئي هو نسبة كتلة النفايات المنتجة إلى كتلة المنتج النهائي [23]. يمكن التعبير عنه بالعلاقة التالية:

$$\text{E-Factor} = \frac{\text{الكتلة الكلية للنفايات}}{\text{الكتلة المنتج}}$$

حيث تشمل النفايات كل المواد المنتجة باستثناء المنتج المطلوب . تتراوح قيم العامل البيئي النموذجية بين أقل من 0.1 في صناعة تكرير النفط، و1-5 في الصناعات الكيميائية الأساسية، و5-50 في الصناعات الكيميائية الدقيقة، و25-100 في الصناعات الدوائية [23]. يمثل العامل البيئي مقياساً للكتلة، لكنه يرتبط جوهرياً بقضايا الطاقة والبيئة، فكمية أقل من النفايات للمعالجة تعني استهلاكاً أقل للطاقة لمعالجتها، وبالتالي استنزاف أقل للموارد وانبعاثات أقل [24].

3. كفاءة الكتلة التفاعلية

كفاءة الكتلة التفاعلية هي مقياس لكفاءة الكتلة في عملية كيميائية [25]. يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

$$\text{RME} = \frac{\text{مجموع كتل المواد المتفاعلة المستخدمة في التفاعل}}{\text{كتلة المنتج المعزول}} \times 100\%$$

يرتبط هذا المقياس عكسياً بالعامل البيئي الكلي الذي وصفه شيلدون. يوفر RME طريقة أفضل وأسهل لتحديد أفضل أو أسوأ التفاعلات التي تؤثر على العملية الصناعية الكلية أو التخليق [26]. هذا المقياس هو الأكثر فعالية في الجهود الرامية إلى تقليل النفايات على المستوى الجوهري والعالمي [27].

4. كثافة الكتلة العملية

كثافة الكتلة العملية هي إجمالي الكتلة المستخدمة في عملية أو خطوة عملية مقسومة على كتلة المنتج [28]. يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

$$\text{PMI} = \frac{\text{الكتلة الكلية في العملية}}{\text{الكتلة المنتج}}$$

لعملية مثالية، تكون قيمة PMI مساوية 1، حيث تكون الكتلة الكلية للمدخلات مساوية لكتلة المنتج [29]. يأخذ PMI في الاعتبار كفاءة التفاعل، والستوكيومترية، وكمية المذيبات، وجميع الكواشف والمواد المساعدة المستخدمة في التخليق [28]. يعتبر PMI المقياس الأكثر شمولية، حيث يعكس استهلاك الموارد الكلي للعملية [25].

2.3.العلاقة بين المقاييس

العلاقة بين هذه المقاييس هي علاقة هرمية تنتقل من المركز التفاعلي إلى العملية الكاملة [18]. على المستوى الجزيئي، يقيس الاقتصاد الذري الكفاءة المتأصلة للتفاعل [6]. على مستوى وحدة التشغيل، يقيس العامل البيئي كمية النفايات المتولد[24] . على مستوى العملية الكاملة، يقيس PMI إجمالي استخدام الموارد [28]. يمكن التعبير عن العلاقة بين PMI و E-Factor بالمعادلة: E = PMI - 1. توجد أيضاً مقاييس أخرى مثل كفاءة الكربون التي تقدر النسبة المئوية للكربون في الكواشف الذي يبقى في المنتج النهائي، والمردود الكتلي الفعال الذي يحدد النسبة المئوية للمنتج النهائي في جميع الكواشف والمواد المستخدمة [22].

3.3.أهمية المقاييس في البحث العلمي

تسمح هذه المقاييس بقياس غير متحيز لكفاءة وأداء العمليات الكيميائية [18]. تمكن من مقارنة الطرق المختلفة لإنتاج نفس المركب، مما يسمح بترتيبها حسب "خضرتها" [19]. تساعد في تحديد نقاط الضعف في العملية (مثل استخدام مذيب بكثافة عالية) لتوجيه جهود التحسين [28]. تمنع الادعاءات غير المدعومة بـ"خضرة" عملية ما، حيث أن المطالبة الحقيقية بالخضرة تعني تسجيل درجات عالية في عدة مقاييس كفاءة [24]. تسهل توصيل فوائد التقنيات الجديدة إلى الصناعة والجمهور [29].

II -2- الرماد النباتي كمصدر طبيعي

1.2.الاساس التاريخي والثقافي:

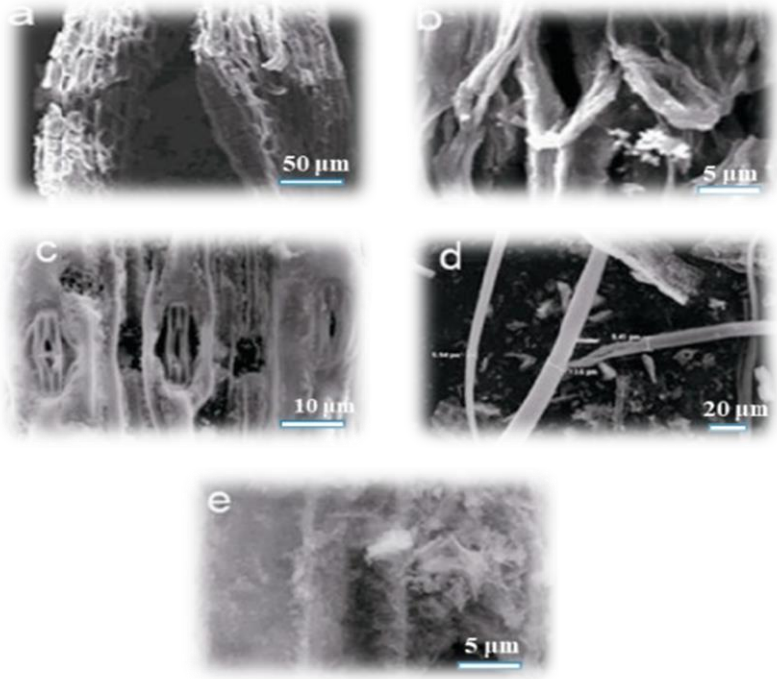
استخدم الرماد النباتي كمصدر للقلويات منذ آلاف السنين في الحضارات القديمة. في الشرق الأدنى ومصر، استخدمت الرماد الغني بالصوديوم المشتق من النباتات الملحية كعامل صهر (flux) في إنتاج الطلاء الزجاجي على الأشياء الصغيرة المصنوعة من الكوارتز والستياتيت والخزف منذ الألفية الرابعة قبل الميلاد، وفي إنتاج الزجاج منذ حوالي 1500 قبل الميلاد . كما استخدم الرماد

النباتي المختلط الذي يتميز بمحتوى بوتاسيوم أعلى قليلاً من الصوديوم في إنتاج الخزف والأزرق المصري في كريت خلال الألفية الثانية قبل الميلاد [30].

في أوروبا الغربية، استخدم الرماد النباتي المختلط في إنتاج الزجاج خلال العصر البرونزي المتأخر (من حوالي القرن الحادي عشر إلى الثامن قبل الميلاد)، وكانت فراتيسينا في شمال إيطاليا على الأرجح مركزاً رئيسياً لإنتاجه [30]. استمر استخدام رماد النباتات الغنية بالصوديوم في بلاد ما بين النهرين وإيران طوال فترة سيطرة النطرون (natron) في الغرب، ثم عاد للاستخدام في الشرق الأدنى الإسلامي حوالي القرن التاسع الميلادي عندما توقف استخدام النطرون [30]

استخدم الرماد النباتي أيضاً في صناعة الصابون والمنظفات منذ العصور القديمة. في هذه الحالة، كانت المعالجة تتم بماء الجير (هيدروكسيد الكالسيوم) لتحويل كربونات الصوديوم إلى هيدروكسيد الصوديوم، ثم غلي هذا المحلول مع الدهون أو الزيوت لإنتاج الصابون [30].

من الناحية اللغوية، كلمة "kali" مشتقة من العربية "قلي" (qily) التي تعني الرماد، وكلمة "soda" مشتقة من الكلمة الإيطالية لـ saltwort، والتي بدورها مشتقة من العربية "سواد" (suwwad) [31]. تطورت تسمية القلويات تدريجياً إلى "soda" (القلوي من نباتات الصودا) و "pot-ash" (رماد القدر، المحضر في أوانٍ معدنية من حرق خشب الغابات الشمالية) [31].



الشكل (2): صور مجهرية إلكترونية ماسحة (SEM) تظهر شكل وحجم جسيمات الرماد[32]

2.2.الأساس الكيميائي النباتي

النباتات الملحية هي نباتات مقاومة للملوحة تنمو في المناطق الساحلية، والمستنقعات المالحة، والمناطق الصحراوية . طورت هذه النباتات آليات متعددة لتنظيم الأملاح، بما في ذلك الإقصاء من خلال غدد وشعيرات متخصصة، والتخلص من الأجزاء النباتية الحاملة للأملاح، والعصارة ، وتراكم الأملاح في حجرات الخلايا [30].

من الأهمية الخاصة في هذا السياق الفصيلة الرمرامية التي تضم حوالي 1300 نوع في 120 جنساً. تنتشر هذه الفصيلة في جميع أنحاء العالم، خاصة في المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية، وتشتهر باحتوائها على العديد من النباتات الملحية. في الواقع، العديد من أجناسها (مثل Suaeda، Salsola، Salicornia) هي نباتات ملحية إجبارية، أي أنها لا توجد في المناطق ذات الملوحة المنخفضة للتربة [30].

من النباتات الملحية المهمة في الجزائر، تمت دراسة التركيب الكيميائي لثلاثة نباتات من منطقة بسكرة بالجنوب الشرقي: النجيل (Cynodon dactylon)، والسعد (Cyperus conglomeratus)، ونبات الأثل الإفريقي (Tamarix africana). أظهرت النتائج تبايناً كبيراً في المحتوى المعدني بين هذه النباتات، مع وجود معادن كبرى بكميات كافية [33].

3.2.كيمياء الاحتراق والتحول إلى قلويات

المعيار الأساسي في اختيار الرماد النباتي المناسب للاستخدامات الصناعية هو أن تكون القلويات (الصوديوم والبوتاسيوم) في الغالب في شكل كربونات، بيكربونات، كبريتيت، كبريتيد، وهيدروكسيد، وليس كلوريدات أو كبريتات . هذا لأن كلوريدات القلويات غير تفاعلية عملياً، إذ تنصهر وتتطاير دون تحلل. كذلك، تتفاعل كبريتات القلويات ببطء فقط قبل التحلل (الذي يحدث عند حوالي 1200°م لكبريتات الصوديوم) ما لم يتم اختزالها إلى كبريتيت أو كبريتيد بوجود مواد كربونية [30].

لذلك، على عكس الكربونات التي تتفكك لتكوين أكاسيد ثم تندمج بسهولة في الزجاج، يمكن دمج كميات صغيرة فقط من الكلوريدات أو الكبريتات في الزجاج (عادة 1-2% لكل من Cl و SO_3)، والباقي يشكل مصهوراً غير قابل للامتزاج يبقى منفصلاً عن الزجاج [30].

دراسة حديثة على رماد نباتات أسترالية أصلية أظهرت أن الرماد كان قلوياً بدرجة حموضة تتراوح بين 12.3 و 13.8، ويحتوي على كميات كبيرة من العناصر الغذائية النباتية. تباينت كميات الكالسيوم، المغنيسيوم، الصوديوم أو السيليكون حسب نوع النبات والجزء النباتي .

المعادن الموجودة في الرماد شملت [34]:

- الكالسيت (Calcite - $CaCO_3$)
- الفيرشيلدايت (Fairchildite - $K_2Ca(CO_3)_2$)
- النيسكيهونايت (Nesquehonite - $MgCO_3.H_2O$)
- السيلفيت (Sylvite - KCl)
- الجير (Lime - CaO)
- البورتلاندايت (Portlandite - $Ca(OH)_2$)
- البيريكليز (Periclase - MgO)
- الأباتيت (Apatite) بأشكال مختلفة

4.2. العوامل المؤثرة على تركيب الرماد

1.4.2. العوامل النباتية:

تتعدد العوامل التي تحدد تركيب الرماد النباتي، وتشمل [30]:

1. **نوع النبات :** يختلف التركيب الكيميائي اختلافاً كبيراً بين الأنواع النباتية المختلفة، حتى ضمن نفس العائلة. بعض الأنواع (مثل Salsola soda) تتراكم الصوديوم بشكل رئيسي، بينما يفضل البوتاسيوم في أنواع أخرى.
2. **المرحلة في موسم النمو :** يختلف تركيز المعادن في الأنسجة النباتية خلال دورة النمو، حيث يكون أعلى عادة في الفترات النشطة من النمو وأقل في فترات السكون.
3. **الجزء النباتي المستخدم:** الأوراق عادة ما تحتوي على نسب مختلفة من المعادن مقارنة بالسيقان والجذور. في بعض النباتات، تتركز المعادن في الأوراق القديمة التي تستعد للتساقط.

