



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة
قسم الكيمياء

مذكرة مقدمة ضمن استكمال متطلبات نيل شهادة ماستر أكاديمي
في الكيمياء.

التخصص: كيمياء مواد

من إعداد الطالبتين: راجي دلال _ جديعي سمية

بـعـنـوان

تصنيع وتوصيف مادة السيليكا جل من رمل الكثبان
Manufacturing and Characterization of Silica
Gel from Dune Sand

نوقشت علنا يوم: 2026/06/08

أمام لجنة المناقشة

رئيسا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر أ	بن علي مصطفى
ممتحنا	جامعة ورقلة	أستاذ	بن منين عبد القادر
ممثل للحاضنة	جامعة ورقلة	أستاذ	بن مبروك لزهر
مقرا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر أ	علاوي عبد الفتاح
مدعوة	جامعة ورقلة	طالبة دكتوراه	بن حدة إيمان هناء
شريك اقتصادي	جامعة ورقلة	طالبة دكتوراه	وزاني مروة

السنة الجامعية: 2026 / 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الاهداء

بسم الله الرحمن الرحيم، والحمد لله الذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل، والصلاة والسلام على سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

أهدي ثمرة جهدي وتعب سنواتٍ طويلةٍ إلى من كانت دعواتها ترافقني في كل خطوة، إلى القلب الحنون والنور الذي أضاء دربي، إلى من منحني الحب والحنان دون مقابل، أُمي الغالية حفظها الله وأطال في عمرها.

وإلى من كان سندي وفخري وقدوتي في الحياة، إلى من علّمني معنى الصبر والاجتهاد وتحمل الصعاب، إلى أبي العزيز الذي لم يبخل عليّ يوماً بدعمه وتشجيعه، أطال الله عمره وأدامه تاجاً فوق رأسي.

إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء، الذين كانوا مصدر قوة وفرح وسند دائم لي، وإلى كل أفراد عائلتي الكريمة الذين أحاطوني بالمحبة والدعم طوال مسيرتي الدراسية.

إلى أساتذتي الأفاضل، الذين أناروا لي طريق العلم والمعرفة، وكان لتوجيهاتهم ونصائحهم الأثر الكبير في إنجاز هذا العمل، فلکم مني كل الاحترام والتقدير والعرفان.

إلى زملائي وأصدقائي الذين شاركوني أجمل اللحظات وأصعبها، وكانوا خير رفقة خلال سنوات الدراسة.

إلى كل من ساعدني ولو بكلمة طيبة أو دعوة صادقة، وإلى كل من حمل لهم قلبي المحبة والوفاء. أهدى هذا العمل المتواضع، راجيةً من الله عز وجل أن يجعله بداية طريق مليء بالنجاح والتوفيق، وأن ينفع به كل طالب علم وباحث معرفة.

راجي دلال

اهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى روح أبي الطاهرة رحمه الله وأسكنه فسيح جناته، راجيةً من الله عزّ وجلّ أن يجعل هذا الإنجاز صدقةً جاريةً في ميزان حسناته، وأن يرحمه رحمةً واسعةً ويجزيه عني خير الجزاء، فقد كان مصدر الأمان والقوة والسند، وستبقى ذكراه الطيبة محفورةً في قلبي ما حييت.

وإلى أمي الغالية، رمز الحنان والتضحية، التي كانت لي العون والصبر والدعم طوال مشواري الدراسي، والتي لم تبخل عليّ يومًا بدعائها وتشجيعها واهتمامها، فكان فضلها بعد الله عظيمًا في وصولي إلى هذه المرحلة، حفظها الله وأدامها نورًا في حياتي.

وإلى إخوتي وأفراد عائلتي الكريمة، الذين كانوا دائمًا إلى جانبي يساندونني ويمنحونني القوة والعزيمة لمواصلة الطريق رغم كل الصعوبات.

كما أهدي هذا العمل إلى أساتذتي الأفاضل الذين أناروا لي طريق العلم والمعرفة، وإلى كل من ساعدني ولو بكلمة طيبة أو دعوة صادقة، وإلى كل من ساندي وشجعتني ووقف إلى جانبي خلال فترة إنجاز هذه المذكرة.

أهدي ثمرة هذا الجهد بكل حب وامتنان، راجيةً من الله تعالى أن يوفقني لما فيه الخير والنجاح، وأن يجعل هذا العمل بدايةً لمسيرة مليئةً بالعطاء والتوفيق.