2.4.2العوامل البيئية :

1. **تركيب التربة والمياه الجوفية:** النباتات تعكس في تركيبها المعدني تركيب التربة التي تنمو عليها. النباتات التي تنمو في تربة غنية بالصوديوم (كالسبخات) تنتج رماداً غنياً بالصوديوم، بينما تلك التي تنمو في تربة غنية بالبوتاسيوم (كالغابات) تنتج رماداً غنياً بالبوتاسيوم [30].
2. **المناخ:** الجفاف والملوحة يزيدان من تركيز المعادن في الأنسجة النباتية كآلية تكيف. النباتات في المناطق القاحلة عادة ما يكون محتواها المعدني أعلى من نظيراتها في المناطق الرطبة.

3.4.2العوامل التقنية :

1. **طريقة الحرق :** طريقة الحرق (في الهواء الطلق، في أفران، مع أو بدون تحكم في درجة الحرارة) تؤثر بشكل كبير على التركيب النهائي للرماد. الحرق في الهواء الطلق يؤدي عادة إلى فقدان بعض المركبات المتطايرة .
2. **درجة حرارة الحرق:** تؤثر درجة حرارة الحرق بشكل كبير على تركيب الرماد. دراسة ميسرا وزملائه (1993) قدمت بيانات لتركيب رماد الخشب المنتج عند درجات حرارة تتراوح بين 500 و 1300°م، وأظهرت أن نسباً متزايدة من البوتاسيوم تُفقد تدريجياً بالتطاير لدرجات حرارة حرق أعلى من 800-900°م، حسب النوع. يبدو أن الصوديوم أقل تأثراً بالتطاير من البوتاسيوم .[30]
3. **ظروف التبريد:** سرعة التبريد بعد الحرق تؤثر على تبلور المعادن في الرماد. التبريد البطيء يسمح بتكوين بلورات أكبر وأكثر انتظاما

المراجع

1. Carson, R. Silent spring. in *Thinking about the environment* 150–155 (Routledge, 2015).

2. Manahan, S. & Manahan, S. E. *Environmental Chemistry*. (CRC press, 2009).

3. Anastas, P. T., Kirchhoff, M. M. & Williamson, T. C. Catalysis as a foundational pillar of green chemistry. *Appl. Catal. Gen.* **221**, 3–13 (2001).

4. Anastas, P. T. & Warner, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. (Oxford university press, 2000).

5. DeVito, S. C. On the design of safer chemicals: a path forward. *Green Chem.* **18**, 4332–4347 (2016).

6. Trost, B. The Atom Economy—A Search for Synthetic Efficiency. *Science* **254**, 1471–1477 (1991).

7. Jim�nez-Gonz�lez, C., Curzons, A. D., Constable, D. J. C. & Cunningham, V. L. Expanding GSK?s Solvent Selection Guide?application of life cycle assessment to enhance solvent selections. *Clean Technol. Environ. Policy* **7**, 42–50 (2004).

8. Andraos, J. & Matlack, A. S. *Introduction to Green Chemistry*. (CRC press, 2022).

9. Trost, B. M. Atom Economy—A Challenge for Organic Synthesis: Homogeneous Catalysis Leads the Way. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **34**, 259–281 (1995).

10. Negri, M. A powerful combination of computational methods on the road toward potent non-steroidal inhibitors of steroidogenic enzymes involved in hormone-dependent diseases. https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/handle/20.500.11880/22715 (2010).

11. Jessop, P. G. Searching for green solvents. *Green Chem.* **13**, 1391–1398 (2011).

12. Doble, M., Rollins, K. & Kumar, A. *Green Chemistry and Engineering*. (Academic Press, 2010).

13. Clark, J. H. *et al.* Green chemistry and the biorefinery: a partnership for a sustainable future. *Green Chem.* **8**, 853–860 (2006).

14. Clark, J. H. *et al.* Green chemistry and the biorefinery: a partnership for a sustainable future. *Green Chem.* **8**, 853–860 (2006).

15. Kümmerer, K. Rational Design of Molecules by Life Cycle Engineering. in *Green and Sustainable Pharmacy* (eds Kümmerer, K. & Hempel, M.) 135–146 (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010). doi:10.1007/978-3-642-05199-9_9.

16. Balabin, R. M. & Smirnov, S. V. Interpolation and extrapolation problems of multivariate regression in analytical chemistry: benchmarking the robustness on near-infrared (NIR) spectroscopy data. *Analyst* **137**, 1604–1610 (2012).

17. Kletz, T. A. & Amyotte, P. *Process Plants: A Handbook for Inherently Safer Design*. (Crc Press, 2010).

18. Constable, D. J., Curzons, A. D. & Cunningham, V. L. Metrics to 'green'chemistry—which are the best? *Green Chem*. **4**, 521–527 (2002).

19. Sheldon, R. A. The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chem*. **19**, 18–43 (2017).

20. P. Dicks, A. & Hent, A. *Green Chemistry Metrics: A Guide to Determining and Evaluating Process Greenness*. (Springer International Publishing, Cham, 2015). doi:10.1007/978-3-319-10500-0.

21. Lancaster, M. *Green Chemistry: An Introductory Text*. (Royal society of chemistry, 2025).

22. Andraos, J. Unification of Reaction Metrics for Green Chemistry: Applications to Reaction Analysis. *Org. Process Res. Dev*. **9**, 149–163 (2005).

23. Sheldon, R. A. The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chem*. **19**, 18–43 (2017).

24. Roschangar, F., Sheldon, R. A. & Senanayake, C. H. Overcoming barriers to green chemistry in the pharmaceutical industry–the Green Aspiration Level™ concept. *Green Chem*. **17**, 752–768 (2015).

25. Curzons, A. D., Constable, D. J., Mortimer, D. N. & Cunningham, V. L. So you think your process is green, how do you know?—Using principles of sustainability to determine what is green–a corporate perspective. *Green Chem*. **3**, 1–6 (2001).

26. Andraos, J. Global Green Chemistry Metrics Analysis Algorithm and Spreadsheets: Evaluation of the Material Efficiency Performances of Synthesis Plans for Oseltamivir Phosphate (Tamiflu) as a Test Case. *Org. Process Res. Dev*. **13**, 161–185 (2009).

27. Jiménez-González, C., Constable, D. J. & Ponder, C. S. Evaluating the "Greenness" of chemical processes and products in the pharmaceutical industry—a green metrics primer. *Chem. Soc. Rev*. **41**, 1485–1498 (2012).

28. Jimenez-Gonzalez, C., Ponder, C. S., Broxterman, Q. B. & Manley, J. B. Using the Right Green Yardstick: Why Process Mass Intensity Is Used in the Pharmaceutical Industry To Drive More Sustainable Processes. *Org. Process Res. Dev*. **15**, 912–917 (2011).

29. Henderson, R. K. *et al*. Expanding GSK's solvent selection guide–embedding sustainability into solvent selection starting at medicinal chemistry. *Green Chem*. **13**, 854–862 (2011).

30. Tite, M. S., Shortland, A., Maniatis, Y., Kavoussanaki, D. & Harris, S. A. The composition of the soda-rich and mixed alkali plant ashes used in the production of glass. *J. Archaeol. Sci*. **33**, 1284–1292 (2006).

31. Wise, D. L. *Bioremediation of Contaminated Soils*. (CRC Press, 2000).

32. Ma, X. *et al*. Plant Photocatalysts: Photoinduced Oxidation and Reduction Abilities of Plant Leaf Ashes under Solar Light. *Nanomaterials* **13**, 2260 (2023).

33. Arab, H. & Mehennaoui, S. Comparative study of chemical composition of three forages from South-East Algeria. *Options Mediterr* **109**, 111 (2014).

34. Yusiharni, E. & Gilkes, R. Minerals in the ash of Australian native plants. *Geoderma* **189**, 369–380 (2012).

الفصل الثالث:
وصف للنبتة المدروسة الأثل

III - وصف للنبتة *Tamarix articulata* (الطرفاء المُفصَّلة أو الأثل)

III -1- الصفات العامة للعائلة التاماريكية (*Tamaricaceae*)

تبعاً للتصنيف الحديث للنباتات الزهرية [1]، تنتمي العائلة التاماريكية إلى رتبة القرنفليات (Caryophyllales). تضم هذه العائلة حوالي 112 نوعاً من النباتات، موطنها الأصلي أوراسيا وإفريقيا، وقد تم إدخال بعض أنواعها إلى مناطق أخرى مثل أمريكا الشمالية [2]. تتوزع هذه الأنواع على أربعة أجناس رئيسية هي:

- جنس *Reaumuria*: يضم 15 نوعاً.
- جنس *Tamarix* (الطرفاء أو الأثل): وهو أكبر الأجناس، ويضم 85 نوعاً.
- جنس *Myricaria*: يضم 10 أنواع.
- جنس *Hololachna*: ويضم نوعين فقط [2].

في شمال إفريقيا، يشير Ozenda (1991) إلى وجود حوالي عشرين نوعاً من جنس *Tamarix*. تتميز نباتات هذه العائلة عادةً بأوراق صغيرة متبادلة، غالباً ما تكون لاطئة (بدون عنق)، وتشبه أوراق الخلنج، ومزودة بغدد تفرز الأملاح [3]. أما الأزهار، فتكون صغيرة الحجم، غالباً ثنائية الجنس، ونادراً ما تكون أحادية الجنس، وهي منتظمة [4]. الثمرة عبارة عن كبسولة (علبة) تنفتح عند النضج لتحرر البذور. البذور صغيرة ومزودة بخصلة من الشعر تساعدها على الانتشار بالرياح أو الماء.

III -2- وصف جنس الطرفاء (*Tamarix*)

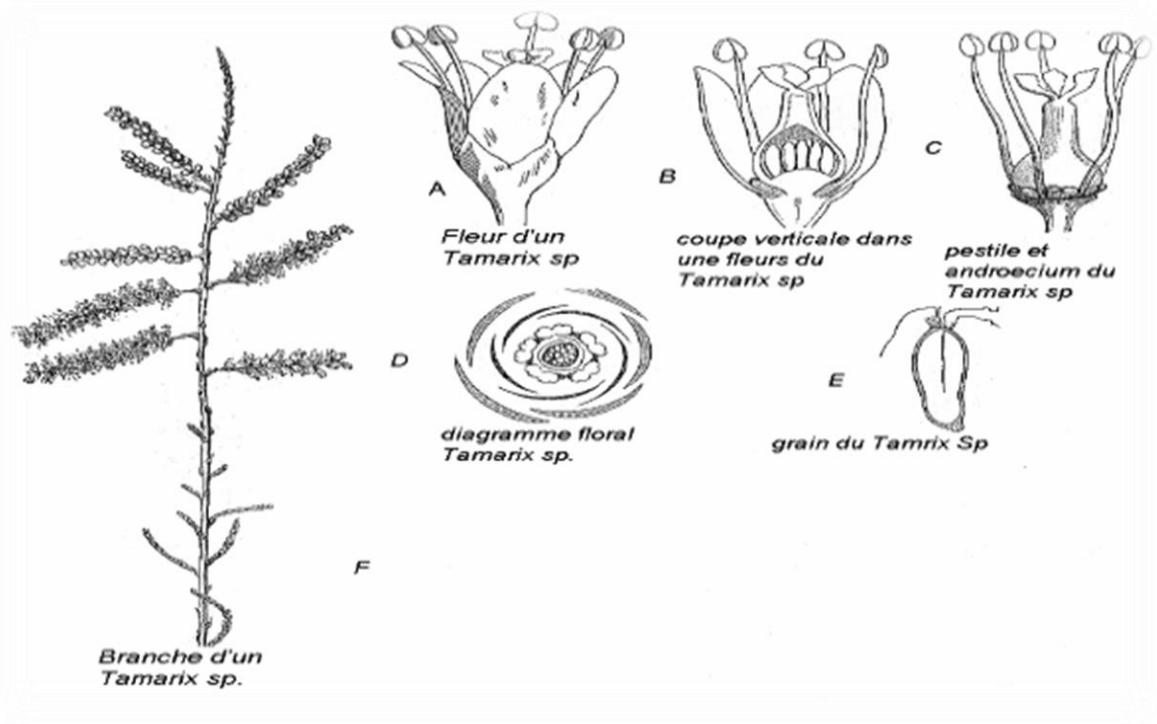
III -2-1. نبذة تاريخية:

عُرفت الطرفاء منذ القدم، وقد ورد ذكرها في القرآن الكريم باسم "الأثل" في سورة سبأ. الاسم العلمي *Tamarix* مشتق من اسم نهر "*Tamaris*" في إسبانيا، حيث كانت تنتشر بكثرة على ضفافه. أول من استخدم هذا الاسم رسمياً هو العالم لينيوس في منتصف القرن الثامن عشر [5].

III -2-2. أسماء مرادفة :

- بالفرنسية: *Tamaris, Tamarin*
- بالإنجليزية: *Salt Cedar, Tamarisk*

- بالعربية: أَثْل, طَرْفاء
- بالأمازيغية: *Amammythe*



الشكل (1): الخصائص النباتية الرئيسية لعائلة التاماريكية [6]

III -3-2. صفات عامة:

الطرفاء هي أشجار أو شجيرات تزيينية ذات أوراق دقيقة تشبه الحراشف، تنتشر غالباً في الأراضي المالحة [7]. في الجزائر، لم تكن هناك دراسات مكثفة لتحديد أنواع هذا الجنس، وكانت مراجعة Battandier من أبرز المراجع، حيث حدد 11 نوعاً. من الأنواع التي ذكرها [7] نجد: T. aphylla, T. gallica, وغيرها.

III -3-2. مناطق الانتشار:

يتبع هذا الجنس نباتات يمكنها العيش كمستفيدة من المياه الجوفية وغالباً ما تكون ملحية. موطنها الأصلي أوروبا، حوض البحر الأبيض المتوسط، شمال إفريقيا، والصحراء الكبرى وآسيا. تعتبر بعض أنواعه من الأنواع الغازية في أمريكا الشمالية وأستراليا [8].

III -3-الخصائص النباتية والبيولوجية لجنس الطرفاء

III -3-1. الشكل العام:

يتراوح ارتفاع أشجار أو شجيرات الطرفاء بين 2 و 10 أمتار، وقد تصل أحياناً إلى 12 متراً. تتميز بوجود نظام جذري قوي وتفرعات كثيفة. للشجرة شكلان للنمو: شكل طبيعي بساق رئيسية في البيئات الملائمة، وشكل آخر كثيف التفرعات في البيئات المجهدة أو عند تراكم الرواسب حولها [9].

الشكل (2):شكل متفرع من جنس *Tamarix articulate* (https :// www.teline.fr)

III -3-2. الأغصان:

عادة ما تكون الأغصان كثيرة، رفيعة، وذات ألوان مختلفة غالباً ما تكون بنية أو بنية مائلة للسواد [10].

III -3-3. الأوراق:

الأوراق صغيرة جداً (0.5-0.7 مم)، حرشفية، متبادلة، لاطئة، وغالباً ما تكون متداخلة مما يعطي الغصن مظهراً يشبه العرعر [11]. تتميز الأوراق بوجود نقاط صغيرة هي في الواقع فتحات للثغور

التي تفرز مادة مخاطية تحتوي على أملاح وكلس. تختلف أشكال الأوراق باختلاف النوع حسبما وصفها [7]:

- أوراق تغلف الغصن بشكل كامل (كما في T. aphylla).
- أوراق عريضة أو ضيقة تحيط بالغصن جزئياً. بعضها عريض وقصير (مثل T. pauciovulata)، والبعض الآخر طويل وغير محيط بالكامل (مثل T. gallica).

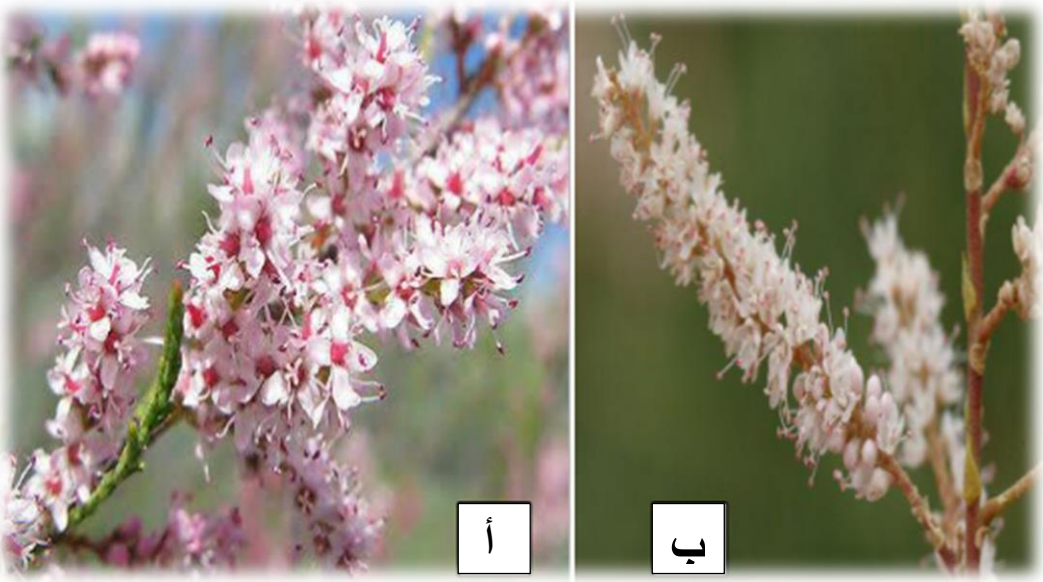
الشكل (3): مثال على الأوراق الأعرض من الطول في *Tamarix L*

(www.snv.juussieu.fr).

الشكل (4): الأوراق الأعرض من الطول في *Tamarix pauciovulata* [6]

III -4-3. الأزهار:

الأزهار صغيرة جداً (أقل من 2 مم)، خماسية أو رباعية الأجزاء، غالباً ثنائية الجنس. تتميز ببتلات وردية اللون نادراً ما تكون بيضاء. عدد الأسدية إما مساوٍ لعدد البتلات أو ضعفها، وتتصل بقرص زهري يُستخدم شكله كصفة مهمة لتصنيف الأنواع [12].



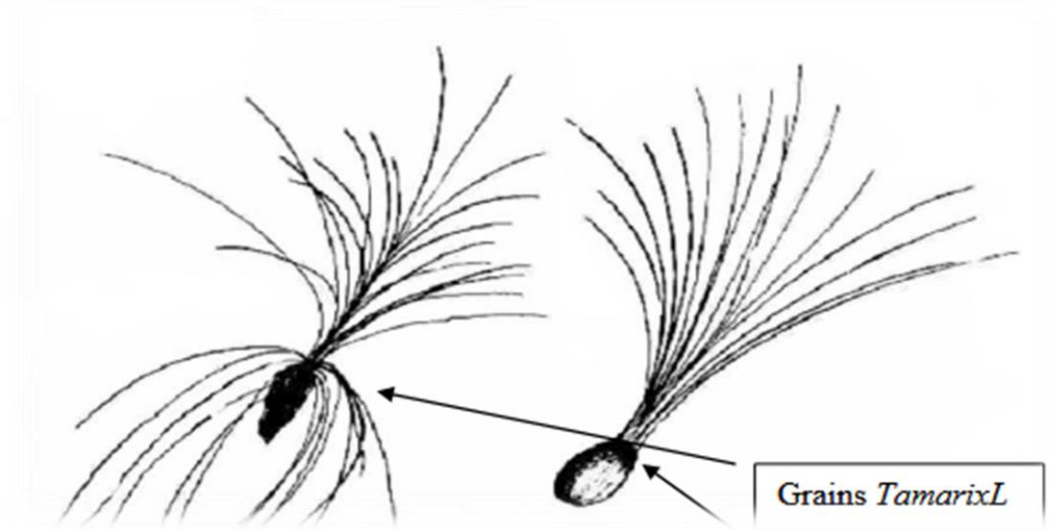
الشكل (5):الإزهار: (أ) *Tamarix gallica*، (ب)*Tamarix Africana*

(https://images.app.goo.yl/xhkz7qu7)

III -3-5. البذور:

يمكن للنبات إنتاج البذور في السنة الأولى، لكن الإنتاج الغزير يبدأ من السنة الثالثة. البذور صغيرة جداً أسطوانية الشكل، وتتميز بوجود خصلة من الشعر الأشقر في نهايتها تساعدها على الانتشار بالرياح أو الطفو على الماء [13,14]. من أهم خصائص بذور الطرفاء أنها لا تدخل في طور السكون، لكن عمرها قصير جداً يتراوح بين 24 يوماً في الظروف غير الملائمة و 130 يوماً في الظروف المثالية [15]. تنتج الشجرة الناضجة كمية هائلة من البذور تتراوح بين 500,000 و 600,000 بذرة في كل موسم إزهار [15].

الشكل (6):شكل حبوب بعض الأنواع من جنس *Tamarix L* .[16]



III -3-6. النظام الجذري:

تمتلك الطرفاء نظاماً جذرياً قوياً ومتكيفاً لامتصاص الماء من أعماق كبيرة (قد تصل الجذور الرئيسية إلى 53 متراً) [17]. أظهرت الدراسات التي أجراها Tomanek et Ziegler (1960) أن شكل وتطور الجذور يتحدد بشكل كبير حسب موقع وعمق المياه الجوفية. ففي حالة وجود مصدر مياه قريب من السطح، تتطور جذور سطحية كثيفة. وفي حالة وجود مياه عميقة، يتعمق الجذر الرئيسي. وإذا توفر مصدران للمياه (سطحي موسمي وعميق دائم)، تطور الشجرة نظاماً جذرياً مزدوجاً يمكنها من الاستفادة من كليهما [18].

III -4- خصائص الطرفاء المفصلة (*Tamarix articulata*)

هذا النوع، والمعروف أيضاً باسم "فراش"، هو شجرة متوسطة الحجم سريعة النمو مقارنة ببقية أنواع الطرفاء، خصوصاً في المناطق القاحلة .

الشكل (7):الشكل العام في Tamarix articulatavahll (original ; djelfa, 2020)

III -4-1. الوصف النباتي:

- الساق: مفرد وقوي، يصل ارتفاعه إلى 12-15 متراً .
- اللحاء: خشن، يميل لونه إلى البني أو الرمادي الداكن، ومتشقق بعمق .
- الأوراق: صغيرة حرشفية متداخلة تغلف الغصن بالكامل، مما يعطي الأغصان مظهراً مفصصاً (وهو سبب التسمية "articulata") وكأنها خالية من الأوراق .
- الأزهار: صغيرة (1.5-3 مم) بيضاء أو وردية، تتجمع في نورات سنبلية رفيعة على الأغصان الحديثة .
- الثمار والبذور: ثمرة كبسولية مخروطية تحتوي على بذور مزودة بخصلة شعر [7].

III -4-2. التصنيف:

يُعتبر هذا النوع الأسهل تمييزاً بين أنواع الطرفاء. سمي قديماً بعدة أسماء، منها Thuya aphylla L. عندما ظن لينيوس خطأً أنه ينتمي لجنس العرعر، لكن الاسم الأدق والأكثر قبولاً هو

Tamarix articulata Vahl [19]. وهو ينتمي إلى العائلة التاماريكية، رتبة Pariétales حسب التصنيف القديم .

III -4-3. التوزع والمناخ:

يوجد هذا النوع في جميع المناطق الصحراوية، مما يدل على تحمله الكبير للظروف البيئية القاسية. يمتد وجوده من مصر إلى الصحراء الكبرى الوسطى والجنوبية [20]. يتحمل درجات حرارة عالية تصل إلى 50°م، وبرودة قد تصل إلى -5°م، ومعدلات أمطار سنوية قد تقل عن 100 مم [21,22]. تتكيف الشجرة مع الجفاف بقدرتها على امتصاص الرطوبة الجوية عبر غددها التي تفرز الملح والذي يجذب قطرات الماء ليلاً . وقد عُثر على جذور لها على عمق 30 متراً أثناء حفر قناة السويس [23]، والمياه الجوفية في تربتها تتراوح بين 7 و 8 أمتار .

III -4-4. التربة:

يفضل الأراضي الرملية قليلة الملوحة، غالباً في مجاري الأودية [24]. يُظهر مقاومة عالية للملوحة سواء في التربة أو الماء أو الهواء .

III -4-5. التكاثر:

يتكاثر طبيعياً بالبذور أو بالخلفات، ويمكن إكثاره بسهولة بالعقل (التفصيص) بنسبة نجاح تتجاوز 80% . العقد التي تظهر على أغصانه (الكروية الشكل) ليست ثماراً بل هي عفصات ناتجة عن حشرة صغيرة .

III -4-6. الاستخدامات:

خشبه ممتاز لصناعة الأدوات التقليدية والحرف اليدوية، ويستخدم أيضاً كحطب (وإن كان دخاني). تُستخدم العفصات في دباغة الجلود . نظراً لنموه السريع ومقاومته للرياح الرملية، فهو يُستخدم بشكل شائع كمصدات للرياح ولتثبيت الكثبان الرملية ومكافحة التصحر [24] .