جديعي سمية

شكر و عرفان

الحمد لله أولاً وأخراً على نعمه التي لا تُحصى، وعلى توفيقه لنا لإتمام هذا العمل المتواضع، فله سبحانه كل الحمد والشكر على ما أنعم به علينا من صبر وعون وتوفيق طوال مشوارنا الدراسي. ثم نتوجه بأسمى عبارات الشكر والتقدير والاحترام إلى مشرفنا الأستاذ الدكتور

علاوي عبد الفتاح

على كل ما قدمه لنا من نصائح قيمة وتوجيهات علمية سديدة، وعلى دعمه المستمر ومتابعته الدقيقة لنا طوال فترة إنجاز هذا البحث، فكان خير موجّه وخير سند، فجزاه الله عنا كل خير. كما نتقدم بخالص الشكر والامتنان إلى الأساتذة الأفاضل:

عبد القادر بن منين وبن علي مصطفى

لتفضلهم بقبول مناقشة هذه المذكرة، وعلى ما سيقدمونه من ملاحظات وتوجيهات قيمة تثري هذا العمل وتزيده قيمة علمية. ولا يفوتنا أن نتقدم بشكر خاص و عرفان كبير إلى الأستاذتين:

وزاني مروة وبن حدة ايمان

على مساعدتها القيّمة، ومساندتها لنا، وعلى روح التعاون التي أبدتها معنا طوال فترة البحث. كما نتوجه بجزيل الشكر إلى أعضاء فريق البحث بمخبر الكيمياء بجامعة قاصدي مرباح ورقلة وإلى طاقم مخبر الأشغال العمومية، على كل التسهيلات والدعم الذي قدموه لنا، والذي كان له دور كبير في إنجاز هذا العمل في أحسن الظروف. وفي الأخير، نتقدم بالشكر إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في مساعدتنا ودعمنا وتشجيعنا خلال مراحل إعداد هذه المذكرة، سائلين الله تعالى التوفيق والسداد للجميع.

قائمة الجداول

الرقم	العنوان	الصفحة
1.أ	الخواص الفيزيوكيميائية للمعادن الأساسية للرمل	7
2.أ	ألوان الرمل وفقا للمعدن المكون له	10
3.أ	الخصائص الفيزيائية لسيليكاجل	25
1.أ	المواد المستخدمة ودرجة نقاوتها والشركة المنتجة	41
2.أ	تقسيم مجالات الأشعة تحت الحمراء (FTIR)	52
1.أ	التركيب العنصري لرمل الطيبات	61
2.أ	التركيب العنصري لسيليكاجل الطيبات	63
3.أ	التركيب العنصري لرمل ورقلة	66
4.أ	التركيب العنصري لسيليكاجل ورقلة	68

قائمة الاشكال

الرقم	الشكل	الصفحة
1.ا	صورة للمناخل المستخدمة في تحديد البعد الحبيبي	8
2.ا	التصنيف الحبيبي للرمل	9
3.ا	تحليل سطح عينات من الرمل مختلفة الألوان باستخدام تقنية EDS	10
4.ا	تشكيل الكثبان الرملية	13
5.ا	صورة لأشكال الكثبان الرملية	14
6.ا	توزيع الرمل في الجزائر	16
7.ا	الكوارتز، أحد الأنواع البلورية الرئيسية للسيليكا	18
8.ا	السيليكا جل	19
9.ا	البنية البنائية الأساسية لسيليكا جل	20
10.ا	الشبكة ثلاثية الابعاد غير المتبلورة لسيليكا جل	20
11.ا	البنية المسامية لسيليكا جل	21
12.ا	مجموعة السيلانول على سطح السيليكا جل	21
13.ا	أنواع مجموعات السيلانول على سطح السيليكا جل	21
1.ا	صورة توضيحية للمواقع الجغرافية	42
2.ا	صورة توضيحية لجهاز الميزان الكتروني حساس	43
3.ا	صورة توضيحية لجهاز الرج المغناطيسي	43
4.ا	صورة توضيحية لجهاز المجفف الكهربائي	44
5.ا	صورة توضيحية لجهاز التجفيف الزجاجي	44
6.ا	صورة توضيحية لجهاز المجهر الالكتروني الماسح SEM	45
7.ا	صورة توضيحية لجهاز الاشعة الحمراء FTIR	46