الشكل (8): أزهار *Tamarix articulate* (www.teline.fr)

الشكل (9): أوراق وبذور *Tamarix articulate* (www.teline.fr)

المراجع

1. Ii, A. P. G. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG II. *Bot. J. Linn. Soc.* **141**, 399–436 (2003).

2. Alcock, J. cover in a desertscrub community of southeastern California. Ecology 51: 696-700. *Invasive Exot. Species Son. Reg.* **40**, 366 (2002).

3. Azzeddine, M. H. Contribution à l'étude de la répartition spatiale de la végétation spontanée de la région de Biskra. *Biskra Sn* http://thesis.univ-biskra.dz/1943/ (2011).

4. Crins, W. J. The Tamaricaceae in the southeastern United States. *J. Arnold Arbor.* **70**, 403–425 (1989).

5. Baum, B. R. A new species of Tamarix from South-Eastern Iran. *Oesterreichische Bot. Z.* **114**, 379–382 (1967).

6. Zehraoui, R. Etude phytoécologique et impacts des reboisements du barrage sur la biodiversité floristique. cas de la région de Djelfa (Algérie). *AGROBIOLOGIA* **10**, 2062–2075 (2021).

7. Ozenda, P. Les relations biogéographiques des montagnes sahariennes avec la région méditerranéenne. *Rev. Géographie Alp.* **79**, 43–53 (1991).

8. Bossard, C. C., Randall, J. M. & Hoshovsky, M. C. *Invasive Plants of California's Wildlands*. (Univ of California Press, 2000).

9. Le Quellec, J.-L. Les végétaux dans l'art rupestre: cécité aux plantes et facteurs culturels d'après le cas saharien. *Cah. L'AARS—N* **25**, 139–156 (2025).

10. Arab, N. & Baz, Z. Extraction des molécules bioactives de Morinaga Oleifera et étude de l'activité antibactérienne sur deux souches: E. Coli et S. Aures. (Université Mouloud Mammeri, 2022).

11. Leck, M. A., Parker, V. T. & Simpson, R. L. P1: SFK 9780521873053pre CUUK205/Leck et al. 978 0 521 87305 5 June 26, 2008 16: 55 Seedling Ecology and Evolution. https://repository.si.edu/bitstreams/7fad275f-3538-4bca-8410-c256f369d535/download.

12. Gaskin, J. F. *Systematic and Population Studies of the Invasive Plant Tamarix*. (Washington University in St. Louis, 2002).

13. Evangelista, P. H. *Mapping Tamarix: New Techniques for Field Measurements, Spatial Modeling and Remote Sensing*. (Colorado State University, 2009).

14. Pessarakli, M. *Handbook of Plant and Crop Physiology*. https://api.taylorfrancis.com/content/books/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=10.1201/9780203908426&type=googlepdf (2002).

15. Lehnhoff, E. A., Menalled, F. D. & Rew, L. J. Tamarisk (Tamarix spp.) establishment in its most northern range. *Invasive Plant Sci. Manag.* **4**, 58–65 (2011).

16. Kahli, H. Caractérisation de l'accumulation des éléments traces métalliques chez trois espèces du genre Atriplex et chez Pseudomonas fluorescens ainsi que l'étude de leurs répercussions sur certains paramètres biochimiques de ces espèces. (Université de Bordeaux; Université Badji Mokhtar-Annaba, 2021).

17. Glinski, J. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. (CRC press, 2018).

18. Brotherson, J. D. & Field, D. Tamarix: impacts of a successful weed. *Rangelands* **9**, 110–112 (1987).

19. Trabut, L. Le Saccharum biflorum Forsk dans les sables du littoral algérien et du Sahara. *J. Agric. Tradit. Bot. Appliquée* **7**, 381–387 (1927).

20. Meddour, R., Sahar, O. & Babkar, A. Savoirs locaux sur les plantes spontanées chez les populations de la wilaya de Tamanrasset (Sahara Central, Algérie). *VertigO- Rev. Électronique En Sci. Environ.* https://journals.openedition.org/vertigo/35315 (2022).

21. Djaballah Cheyma, L. R. & Nadjet, M. Plantes toxiques à usage médicinal traditionnel dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj: Revue de littérature. (2023).

22. DJEDIAI, R. & ROUAS, H. Evaluation du potentiel fongicide des extraits aqueux de huit espèces végétales issues de la végétation du Sahara septentrional contre le Fusarium sp. (UNIVERSITE KASDI MERBAH–OUARGLA).

23. HANNANI, A. Essais de caractérisation de quelques propriétés morphologiques, anatomiques et chimiques de l'Acacia raddiana au milieu saharien. (2011).

24. Chehma, A. & Djebar, M. R. Les espèces médicinales spontanées du Sahara septentrional algérien: distribution spatio-temporelle et étude ethnobotanique. *Synthèse* **14**, 36–45 (2008).

الفصل الرابع:
العمل التطبيقي

IV – العمل التطبيقي

مقدمة :

قمنا في هذا الفصل الى عرض جميع الخطوات التجريبية التي تم اتباعها لتحضير السيليكا النانوية من الرمل الصحراوي باستخدام المحلول القلوي المستخلص من نبات الأثل (الطرفاء المُفصَّلة),بالاضافة اللى تقنيات التحليل والتوصيف المستخدمة. حيث تم إجراء الطرق التجريبية في المخبر الكيمياء التحليلية بكلية الرياضيات وعلوم المادة بورقلة.

IV- 1. المواد المستخدمة

IV- 1.1. الأجهزة و الادوات والمواد الأولية:

الجدول (1) : المواد والأجهزة المستخدمة

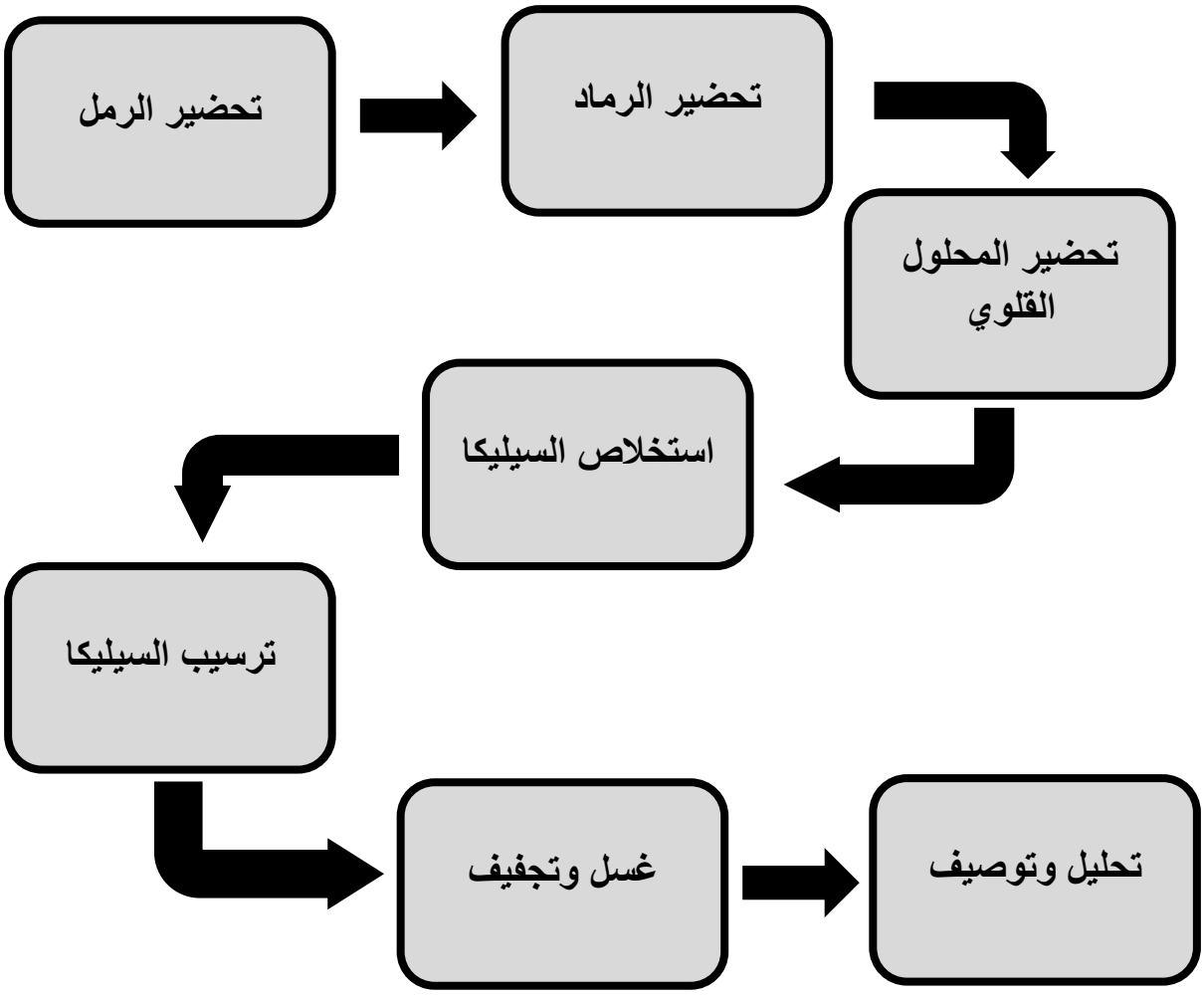
المواد	الأجهزة
· الرمل الصحراوي · نبات الأثل · الماء المقطر · عصير ليمون · حمض الاهيدروكلوريك · الفينولفثالين · المثيل البرتقالي · نترات الفضة	· فرن كهربائي · فرن تجفيف · سخان مغناطيسي · مطحنة منزلية · ميزان الكتروني · ورق ال pH · جهاز حيود الأشعة السينية · جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء · جهاز الطرد المركزي

الجدول (2) :الادوات المستعملة وسعتها

الادوات	السعة
دورق زجاجي	2000 مل
بيشر	250 مل
سحاحة	25 مل
قمع	_
دورق ترشيح	250 مل +500 مل
ورق ترشيح	_
قنينات تخزين	500 مل

IV- 2. مخطط العمل لاستخراج السيليكا من العينة:

الشكل : مخطط العمل لاستخراج السيليكا من العينة



IV- 3. طريقة العمل :

اعتمدت في المنهجية العمل على سلسلة من المراحل الفيزيائية والكيميائية حيث :

IV- 1.3. جمع العينة الرمل :

تم جمع عينات الرمل الصحراوي المستخدمة في هذه الدراسة من ثلاث مناطق مختلفة بولاية ورقلة (الجزائر) يوم 2026/02/14 على الساعة 10:20، وذلك لدراسة التباين المحتمل في الخصائص الفيزيوكيميائية للرمال حسب الموقع الجغرافي. المناطق المختارة هي:

- بلدية نقوسة , دائرة النقوسة , ولاية ورقلة
- منطقة خاسي الخفيف , بلدية نقوسة , دائرة النقوسة , ولاية ورقلة
- بلدية العالية , دائرة حجيرة ,ولاية ورقلة

الجدول (4) : الاحداثيات الجغرافية لمناطق جمع عينات الرمل

المنطقة	خط العرض (DMS)	خط الطول (DMS)	خط العرض (DD)	خط الطول (DD)
نقوسة	"15.3'08°32 شمالاً	"55.1'18°5 شرقاً	°32.137583	°5.315306
حاسي الخفيف	"39.9'25°32 شمالاً	"49.9'19°5 شرقاً	°32.427763	°5.330536
العالية	"42.8'38°32 شمالاً	"35.0'26°5 شرقاً	°32.645223	°5.443068

الشكل (1): صورة لموقع العينة الحاسي الخفيف

الشكل (2): صورة لموقع العينة النقوسة

الشكل (3): صورة لموقع العينة العالية

تم اختيار هذه المناطق لوفرة رمالها وخلوها النسبي من الشوائب الصناعية والملوثات البشرية. تم جمع العينات يدوياً باستخدام مجرفة نظيفة من عمق يتراوح بين 10 و 20 سم من سطح الأرض، وذلك بعد إزالة الطبقة السطحية (حوالي 5 سم) لتجنب الشوائب العضوية والغبار. وزنت كل عينة بكمية 500 غرام تقريباً، ووضعت في أكياس بلاستيكية محكمة الإغلاق، وسميت كل عينة باسم منطقتها، ثم نقلت إلى المخبر وأجريت عليها تحليل كيميائية وفيزيائية.

الشكل (4): صورة لعينة حاسي الخفيف

الشكل (5): صورة لعينة نقوسة

الشكل (6): صورة لعينة العالية

IV- 2.3. جمع عينات نبات الأثل (الطرفاء المُفصَّلة):

تم جمع عينات نبات الأثل (*Tamarix articulata*) مع التركيز بشكل خاص على المناطق ذات الملوحة المرتفعة (السبخات والأراضي القلوية) لضمان احتواء النبات على نسبة عالية من الأملاح القلوية. تم اختيار النباتات السليمة الخالية من الأمراض والآفات، وأخذت العينات من الأجزاء الهوائية (السيقان والأوراق). تم جمع كمية تقدر بـ 1-2 كيلوغرامات من الأجزاء الجافة (أو الطازجة مع تجفيفها لاحقاً)، ووضعت في أكياس (السماح بتهوية العينة ومنع التعفن)، ثم نقلت إلى المخبر.