47	مخطط تحضير السيليكا جل من الرمل بطريقة الصول-جل	8.ii
51	رسم تخطيطي لجهاز المجهر الالكتروني الماسح	9.ii
53	رسم تخطيطي لجهاز مطيافية الاشعة ما تحت الحمراء لتحليل فورييه (FTIR)	10.ii
55	مخطط يوضح مبدأ حيود الأشعة السينية وقانون براغ	11.ii
58	منحنى تسجيل لتصنيف الحبيبي لعينة رمل الطيبات	1.iii
59	تسجيل التصنيف الحبيبي لرمل ورقلة	2.iii
60	صورة SEM لرمل الطيبات	3.iii
61	طيف EDX لرمل الطيبات	4.iii
62	صورة SEM لسيليكا جل الطيبات	5.iii
63	طيف EDX لسيليكا جل الطيبات	6.iii
65	صورة SEM لعينة رمل ورقلة	7.iii
65	طيف EDX لرمل ورقلة	8.iii
67	صورة SEM لسيليكا جل ورقلة	9.iii
67	طيف EDX لسيليكا جل ورقلة	10.iii
70	طيف تحليل FTIR لعينة السيليكا جل المستخرجة من الرمل ورقلة	11.iii
71	طيف تحليل FTIR لعينة السيليكا جل المستخرجة من الرمل طيبات	12.iii
72	طيف XRD لسيليكا جل ورقلة	13.iii
72	طيف XRD لسيليكا جل طيبات	14.iii

قائمة الرموز

الصفحة	المدلول	الرمز
7	غرام لكل مول (وحدة قياس الكتلة المولية)	g /mol
7	سنتيمتر مكعب (وحدة قياس الحجم المولي)	cm ³
7	غرام لكل سنتيمتر مكعب (وحدة قياس الكثافة)	g /cm ³
7	درجة مئوية (وحدة قياس درجة الانصهار والحرارة)	°C
52	ميكروميتر (وحدة قياس الطول الموجي أو حجم الحبيبات)	μm
52	مقلوب السنتيمتر (وحدة قياس العدد الموجي في مطيافية الأشعة تحت الحمراء).	cm ⁻¹
25	متر مربع لكل غرام (وحدة المساحة السطحية النوعية)	m ² /g
25	مليمتر (وحدة قياس الطول)	mm
25	نانومتر (وحدة قياس الطول)	nm
7	أوم متر (وحدة المقاومة النوعية الكهربائية)	Ωm
54	حيود الأشعة السينية	XRD
51	مطيافية الأشعة تحت الحمراء	FTIR
48	المجهر الإلكتروني الماسح	SEM
48	التحليل الطيفي لتشتت الطاقة	EDX
22	قياس المساحة السطحية	BET
29	التحليل بالأشعة السينية الفلورية	XRF
27	الأس الهيدروجيني	pH
27	نقطة انعدام الشحنة	PZC
20	الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية	IUPAC

الفهرس

ص	المحتوى
II	الإهداء
IV	شكر وعرافان
V	قائمة الجداول
VI	قائمة الأشكال
VII	قائمة الرموز
IX	الفهرس
1	المقدمة العامة
4	المراجع
الفصل الأول: عموميات ودراسات سابقة	
6	المقدمة
6	1.الرمل
6	1.1. تعريف الرمل
6	2.1. مكونات الأساسية للرمل
8	3.1. الخصائص الفيزيائية للرمل
11	4.1. الخصائص الكيميائية للرمل
12	5.1. تعريف الكثبان الرملية
12	6.1. تشكيل الكثبان الرملية
13	7.1. أشكال الكثبان الرملية
15	8.1. توزيع الكثبان الرملية في الجزائر
16	9.1. تطبيقات الرمل
17	11. السيليكا
17	11.1. تعريف السيليكا
18	11.2. تعريف السيليكا جل
19	11.3. بنية السيليكا جل
19	11.3.1. التركيب الكيميائي والبنية الأساسية
20	11.3.2. الطبيعة غير المتبلورة (Amorphous Structure)
20	11.3.3. البنية المسامية (Porous Structure)
21	11.3.4. مجموعات السطح (Silanol Groups)
22	11.3.5. المساحة السطحية العالية
22	11.4. أنواع السيليكا جل
22	11.4.1. التصنيف حسب حجم المسام
23	11.4.2. التصنيف حسب الشكل الفيزيائي

23	3.4.ii. التصنيف حسب الوظيفة
24	4.4.ii. التصنيف حسب التعديل الكيميائي
24	5.4.ii. الأنواع المتقدمة
25	5.ii. خصائص السيليكا جل
25	1.5.ii. الخصائص الفيزيائية
26	2.5.ii. الخصائص الكيميائية
29	iii. الدراسات السابقة
33	المراجع
الفصل الثاني: الأجهزة والأدوات والتقنيات المستعملة في التحليل	
41	مقدمة
41	iv. المواد والتجهيزات و التقنيات المستعملة
41	1.iv. المواد
42	2.iv. الأجهزة المستعملة
42	1.2.iv. الأجهزة المخبرية
42	1. ميزان الكتروني حساس
43	2. جهاز الرج المغناطيسي
44	3. مجفف كهربائي
44	4. مجفف زجاجي
45	2.2.iv. أجهزة التوصيف
45	1. جهاز المجهر الإلكتروني الماسح SEM
45	2. جهاز حيود الأشعة تحت الحمراء (FTIR)
46	v. طريقة تحضير سيليكا جل
47	vi. التقنيات المستعملة في تحليل العينات
47	1.vi. المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)
48	1.1.vi. التحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX)
49	2.1.vi. مبدأ عمل الجهاز
50	3.1.vi. مكونات الجهاز
51	2.vi. مطيافية الأشعة ما تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)
52	1.2.vi. مبدأ عمل تقنية FTIR
53	2.2.vi. مكونات جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)
54	3.vi. مطيافية انعراج الأشعة السينية (XRD)
54	1.3.vi. مبدأ عمل تقنية XRD
57	المراجع

الفصل الثالث: تفسير ومناقشة النتائج	
59	مقدمة
59	VII. نتائج التحليل
59	1.VII. نتائج تحليل حجم الحبيبات (التصنيف الحبيبي)
60	2.VII. نتائج المجهر الالكتروني الماسح (SEM)
61	1.2.VII. نتائج SEM-EDX لعينة رمل الطيبات
63	2.2.VII. نتائج SEM-EDX لعينة سيليكاجل الطيبات
65	3.2.VII. نتائج SEM-EDX لعينة رمل ورقلة
67	4.2.VII. نتائج SEM-EDX لعينة سيليكاجل ورقلة
70	3.VII. نتائج مطيافية الأشعة تحت حمراء بتحويل فورييه FTIR
70	1.3.VII. نتائج FTIR لسيليكاجل لرملة ورقلة
71	2.3.VII. نتائج FTIR لسيليكاجل لرملة طيبات
72	4.VII. نتائج حيود الأشعة السينية XRD
73	المراجع
75	75 خلاصة عامة وآفاق مستقبلية
77	الملخص

المقدمة العامة

المقدمة العامة

تُعدّ الرطوبة من أكثر العوامل تأثيراً على جودة وسلامة العديد من المنتجات الصناعية والغذائية والدوائية، إذ تؤدي إلى تدهور الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد، وتسريع عمليات التلف، ونمو الكائنات الدقيقة، إضافة إلى تأثيرها السلبي على عمليات التخزين والنقل. لذلك، برزت الحاجة إلى استخدام مواد التجفيف (Desiccants) كحل فعال للتحكم في الرطوبة والحفاظ على استقرار المنتجات، حيث تُستخدم هذه المواد على نطاق واسع في التعبئة والتغليف، والإلكترونيات، والصناعات الدوائية والغذائية [1].

تتنوع مواد التجفيف المتاحة تجارياً، مثل الألومينا النشطة، وكلوريد الكالسيوم، والزيوليت، غير أن السيليكا جل (Silica Gel) تُعد من أكثرها استخداماً وانتشاراً، نظراً لما تتميز به من خصائص فريدة، أهمها قدرتها العالية على الامتزاز، واستقرارها الكيميائي، وعدم سميتها، إضافة إلى إمكانية إعادة استخدامها بعد التجفيف [2]. كما تمتاز ببنية مسامية متطورة ومساحة سطحية كبيرة، مما يمنحها كفاءة عالية في امتصاص بخار الماء مقارنة بالعديد من المواد الأخرى [3].

وعلى الصعيد الاقتصادي، يشهد سوق مواد التجفيف، خاصة السيليكا جل، نمواً ملحوظاً على المستوى العالمي، مدفوعاً بتزايد الطلب في قطاعات متعددة مثل الصناعات الدوائية والإلكترونية والتغليف، وهو ما يعكس الأهمية الاقتصادية لهذه المادة وإمكانية الاستثمار فيها ضمن مشاريع صناعية ناشئة [4].