الشكل (7): صورة لشجرة نبات الاثل

(https://goo.gl/maps/rBHjFDA8i4VNbVq5A?g_st=atm)

IV- 4. المعالجة الفيزيائية

IV- 1.4. معالجة الرمل الصحراوي:

أ- جمع العينات

جمع عينات الرمل الصحراوي من ثلاث مناطق بولاية ورقلة (الجزائر): حاسي خفيف، نقوسة، والعالية. تم أخذ العينات من عمق 10-20 سم بعد إزالة الطبقة السطحية (≈5 سم) لتجنب الشوائب العضوية والغبار.

ب- الغسل

غسل كل عينة رمل على حدة بالماء المقطر ثلاث مرات متتالية بنسبة حجمية 1:3 (رمل:ماء). بعد كل غسلة، تم تحريك المزيج جيداً، ثم ترك الرمل ليترسب، وصب الماء العكر. الهدف من هذه الخطوة هو إزالة الأملاح الذائبة (القابلة للذوبان في الماء) مثل كلوريد الصوديوم، والمواد العالقة، والغبار الناعم.

الشكل (8): صورة لغسل العينات الثلاث

ت- التجفيف

بعد الغسل، جفف الرمل في فرن كهربائي (Étuve) عند درجة حرارة 107°م لمدة 24 ساعة متواصلة حتى ثبات الوزن (أي حتى لا ينقص الوزن بعد ساعة إضافية في الفرن). الهدف هو إزالة كل الرطوبة المتبقية (الماء الحر) من العينة.

الشكل (9): صورة تجفيف الرمل في الفرن الكهربائي

ث- الطحن

بعد التجفيف، طحن الرمل ناعماً باستخدام مطحنة منزلية و هاون خزفي يدوياً. تم الطحن على دفعات صغيرة (20-30 غ لكل مرة) لتجنب ارتفاع حرارة المحرك. الهدف هو تكسير الحبيبات الكبيرة وزيادة مساحة السطح المعرضة للتفاعل، مما يحسن كفاءة الاستخلاص القلوي لاحقاً.

الشكل (10): صورة لطحن الرمل بواسطة هاون

ج- الحفظ

حفظ الرمل الناعم الناتج في اكياس محكمة الإغلاق، مع كتابة ملصق يعرف العينة، لحين الاستخدام.

IV- 2.4. معالجة نبات الأثل (الطرفاء المُفصَّلة):

أ- جمع العينات

جمع عينة نبات الأثل (*Tamarix articulata*) مع التركيز على المنطقة ذات الملوحة المرتفعة (السبخات والأراضي القلوية) لضمان احتواء النبات على نسبة عالية من الأملاح القلوية.و اختيار النباتات السليمة الخالية من الأمراض، وأخذت العينات من الأجزاء الهوائية (السيقان والأوراق).

ب- التنظيف والتقطيع

تنظيف الأغصان من الأوراق المتساقطة والغبار العالق (بدون غسلها بالماء، حرصاً على عدم فقدان الأملاح القلوية). ثم قطعت الأغصان والأوراق إلى قطع صغيرة بطول 2-5 سم باستخدام

مقص حاد أو منشار صغير. الهدف هو تسهيل عملية التجفيف والحرق، وزيادة مساحة السطح المعرضة للحرارة

ت- التجفيف

جففت قطع الأثل في فرن كهربائي (Étuve) عند درجة حرارة 80°م لمدة 24 ساعة متواصلة. تم توزيع القطع في طبقة رقيقة على صينية الفرن لضمان تجفيف متساوٍ. الهدف هو إزالة الرطوبة (الماء) من أنسجة النبات دون حرقها أو فقدان المركبات المتطايرة. العلامات الدالة على تمام الجفاف يصبح النبات هشاً، ينكسر بسهولة، ويصدر صوتاً عند كسره .

الشكل (11): صورة لعينة النبات بعد التجفيف

ث- الحرق

وضعت القطع الجافة في بواتق طينية، بحيث لا تملأ أكثر من نصف سعة البوتقة (لأن المواد العضوية تتمدد أثناء الحرق). أدخلت البواتق إلى فرن كهربائي (Four à moufle)، وتم التسخين تدريجياً من درجة حرارة الغرفة إلى 550°م (بمعدل 100°م كل 15 دقيقة). تركت العينة عند 550°م لمدة 4 ساعات لضمان احتراق كامل للمواد العضوية وتثبيت القلويات في الرماد. الغرض من درجة الحرارة 550°م هو:

· احتراق كامل للمواد العضوية (تحولها إلى CO_2 و H_2O)

· تحول الأملاح القلوية إلى كربونات (K_2CO_3, Na_2CO_3) وهيدروكسيدات (KOH, NaOH)

· تجنب تطاير القلويات (الذي يحدث عند درجات حرارة أعلى من 600°م)

الشكل (12): صورة لفرن الكهربائي

ج- التبريد والتجميع

بعد انتهاء فترة الحرق، أطفئ الفرن وترك ليبرد تدريجياً إلى درجة حرارة أقل من 200°م. أخرجت البوتقة من الفرن باستخدام ملقط طويل، وتركت لتبرد في مجفف (Dessiccateur) لحماية الرماد من الرطوبة الجوية. بعد التبريد الكامل، جمع الرماد الرمادي الفاتح الناتج.

الشكل (13): صورة الرماد الناتج لنبات الاثل

ح- وزن الرماد وحساب المردود

تم وزن الرماد الناتج، وحساب مردود الرماد (نسبة الرماد إلى وزن النبات الجاف) وفق المعادلة:

$$\text{الرماد مردود (\%)} = (\text{الرماد وزن} / \text{الحرق قبل الجاف النبات وزن}) \times 100 \quad \text{1}$$

خ- الحفظ

حفظ رماد الطرفة او الأثل في بوتقات طينية محكمة الإغلاق، مع كتابة ملصق يعرف العينة (التاريخ، درجة حرارة الحرق، الوزن). خزن الرماد في مكان جاف وبارد لحماية من الرطوبة وثاني أكسيد الكربون في الهواء (اللذان يقللان من قلويته مع الوقت).

IV- 5. المعالجة الكيميائية

بعد الانتهاء من المعالجة الفيزيائية للمواد الأولية (غسل، تجفيف، طحن، حرق)، تأتي مرحلة المعالجة الكيميائية التي تشمل تحضير المحلول القلوي من رماد الأثل، ثم استخلاص السيليكا من الرمل، يليها ترسيب وتنقية السيليكا النانوية.

IV- 1.5. تحضير المحلول القلوي من رماد الأثل

أ- مبدأ العملية

يعتمد تحضير المحلول القلوي على إذابة الأملاح القلوية الموجودة في رماد (خاصة كربونات البوتاسيوم K_2CO_3 وكربونات الصوديوم Na_2CO_3) في الماء المقطر. هذه الأملاح تتحلل مائياً منتجة أيونات الهيدروكسيد (OH^-) المسؤولة عن القلوية العالية للمحلول.

ب- الخطوات العملية

الشكل :مخطط لتحضير المحلول القلوي من رماد الأثل

IV- 2.5. معايرة المحلول القلوي (تقدير القلوية الكلية)

أ- مبدأ المعايرة

تعتمد معايرة المحلول القلوي على تفاعل معادلة حمض-قاعدة (Acid-Base titration)، حيث يتفاعل حمض الهيدروكلوريك (HCl) مع القلويات الموجودة في المحلول (OH^-, CO_3^{2-}, HCO_3^-) وفق المعادلات:

$$OH^- + H^+ \rightarrow H_2O$$

$$CO_3^{2-} + H^+ \rightarrow HCO_3^-$$

$$HCO_3^- + H^+ \rightarrow H_2O + CO_2$$

ب- المعايرة باستخدام كاشف الفينولفثالين (V_1)

· أخذ 10 مل من المحلول القلوي في بيشر سعة 80 مل.

· إضافة 20 مل من الماء المقطر لتخفيف العينة (لتسهيل رؤية التغير اللوني).

· إضافة 2-3 قطرات من كاشف الفينولفثالين، فتحول لون المحلول إلى وردي.

الشكل (14): صورة قبل معايرة المحلول **الشكل (15):** صورة بعد معايرة المحلول

· تمت المعايرة بمحلول HCl بتركيز 0.1 مول/لتر باستخدام سحاحة (Burette) مدرجة بدقة 0.1 مل، مع تحريك مستمر.

· تمت المعايرة حتى زوال اللون الوردي .

· تسجيل حجم HCl المستهلك (V_1).

ت- المعايرة باستخدام كاشف الميثيل البرتقالي (V_2)

· في بيشر نظيف، تم أخذ 10 مل جديدة من المحلول القلوي.

· إضافة 2-3 قطرات من كاشف الميثيل البرتقالي، فتحول لون المحلول إلى أصفر.

· تمت المعايرة بنفس محلول HCl (0.1 مول/لتر) مع تحريك مستمر.

· تمت المعايرة حتى تغير اللون من الأصفر إلى البرتقالي (ثم إلى الأحمر).

· تسجيل حجم HCl المستهلك (V_2).

الشكل (16): صورة قبل معايرة المحلول

الشكل (17): صورة بعد معايرة المحلول

ث- حساب القلوية الكلية

تم حساب القلوية الكلية (Total Alkalinity) بالميلي مكافئ/لتر (meq/L) وفق المعا

2 — $\text{القلوية الكلية } (\text{meq/L}) = (V_2 \times \text{C_HCl} \times 1000) / \text{V_échantillon}$

حيث:

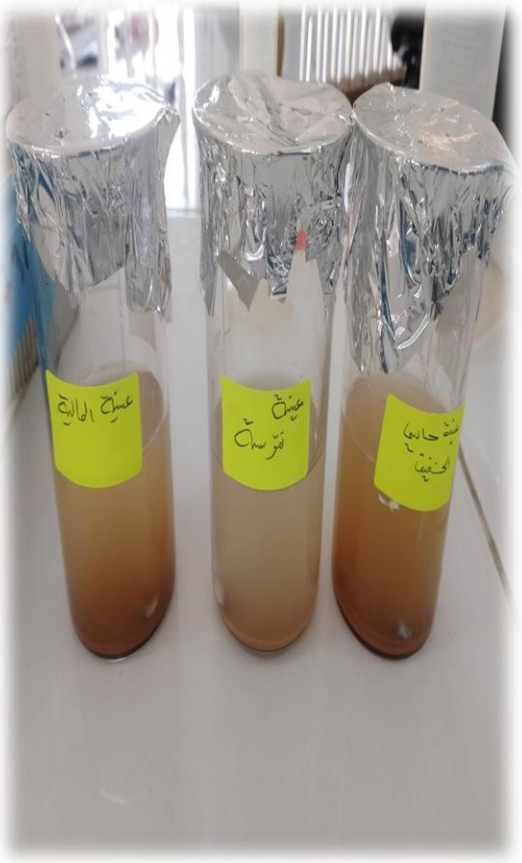
· V_2 = متوسط حجم HCl المستهلك في معايرة الميثيل البرتقالي (مل)

· C_HCl = تركيز HCl = 0.1 مول/لتر

· V_échantillon = حجم العينة = 10 مل

IV- 2.5. استخلاص السيليكات من الرمل

إضافة 10 غ من الرمل الجاف المطحون (حجم حبيبي < 100 ميكرومتر) إلى 100 مل من المحلول القلوي المحضر مسبقاً لكل عينة في بيشر سعة 250 مل. وضع البيشر على سخان مغناطيسي وسخن المزيج عند درجة حرارة 95-100°م مع تحريك مستمر لمدة 4 ساعات. للحفاظ على حجم المحلول وتقليل التبخر المفرط، تم تغطية البيشر بورق المنيوم مثقوب. بعد انتهاء مدة التسخين، تم ترشيح المزيج وهو ساخن باستخدام قمع وورق ترشيح Whatman No. 1 . تم جمع الراشح (محلول السيليكات) في قارورة محكمة الإغلاق، بينما تم التخلص من الراسب المتبقي (الشوائب غير الذائبة).



الشكل (18): صورة قبل تسخين المزيج

الشكل (19): صورة عند انتهاء التسخين

IV- 3.5. حفظ محلول السيليكات

بعد الترشيح الساخن، تم جمع الراشح (محلول السيليكات) في قارورة محكمة الإغلاق. لوحظ أن pH المحلول كان 9 (انخفاضاً من القيمة الأصلية 12)، ويعزى ذلك إلى امتصاص المحلول لثاني أكسيد الكربون من الهواء أثناء التخزين.

IV- 4.5. ترسيب السيليكا

أ- تحضير عصير الليمون المركز

عصر 5 حبات ليمون طازجة وتصفيتها، ثم تركيز العصير بالتبخير على سخان مغناطيسي عند 75-80°م مع تحريك خفيف حتى تقلص الحجم إلى النصف (من 200 مل إلى 100 مل). بعد التبريد إلى درجة حرارة الغرفة، تم قياس pH للعصير المركز فكان حوالي 2.5.

ب- إجراء الترسيب

إضافة عصير الليمون المركز قطرة قطرة إلى محلول السيليكات (100 مل) مع تحريك مستمر باستخدام سخان مغناطيسي (بدون تسخين)، مع مراقبة الأس الهيدروجيني (pH) باستمرار حتى الوصول إلى pH = 3.

IV- 4.5. فصل جسيمات السيليكا

فصل الجسيمات العالقة في المحلول العكر باستخدام جهاز الطرد المركزي (Centrifuge) عند سرعة 5000 دورة في الدقيقة (rpm) لمدة 15 دقيقة. بعد الطرد، لوحظ تشكل طبقة رقيقة جداً من راسب أبيض في قاع الأنابيب. تم التخلص من المحلول العلوي، وجمعت الطبقة الرقيقة.

IV- 5.5.استخلاص السيليكا (مع تحسين الظروف)

تم تطبيق نفس الخطوات السابقة (الموصوفة في القسم 2.5) مع التعديلات التالية:

- كمية الرمل: 20 غ (بدلاً من 10 غ)
- حجم المحلول القلوي: 200 مل (بدلاً من 100 مل)
- زمن الاستخلاص: 6 ساعات (بدلاً من 4 ساعات)

· سرعة الطرد المركزي: 9000 rpm (بدلاً من 8000 rpm)

أما باقي الشروط (درجة الحرارة 95-100°م، التغطية بزجاج ساعة، الترسيب بعصير الليمون حتى pH = 2-3) فبقيت كما هي.

IV-6. مطيافية الأشعة تحت الحمراء (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR)

هي تقنية تحليلية تستخدم لتحديد المجموعات الوظيفية في المركبات الكيميائية من خلال تسجيل امتصاص الجزيئات للأشعة تحت الحمراء. تعتمد هذه التقنية على مبدأ أن الجزيئات تمتص الأشعة تحت الحمراء عند ترددات محددة تتوافق مع اهتزازات الروابط الكيميائية (تمدد وانحناء)، مما ينتج طيفاً يمثل "بصمة" فريدة للمركب . تستخدم FTIR على نطاق واسع في توصيف المواد النانوية، بما في ذلك السيليكا النانوية، حيث تظهر قمماً مميزة لروابط Si-O-Si في نطاق 400-1300 سم$^{-1}$.

الشكل (20): صورة مطياف الأشعة تحت الحمراء **FTIR**

الفصل الخامس:
النتائج والمناقشة

V- النتائج والمناقشة

مقدمة :

تعرض في هذا الفصل النتائج المستخلصة مع تفسيرها. اعتمدت الدراسة في الجانب التحليلي على ثلاثة مخابر متخصصة: مخبر الأشغال العمومية لولاية ورقلة، مخبر الفيزياء بكلية الرياضيات وعلوم المادة، ومخبر جيولوجيا الصحراء.

V-1.توصيف الرمل:

استهلت الدراسة بتحاليل أولية لعينات الرمل (التحليل الحبيبي، الكبريتات، الكربونات، XRD، XRF)، وذلك بهدف توصيف الرمال الخام وتقييم صلاحيتها كمواد أولية لاستخلاص السيليكا النانوية.

V-1.1.التحليل الحبيبي للرمل:

شكل (1): جدول نتائج التحليل الحبيبي للعينات الثلاث

فتحة المنخل (مم)	الوزن المار (%)		
	حاسي الخفيف	العالية	نقوسة
0.08	9	97	2
0.1	10	27	2
0.2	26	26	10
0.4	92	-	76

يوضح الجدول (5-1) أن عينة العالية تحتوي على أعلى نسبة من الحبيبات الناعمة عند منخل 0.08 mm (97%)، تليها عينة حاسي خفيف (9%)، ثم عينة نقوسة (2%). عند منخل 0.4 mm، سجلت عينة حاسي خفيف أعلى نسبة (92%) بينما سجلت عينة نقوسة 76%.

تشير هذه النتائج إلى أن عينة العالية هي الأنعم بين العينات عند الأقطار الصغيرة جداً، مما قد يؤثر إيجاباً على مساحة السطح المعرضة للتفاعل أثناء عملية الاستخلاص القلوي [1].

V-2.1. تقدير الكبريتات ,الكربونات ,والمواد غير الذائبة :

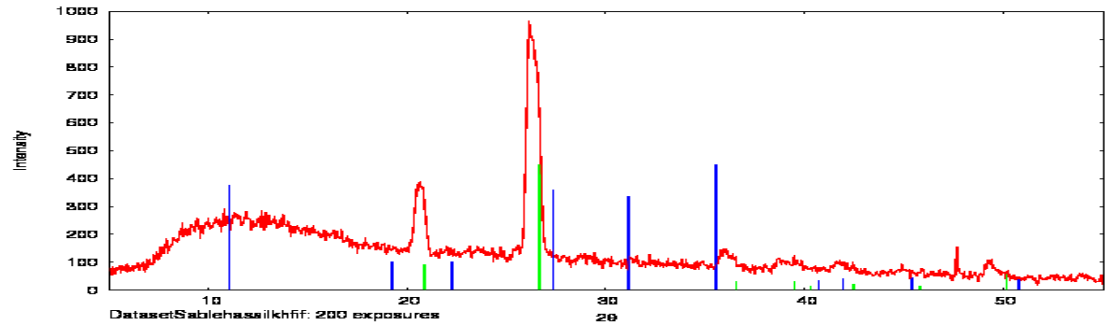
تم تقدير نسب الكبريتات والكربونات والمواد غير الذائبة وفق المعايير NF P 15-461 و BS 1377. النتائج موضحة في الجدول (5-2).

شكل (2): جدول نتائج التحاليل الكيميائية البسيطة

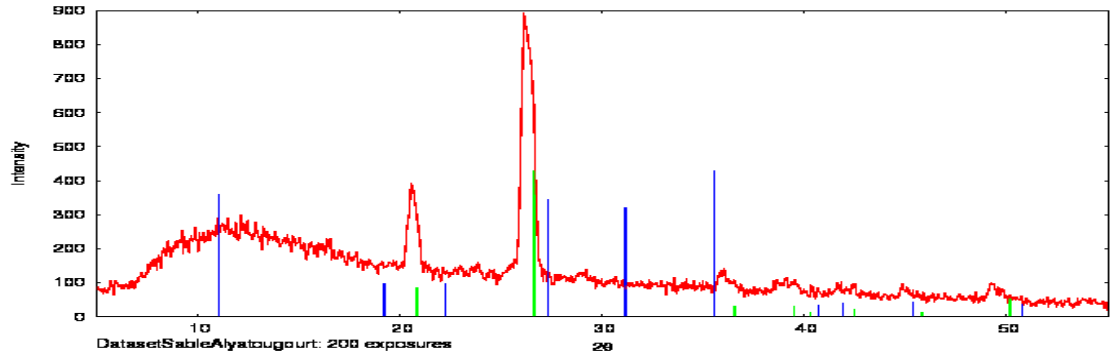
العينة		حاسي الخفيف	العالية	نقوسة
المواد غير الذائبة	وزن البوتقة مع الراسب	33.924	40.526	41.164
	وزن البوتقة فارغة	32.965	39.613	40.208
	وزن البقايا المتبقية	0.958	0.913	0.956
	نسبة المواد غير قابلة للذوبان%	95.9	91.3	95.6
الكبريتات	وزن البوتقة مع الراسب	43.655	45.099	42.904
	وزن البوتقة فارغة	43.650	45.076	42.884
	$\%^{-}SO_3^{2}$	0.171	0.788	0.686
	$\%^{-}SO_4^{2}$	0.206	0.948	0.824
	$CaSO_3 \cdot 2H_2O$	0.367	1.694	1.474
الكربونات	V NaOH	9.6	9.5	9.8
	% $CaCO_3$	2	5	4
الكلوريدات	Phi	7.79	7.57	7.90
	V $AgNO_3$	1.3	21.6	2.1
	$\%^{-}Cl$	0.0062	0.1214	0.0108
	% NaCl	0.010	0.199	0.018

نسبة المواد غير الذائبة مرتفعة (91-96%)، وهي تمثل السيليكا أساساً. نسبة الكبريتات منخفضة جداً (<1%)، مما يدل على خلوه من الأملاح الكبريتية الضارة. وجود كربونات الكالسيوم (2-5%) قد يستهلك جزءاً من القلويات أثناء الاستخلاص [2].

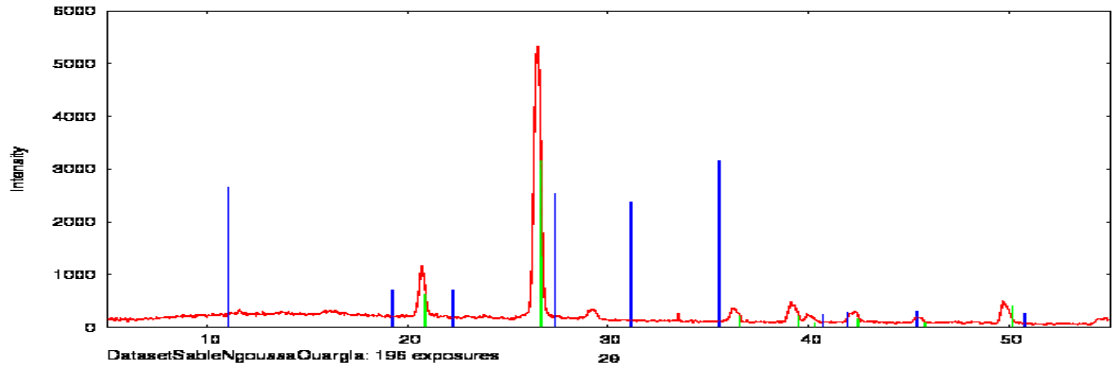
V-3.1. تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) للرمل:



شكل (1): صورة لتحليل حيود الأشعة السينية لعينة حاسي الخفيف



شكل (2): صورة لتحليل حيود الأشعة السينية لعينة العالية

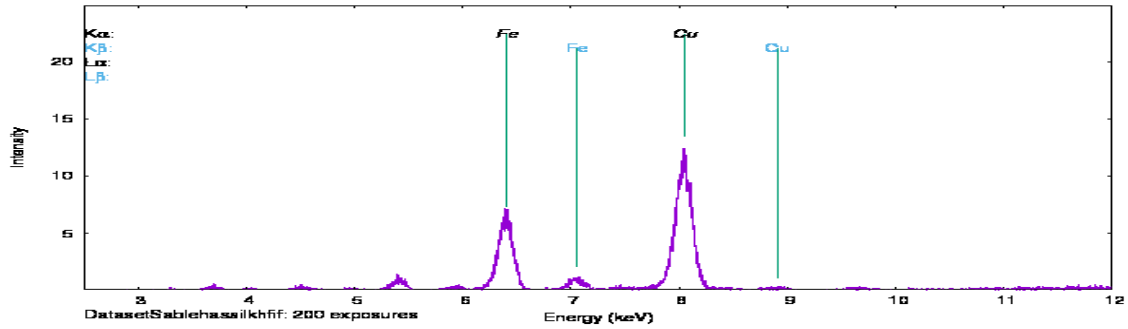


شكل (3): صورة لتحليل حيود الأشعة السينية لعينة نقوسة

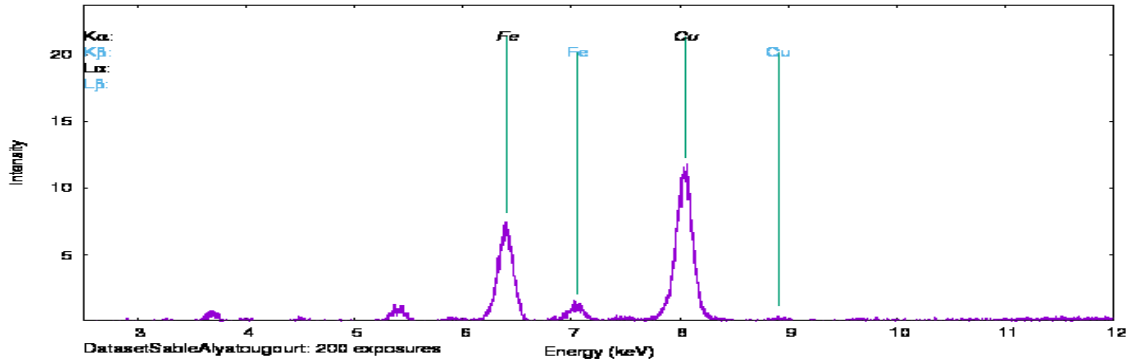
أظهر تحليل XRD أن العينات الثلاث تتكون من الكوارتز (α-quartz) كطور بلوري رئيسي. القمم المميزة ظهرت عند زوايا 2θ = 20.7°، 26.5°، 36.5°، 39.5°، 42.5°، و 50.2°.