رغم الأهمية المتزايدة لمواد التجفيف، وعلى رأسها السيليكا جل، والطلب المتنامي عليها في مختلف المجالات الصناعية، إلا أن الاعتماد الكبير على استيرادها يطرح إشكالات اقتصادية، خاصة في الدول التي تتوفر على موارد طبيعية غنية غير مستغلة مثل رمال الكثبان. ومن هذا المنطلق، يُطرح تساؤل محوري مفاده: إلى أي مدى يمكن استغلال هذه الموارد المحلية في تصنيع السيليكا جل باستخدام طريقة الصول-جل، مع تحقيق خصائص بنيوية وسطحية تضمن كفاءتها كمادة تجفيف وقابليتها للتسويق؟

في المقابل، تُظهر المعطيات العلمية والتجارب التطبيقية أن طريقة الصول-جل تتيح تحكماً دقيقاً في البنية المسامية والمساحة السطحية للسيليكا جل، وهو ما يسمح بالحصول على مادة ذات قدرة امتزاز عالية. كما أن رمال الكثبان تُعد مصدراً مناسباً وغنياً بثاني أكسيد السيليكون، مما يجعل من عملية التصنيع المحلي خياراً قابلاً للتحقيق تقنياً ومجدياً اقتصادياً، مع إمكانية إنتاج مادة فعّالة تلبي متطلبات السوق وتدعم إنشاء مشاريع صناعية ناشئة قائمة على تهمين الموارد الطبيعية. [5][6]

قُسمت هذه المذكرة إلى ثلاثة فصول رئيسية إضافة إلى خلاصة عامة، وذلك كما يلي:

يتناول الفصل الأول: ****عموميات والدراسات السابقة****، حيث تم التطرق إلى الرمل والكثبان الرملية والسليكا والسيليكا جل، مع عرض أهم الخصائص والدراسات السابقة المرتبطة بموضوع البحث.

أما الفصل الثاني: ****الأجهزة والأدوات والتقنيات المستعملة في التحليل****، فقد خُصص لعرض مختلف الأجهزة والأدوات المستعملة، إضافة إلى طريقة العمل والتقنيات التحليلية المعتمدة في الدراسة.

في حين خُصص الفصل الثالث: ****الجزء التطبيقي ومناقشة النتائج****، لعرض النتائج المتحصل عليها وتحليلها ومناقشتها اعتماداً على التقنيات المستعملة.

وفي الأخير، اختتمت المذكرة بخلاصة عامة تضمنت أهم النتائج والاستنتاجات المتوصل إليها من خلال هذه الدراسة.

المراجع:

- 1-Allied Market Research. (2022). Desiccant market by type and application: Global opportunity analysis and industry forecast.
- 2-Iler, R. K. (1979). The surface chemistry of silica. The chemistry of silica.
- 3-Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical engineering journal, 156(1), 2-10.
- 4-Allied Market Research. (2023). Desiccant market size to reach 1.8 billion by 2032.
- 5-Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). Sol-gel science : the physics and chemistry of sol-gel processing. Gulf Professional Publishing.
- 6-Hench, L. L., & West, J. K. (1990). The sol-gel process. Chemical reviews, 90(1), 33-72.

الفصل الأول

عموميات ودراسات سابقة

مقدمة

تعد الرمال من أبرز السمات الجغرافية التي تميز التضاريس، خاصة في المناطق الصحراوية الواسعة التي تشغل مساحات شاسعة من القارة الإفريقية. وفي الجزائر، تظهر هذه الطبيعة بوضوح من خلال الكثبان الرملية التي تمثل مورداً طبيعياً متجدداً وهاماً، حيث لا تقتصر الصحراء في حقيقتها على كونها مجرد تجمعات رملية ناتجة عن عوامل التعرية، بل هي نظام بيئي معقد يضم سلاسل جبلية وهضاباً صخرية تتداخل مع الكثبان الرملية لتشكل تنوعاً جغرافياً. وتكتسب هذه الرمال قيمتها الإستراتيجية الكبرى من خلال محتواها المعدني، وبالأخص مادة "السيليكا" (SiO_2) أو ما يعرف بالكوارتز، والتي تعتبر المكون الأساسي لمعظم أنواع الرمال.

1.1. تعريف الرمل

الرمل هو مادة رسوبية طبيعية تتكون من حبيبات صلبة يتراوح حجمها غالباً بين 0.0625 و 2 ملم [1]، تتميز بكونها مفككة كيميائياً وميكانيكياً، وتعمل كمنظومة مسامية تسمح بمرور السوائل وتتحرك في الطبيعة تحت تأثير قوى الرياح والمياه. [2]

2.1. المكونات الأساسية للرمل

يتكوّن الرمل أساساً من ثاني أكسيد السيليكون SiO_2 ، الذي يوجد غالباً على شكل معدن الكوارتز، ويُعدّ المكوّن الرئيسي لحبيبات الرمل في معظم البيئات الطبيعية. الجبس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) و كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) كما قد يحتوي على نسب متفاوتة من أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) إضافةً أكسيد الحديد (Fe_2O_3) وكمية قليلة من الشوائب مثل المعادن الثقيلة [3]. يستعرض الجدول التالي اهم الخصائص الفيزيوكيميائية لمكونات الرمل الأساسية.

الجدول (1.1): خواص الفيزيوكيميائية للمعادن الأساسية للرمل [4][5]

الخاصية	الكوارتز	الجبس	الكالسيت
الصيغة الكيميائية	SiO ₂	CaSO ₄ · 2H ₂ O	CaCO ₃
الكتلة المولية (g/mol)	60,085	172,173	100,089
الحجم المولي cm ³	22,688	74,440	36,9257
قابلية الذوبان	غير قابل	في الأحماض المختلفة	في حمض HCL مع التسخين
الكثافة (g/cm ³)	2,648	2,313	2,7106
اللون	شفاف، وردي، اسود	ابيض، شفاف، اسود اصفر، اخضر	ابيض
البريق	زجاجي شمعي	زجاجي الى حريري لؤلؤي او شمعي	زجاجي الى لؤلؤي
الشفافية	شفاف الى معتم تقريبا	شفاف الى نصف شفاف	شفاف الى نصف شفاف
المقاومة الكهربائية (Ωm)	2. 10 ¹⁶ – 4. 10 ¹²	2. 10 ¹²	1,21. 10 ¹⁴
درجة الانصهار (°C)	1713_1703	-	-

3.1. الخصائص الفيزيائية للرمل

تتميز رمال الكثبان بمجموعة من الخصائص الفيزيائية الفريدة التي تؤثر على حركتها واستقرارها. يمكن تلخيص هذه الخصائص فيما يلي:

■ قياس الحبات

تتراوح اقطار حبيبات الرمل بين 0,063 ملم و 2,0 ملم. يتم تصنيفها باستخدام المناخل توضع فوق بعضها البعض مندرجة الفتحات من 2 ملم إلى ما دون ذلك كما موضح في الشكل (1.1.1) لغايات زراعية او جيولوجية ويصنف الرمل حسب ابعاده إلى:

- الحصى (Gravel): أكبر من 2ملم
- الرمل (Sand): بين 0,063 و 2ملم
- الطمي (Silt): بين 0,002ملم و 0,063ملم
- الطين (Clay): اقل من 0,002ملم



الشكل (1.1): صورة للمناخل المستخدمة في تحديد البعد الحبيبي

■ شكل حبيبات الرمل

يتم التعبير عنه من خلال درجتين:

أ- التكور (Sphericity): مدى اقتراب شكل الحبيبة من الكرة

ب- التدوير (Roundness): مدى اختفاء زوايا وأركان الحبيبة (حادة، مستديرة.....

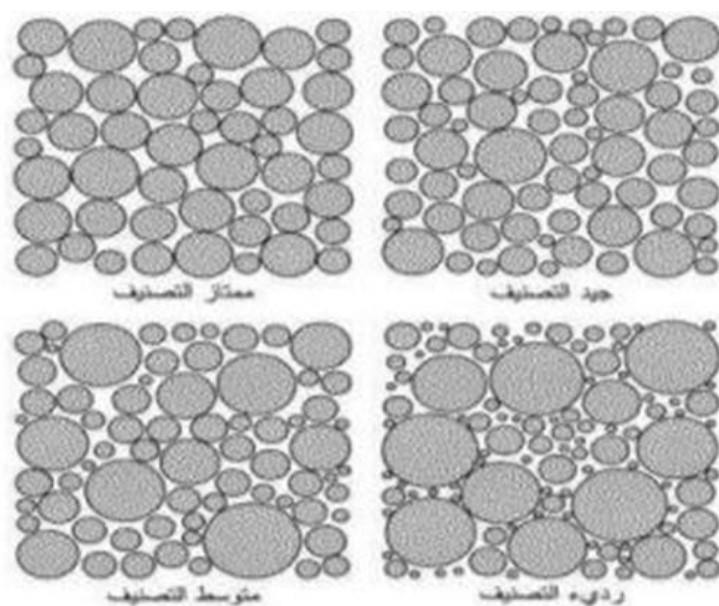
الخ)

■ التصنيف الحبيبي

يقصد به تجانس احجام الحبيبات داخل المجموعة ويصنف الرمل الشكل (1-2) الى

[5]:

- جيد التصنيف: وتكون حبيباته متقاربة في الحجم
- رديء التصنيف: عبارة على خليط من احجام مختلفة.