غياب الهالة العريضة في المجال 20-30° يؤكد أن السيليكا في الطور البلوري. هذا يفسر صعوبة استخلاص السيليكا بالطرق القلوية المعتدلة [3].

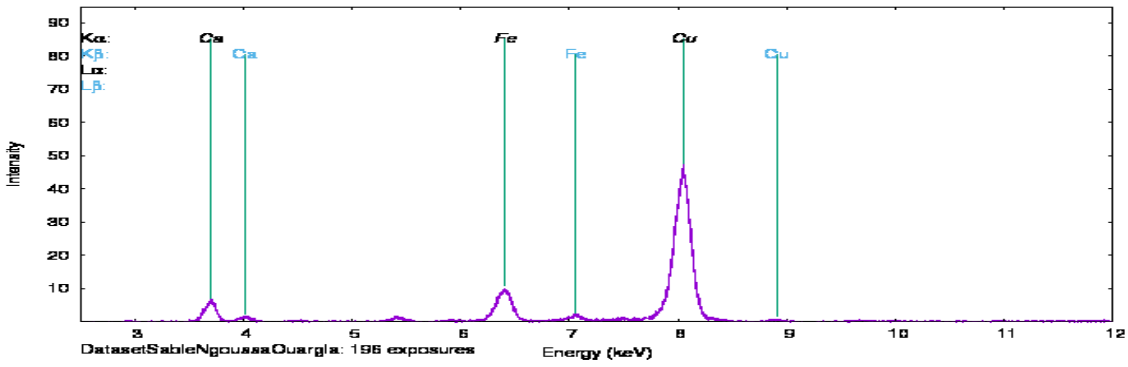
4.1-V. تحليل فلورية الأشعة السينية للرمل:



شكل (4): صورة لتحليل فلورية الأشعة السينية لعينة حاسي الخفيف



شكل (5): صورة لتحليل فلورية الأشعة السينية لعينة العالية



شكل (6): صورة لتحليل فلورية الأشعة السينية لعينة نقوسة

أظهر تحليل XRF أن عينة نقوسة تحتوي على أعلى نسبة من السيليكا (≈ 96%)، يليها حاسي خفيف (≈ 93%)، ثم العالية (≈ 90%). وجود (Fe_2O_3) بنسبة 0.5-1.5% يفسر اللون الأصفر للرمال.

هذه النتائج تؤكد أن الرمال المدروسة مصدر غني بالسيليكا، وتصلح كمادة أولية لاستخلاص السيليكا النانوية [4].

V-2.توصيف المحلول القلوي :

V-2-1. مردود رماد الأثل :

حرق 1060.03 غ من نبات الأثل الجاف عند 550°م لمدة 4 ساعات. بعد التبريد، تم الحصول على 139.64 غ من الرماد، أي مردود قدره 13.17% [5,6].

V-2-2. قياس الأس الهيدروجيني (pH) :

بعد تحضير المحلول القلوي بنسبة 1:3 (رماد:ماء) بتسخين عند 85°م لمدة ساعتين ثم ترشيحه. بلغ pH المحلول 12. هذه القيمة مناسبة لاستخلاص السيليكا من الكوارتز البلوري [2].

V-2-3. تقدير القلوية الكلية :

تقدير القلوية الكلية بالمعايرة باستخدام HCl (0.1 M). أظهرت معايرة الفينولفثالين استهلاك 1.6 مل، بينما أظهرت معايرة الميثيل البرتقالي استهلاك 7.6 مل. قدرت القلوية الكلية بـ 76 meq/L. يحتوي المحلول على CO_3^{2-} (32 meq/L) و HCO_3^- (44 meq/L) مع غياب OH^- الحر.

V-3. استخلاص وترسيب السيليكا

إجراء استخلاص السيليكات تحت الظروف التالية: 10 غ رمل + 100 مل محلول قلوي (pH = 12)، عند 95-100°م لمدة 4 ساعات. بعد الترشيح الساخن، انخفض pH إلى 9، مما يدل على استهلاك جزئي لأيونات OH^-.

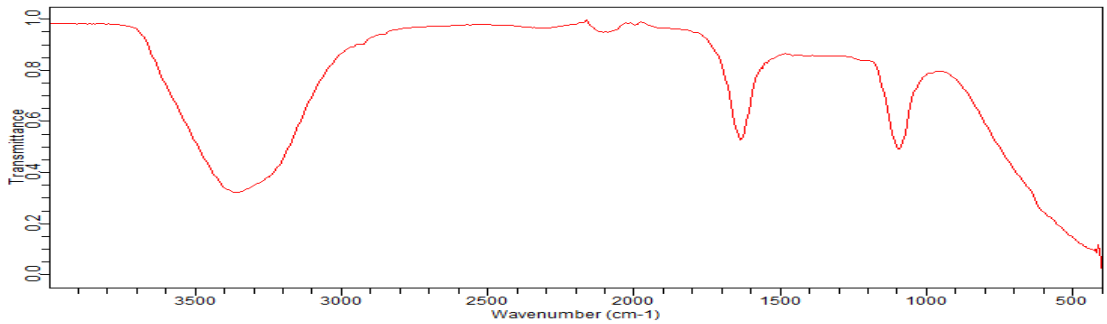
لترسيب السيليكا، تم إضافة عصير الليمون المركز قطرة قطرة مع التحريك حتى pH = 2-3. لم يتشكل هلام متماسك، بل تحول المحلول إلى عكر خفيف. يعزى ذلك إلى انخفاض تركيز السيليكات في المحلول [2] وضعف حمض الستريك مقارنة بالأحماض المعدنية .

تم فصل الجسيمات العالقة بالطرد المركزي (8000 rpm، 20 دقيقة)، ثم تجفيفها عند 105°م لمدة 24 ساعة (بدون غسل حفاظاً على العينة). سجلت الأوزان التالية: نقوسة (0.28 غ)، حاسي خفيف (0.93 غ)، العالية (1.75 غ). المردود الظاهري: نقوسة (2.81%)، حاسي خفيف (9.32%)، العالية (17.52%).

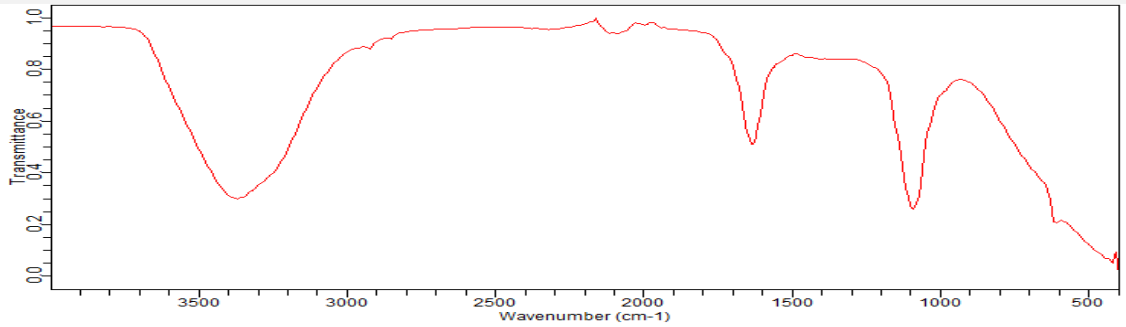
V-4.توصيف السيليكا النانوية المنتجة :

V-4-1.تحليل الأشعة تحت الحمراء (FTIR) :

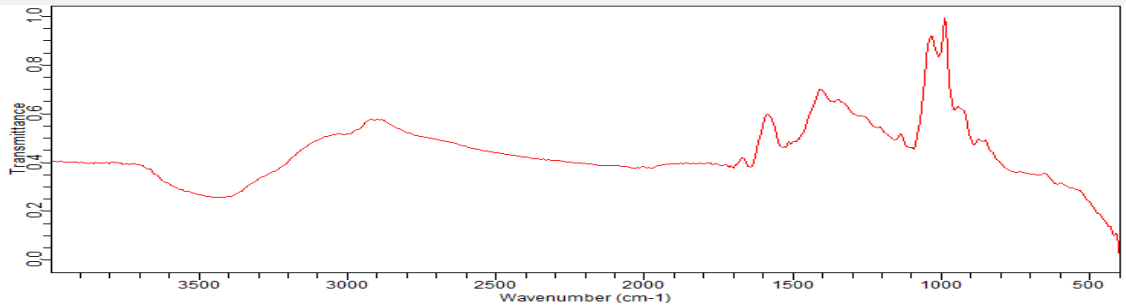
سجلت أطياف FTIR للسيليكا النانوية المحضرة من العينات الثلاث في نطاق 400-4000 سم$^{-1}$. النتائج موضحة في الصور.



شكل (7): صورة لطيف الأشعة تحت الحمراء لعينة حاسي الحفيف



شكل (8): صورة لطيف الأشعة تحت الحمراء لعينة العالية



شكل (9): صورة لطيف الأشعة تحت الحمراء لعينة نقوسة

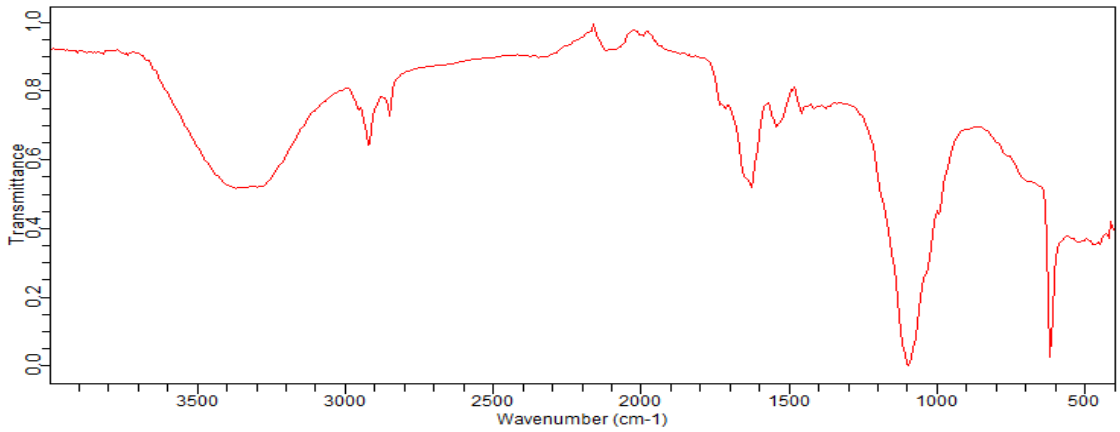
تظهر جميع العينات القمم المميزة للسيليكا غير المتبلورة، خاصة الحزمة العريضة القوية عند 1000-1100 سم$^{-1}$ التي تعود إلى اهتزازات شبكة Si-O-Si. هذا يؤكد أن المنتج الناتج هو سيليكا نانوية [7].

وجود قمتي الماء عند 3400 و 1630 سم$^{-1}$ يدل على وجود ماء ممتز على سطح الجسيمات، وهو أمر طبيعي في السيليكا غير المكلسة. تختلف شدة القمم بين العينات، حيث تظهر عينة العالية أعلى شدة، مما يتوافق مع مردودها الأعلى.

V-5. تحسين الظروف (عينة العالية)

تم تطبيق الظروف المحسنة على عينة العالية فقط: 20 غ رمل + 200 مل محلول قلوي (نسبة 1:3)، عند 95-100°م لمدة 6 ساعات. بعد الترسيب والفصل، بلغ وزن الراسب الخام 4.91 غ، أي مردود ظاهري 24.56%. هذا التحسن يعود إلى زيادة تركيز المحلول القلوي وتمديد زمن الاستخلاص.

سجل طيف FTIR لعينة السيليكا النانوية المحضرة من رمل العالية بعد تطبيق الظروف المحسنة (نسبة 1:3، زمن 6 ساعات). النتائج موضحة في صورة التالية :



شكل (10): صورة لطيف الأشعة تحت الحمراء لعينة العالية بعد التعديل

تظهر القمة العريضة عند 3400 سم$^{-1}$، وهي سمة مميزة للماء الممتز (adsorbed water) على سطح جزيئات السيليكا. شكلها العريض يعود إلى تأثير الروابط الهيدروجينية القوية بين جزيئات الماء.