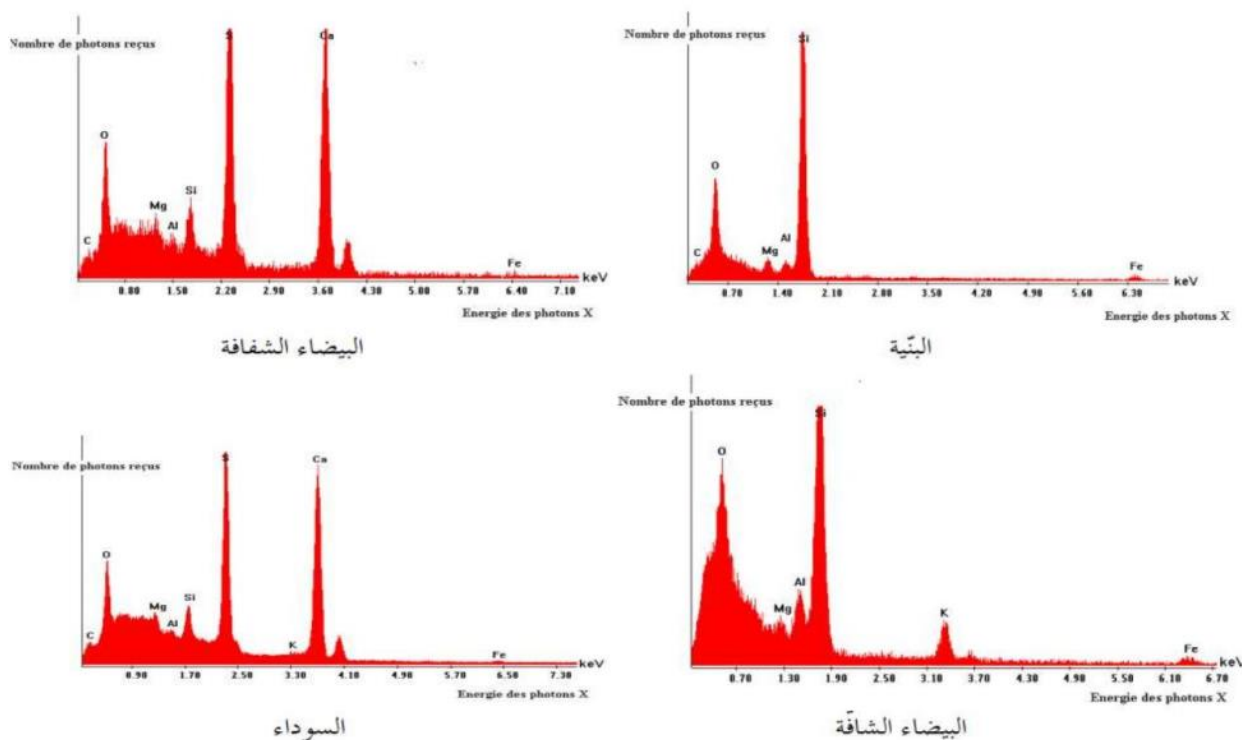
الشكل (2.1): التصنيف الحبيبي للرمل [5]

■ ألوان الرمل:

يمكن للرمال ان تأخذ ألوانا مختلفة بناءا على المواد المكونة لها حيث يوضح الجدول (2.1) ألوان الرمل وفقا للمعدن المكون له [6]

المعدن	اللون
تحتوي على كالسيوم وكبريت	الأبيض /شفاف
وجود أكاسيد الحديد مثل Fe_2O_3	البنّي /احمر
غالبا ما تكون غنية بالسيليكون والاكسجين والبوتاسيوم	الرمادي /اسود

كما يوضح الشكل (3. ا. 3): تحليل سطح عينات من الرمل مختلفة الألوان باستخدام تقنية EDS وفقا لدراسة سابقة [18]



الشكل (3.ا. 3): تحليل سطح عينات من الرمل مختلفة الألوان باستخدام تقنية EDS

4.1. الخصائص الكيميائية للرمل

تعتبر الخصائص الكيميائية للرمل من المحددات الأساسية التي توضح مدى ملاءمته للاستخدامات الصناعية والانشائية حيث تدرس كيمياء الرمل الخواص الكيميائية للمكونات المعدنية والعضوية ومدى تأثير الرمل بهذه الخصائص.

• المكونات المعدنية (Metallic components)

ينقسم الرمل من حيث تكوينه المعدني إلى نوعين رئيسيين:

- المعادن الأولية: وهي المعادن الناتجة مباشرة من التحطم الفيزيائي للصخور الأصلية ومن أشهرها الكوارتز SiO_2 والفلسبار $AlSi_3O_8$
- المعادن الثانوية: وهي ناتجة عن التجوية الكيميائية (التحول الكيميائي) للمعادن الأولية، وتلعب دوراً هاماً في التفاعلات الكيميائية داخل التربة وتشمل: السيليكات: ومن أهمها معادن الطين.