يظهر الطيف القمم المميزة للسيليكا غير المتبلورة، خاصة الحزمة العريضة القوية عند 1100-1000 سم$^{-1}$. هذه النتائج تؤكد أن المنتج الناتج هو سيليكا نانوية [7].

بالمقارنة مع الطيف قبل التعديل، نلاحظ زيادة في شدة القمم، مما يدل على تحسن في نقاوة المنتج وزيادة في كمية السيليكا المستخلصة. مما يشير إلى أن عملية التعديل لم تؤثر سلباً على جودة المنتج.

المراجع

1. Zhong, T., Yu, W., Shen, C. & Wu, X. Research on Preparation and Characterisation of High-purity Silica Sands by Purification of Quartz Vein Ore from Dabie Mountain. *Silicon* **14**, 4723–4729 (2022).

2. Aldila, H. & Andini, D. E. Extraction of silica from Bangka quartz sand using the alkaline digestion method. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* vol. 1419 012037 (IOP Publishing, 2024).

3. Lu, J. *et al.* Chiral Plasmonic Nanochains *via* the Self-Assembly of Gold Nanorods and Helical Glutathione Oligomers Facilitated by Cetyltrimethylammonium Bromide Micelles. *ACS Nano* **11**, 3463–3475 (2017).

4. Boualem, A., Leontie, L., Lopera, S. A. G. & Hamzaoui, S. Synthesis and Characterization of Mesoporous Silica from Algerian River Sand for Solar Grade Silicon: Effect of Alkaline Concentration on the Porosity and Purity of Silica Powder. *Silicon* **14**, 5231–5240 (2022).

5. Bencherif, K. *et al.* Impact of soil salinity on arbuscular mycorrhizal fungi biodiversity and microflora biomass associated with Tamarix articulata Vahll rhizosphere in arid and semi-arid Algerian areas. *Sci. Total Environ.* **533**, 488–494 (2015).

6. Duan, Q., Zhu, Z., Wang, B. & Chen, M. Recent progress on the salt tolerance mechanisms and application of tamarisk. *Int. J. Mol. Sci.* **23**, 3325 (2022).

7. Slowing, I. I., Vivero-Escoto, J. L., Wu, C.-W. & Lin, V. S.-Y. Mesoporous silica nanoparticles as controlled release drug delivery and gene transfection carriers. *Adv. Drug Deliv. Rev.* **60**, 1278–1288 (2008).

الخلاصة العامة

الخلاصة العامة

تم في هذا العمل تحضير السيليكا النانوية بطريقة خضراء باستخدام الرمل الصحراوي كمادة أولية والمحلول القلوي المستخلص من رماد نبات الأثل (*Tamarix articulata*) كمصدر طبيعي للقلويات، مع استخدام عصير الليمون كحمض طبيعي للترسيب.

بينت نتائج التحاليل أن الرمال المأخوذة من مناطق **نقوسة وحاسي خفيف والعالية** غنية بالكوارتز البلوري، إذ تراوحت نسبة نقاوته بين 90% و96%. كما أُعدّ محلول قلوي بقيمة pH تساوي 12 وقلوية كلية بلغت meq/L76 ، مما يجعله ملائمًا من الناحية النظرية لاستخلاص السيليكا. وقد سُجل مردود لرماد الأثل قدره 13.17%.

بعد عملية الاستخلاص (عند 100°م لمدة 4 ساعات)، تم الحصول على مردود ظاهري تراوح بين 2.81% و 17.52%، حيث سجل **رمل عينة العالية** أعلى مردود (17.52%) رغم أنها الأقل نقاوة. هذا يؤكد أن وجود الشوائب في بنية الكوارتز يضعف الشبكة البلورية ويسهل الاستخلاص. بعد تحسين الظروف (نسبة 1:3، زمن 6 ساعات) على عينة العالية، ارتفع المردود الظاهري إلى 24.56%.

أكدت أطياف FTIR أن المنتج الناتج هو سيليكا نانوية غير متبلورة، مع وجود قمم مميزة لشبكة Si-O-Si عند 1100-1000، 800، و 470 سم$^{-1}$.

على الرغم من أن المردود لا يزال أقل من الطرق التقليدية (15-30%)، فإن الطريقة الخضراء المتبقية تتميز بانخفاض التكلفة (مواد أولية مجانية)، وعدم استخدام مواد كيميائية خطرة، وبصمة بيئية منخفضة، مما يجعلها بديلاً واعداً مع التحسينات المناسبة.

الافاق والتوصيات

1) التوصيات

- زيادة زمن الاستخلاص إلى 12-24 ساعة لتحسين مردود السيليكا
- استخدام نبات أثل من مناطق شديدة الملوحة (سبخات) لرفع قلوية الرماد
- تجفيف نبات الأثل في الفرن مباشرة (80°م) بدلاً من الشمس للحفاظ على القلويات
- استخدام المحلول القلوي فوراً بعد تحضيره دون تخزين لمنع انخفاض pH
- غسل الراسب بعد الفصل بالماء المقطر للحصول على سيليكا أكثر نقاءً
- تطبيق الظروف المحسنة على جميع العينات (نقوسة، حاسي خفيف، العالية) لإجراء مقارنة عادلة
- تكرار التجارب ثلاث مرات على الأقل لضمان دقة النتائج وموثوقيتها

2) الأفاق المستقبلية

- اختبار أحماض عضوية أخرى (الخل، حمض التارتاريك) لتحسين كفاءة الترسيب
- استخدام الموجات فوق الصوتية أو الميكروويف لتسريع عملية الاستخلاص وتقليل استهلاك الطاقة
- دراسة حركية الاستخلاص (Kinetic study) لفهم آلية التفاعل بشكل أفضل
- اختبار السيليكا الناتجة في إزالة المعادن الثقيلة (الرصاص، الكادميوم، الزئبق) من المياه الملوثة
- استخدام السيليكا النانوية كحامل للأسمدة والمبيدات في الزراعة
- إضافة السيليكا النانوية إلى الخرسانة والإسمنت لدراسة تحسين الخواص الميكانيكية
- دراسة الجدوى الاقتصادية للإنتاج على نطاق واسع
- تسجيل براءة اختراع للطريقة الخضراء المطورة
- إنشاء مؤسسة ناشئة (Startup) لتحويل البحث إلى منتج تجاري

المشروع الاقتصادي

مشروع اقتصادي: مؤسسة ناشئة لتحضير السيليكا النانوية من رمل صحراوي بطريقة خضراء

1. 📌 اسم المشروع:

GreenSilica (سيليكا خضراء): مؤسسة ناشئة متخصصة في تحضير السيليكا النانوية من رمل صحراوي بطريقة خضراء.

2. 🎯 فكرة المشروع:

يهدف مشروع GreenSilica إلى تحويل الرمل الصحراوي (المتوفر بكثرة في الجزائر) إلى سيليكا نانوية عالية القيمة باستخدام رماد نبات الأثل كمصدر قلوي طبيعي، وذلك في عملية صديقة للبيئة واقتصادية. تعتمد الفكرة على استغلال الموارد المحلية المجانية (رمل + نبات الأثل) لإنتاج مادة نانوية مطلوبة عالمياً، مع تقليل الاعتماد على المواد الكيميائية المستوردة والمكلفة.

3. 🌿 أهداف المشروع:

- إنتاج سيليكا نانوية بتكلفة منخفضة (أقل من 2000 دج/كغ)
- تطوير طريقة خضراء خالية من المواد الكيميائية الخطرة
- خلق فرص عمل محلية في المناطق الصحراوية
- تقليل الاعتماد على استيراد السيليكا من الخارج

4. 🏭 مجالات التطبيق: السيليكا مادة متعددة الاستخدام تدخل في:

- مواد البناء (إضافات للخرسانة والإسمنت)
- معالجة المياه (إزالة المعادن الثقيلة والصبغات)
- الزراعة (حامل للأسمدة والمبيدات)
- مستحضرات التجميل (مواد مالئة ومكثفة)
- الطب (توصيل الأدوية – مرحلة لاحقة)

5. 💼 الجمهور المستهدف:

- مصانع الإسمنت والخرسانة
- محطات معالجة المياه

- المؤسسات الزراعية الكبرى
- مصانع الدهانات والطلاءات
- مراكز البحث والجامعات
- السوق التصديري (مرحلة ثانية)

6. 🌍 القيمة المضافة الاقتصادية:

- تكلفة إنتاج 1 كغ من الراسب الخام: 1000-1500 دج
- سعر بيع 1 كغ من الراسب الخام: 4000-6000 دج
- سعر بيع 1 كغ من السيليكا النقية: 8000-12000 دج
- هامش الربح المقدر: 60-80%
- فترة استرداد رأس المال: 1-2 سنة

المزايا التنافسية:

- المواد الأولية مجانية (رمل + أثل)
- لا مواد كيميائية خطرة
- لا اعتماد على الاستيراد
- تكنولوجيا بسيطة ومنخفضة التكلفة

7. 🔬 الجانب التقني:

- الاعتماد على تقنيات مخبرية
- تأكيد جودة المنتج عن طريق:
  - التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)
  - تحليل حيود الأشعة السينية (XRD)
  - التحليل الحبيبي (Granulométrie)

8. 💰 التقدير المالي المبدئي:

- رأس المال الأولي المقدر: 1.2 – 2.5 مليون دج (تجهيزات مخبرية أساسية)
- التكاليف التشغيلية الشهرية: 65,000 – 110,000 دج
- الإيرادات الشهرية المتوقعة: 80,000 – 120,000 دج
- فترة استرداد رأس المال: 30 – 60 شهر (لإنتاج صغير)

- هامش الربح المقدر: 15 – 50%

9. 🎁 المنتج النهائي:

المنتج 1: الراسب الخام (غير المغسول)

- مسحوق أبيض إلى رمادي فاتح
- يحتوي على سيليكا نانوية + أملاح متبقية + مواد عضوية
- يستخدم في تطبيقات لا تتطلب نقاوة عالية (مواد البناء، الزراعة)

المنتج 2: السيليكا النقية (بعد الغسل والتكلس)

- مسحوق أبيض ناعم جداً
- نقاوة > 90% SiO_2
- حجم حبيبات نانومتري (20-100 نانومتر)
- يستخدم في معالجة المياه، المستحضرات الصيدلانية، الإلكترونيات

Green Silica

Green nanotechnology from Algerian sand

الملخص

الملخص

يهدف هذا العمل إلى تحضير السيليكا النانوية من الرمل الصحراوي بطريقة خضراء باستخدام رماد نبات الأثل كمصدر قلوي طبيعي وعصير الليمون كحمض طبيعي للترسيب.

تم جمع ثلاث عينات من الرمل من مناطق نقوسة، حاسي خفيف، والعالية بولاية ورقلة. أجريت تحاليل فيزيائية وكيميائية (التحليل الحبيبي، الكبريتات، الكربونات، XRD، XRF). تم تحضير المحلول القلوي من رماد الأثل بنسبة 1:3، وقياس pH والقلوية الكلية. أجريت عملية استخلاص السيليكات عند 95-100°م لمدة 4-8 ساعات، ثم ترسيب السيليكا بعصير الليمون حتى pH=2-3، يليها فصل وتجفيف. تم توصيف السيليكا النانوية بواسطة FTIR.

أظهرت النتائج أن الرمال تتكون من كوارتز بلوري بنقاوة 90-96%. بلغ pH المحلول القلوي 12 والقلوية الكلية 76 meq/L. سجلت عينة العالية أعلى مردود (24.56%) بينما سجلت عينة نقوسة أقل مردود (2.81%). أكد FTIR أن المنتج سيليكا نانوية غير متبلورة.

كلمات مفتاحية: سيليكا نانوية، رمل صحراوي، نبات الأثل، طريقة خضراء، GreenSilica.

Résumé

Ce travail vise à préparer de la silice nanométrique à partir du sable saharien par une méthode verte utilisant les cendres de Tamarix articulata comme source alcaline naturelle et le jus de citron comme acide naturel.

Trois échantillons de sable ont été collectés à Ngoussa, Hassi Khfif et El Alia (Ouargla). Des analyses (granulométrie, sulfates, carbonates, DRX, XRF) ont été réalisées. La solution alcaline a été préparée avec un rapport 1:3 (cendre:eau). L'extraction des silicates a été effectuée à 95-100°C pendant 4-8 heures, suivie de la précipitation de la silice par jus de citron jusqu'à pH=2-3. La silice obtenue a été caractérisée par FTIR.

Les résultats montrent que les sables sont composés de quartz cristallin (pureté 90-96%). Le pH de la solution alcaline était de 12 avec une alcalinité de 76 meq/L. L'échantillon d'El Alia a donné le meilleur rendement (24.56%) tandis que Ngoussa a donné le plus faible (2.81%). Le FTIR a confirmé que le produit est une silice nanométrique amorphe.

Mots-clés : silice nanométrique, sable saharien, Tamarix articulata, méthode verte, GreenSilica.