الكربونات: مثل الكالسيت $(CaCO_3)$ والدولوميت $(CaMg (CO_3)_2)$.

الكبريتات: أهمها الجبس.

الأكاسيد: مثل أكاسيد الحديد FeO و Fe_2O_3 وأكاسيد الألمنيوم Al_2O_3

• المكونات العضوية (organic ingredients)

تتكون من بقايا الكائنات الحية التي تتحلل بفعل الكائنات الدقيقة لتتحول إلى مركبات معقدة تُعرف بـ الدبال (Humus). ينقسم الدبال في الرمل إلى:

- حامض الهيوميك.

- حامض الفولفيك.

- مادة الهيومين [7]

5.1. تعريف الكثبان الرملية

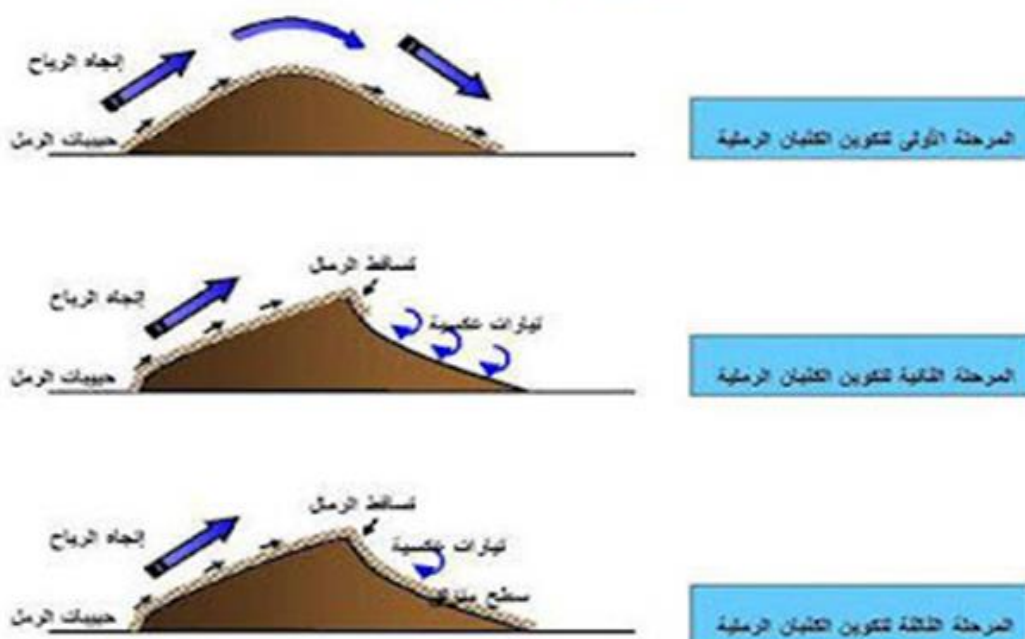
كثبان الرملية (جمع كثيب) هي كومات أو تلال من الرمل السائب والرواسب الدقيقة التي تتشكل بفعل الرياح، وتتخذ أشكالاً متنوعة تتفاوت أحجامها بشكل كبير، حيث يتراوح طولها من بضعة أمتار إلى عدة مئات من الكيلومترات، بينما يبدأ عرضها من متر واحد ليصل إلى عدة كيلومترات. [8][9]

6.1. تشكيل الكثبان الرملية

- تنشأ الكثبان الرملية من تآكل الصخور بعوامل طبيعية؛ الرياح أو المياه تحمل الحبيبات إلى البحار، الشواطئ، أو الأراضي المسطحة.
- تحرك الرمال: تستمر في الحركة حتى تواجه عقبة صغيرة، فتتوقف وتتراكم.
- تستقر الحبوب الأثقل أولاً عند العائق (تشكل سلسلة صغيرة)؛ الأخف تتساقط خلفه بسبب كسر قوة الرياح.
- يرتفع الجانب المواجه للريح إلى الذروة، بينما تنزلق الحبيبات الأخف إلى الجانب الآخر؛ يصبح الكثيب عقبة جديدة وينمو حسب سرعة/اتجاه الرياح وكثافة الرمال، متخذاً أشكالاً متنوعة.
- الرياح تحرك الرمال إلى الأعلى، مما يجعل الانحدار شديداً؛ تنهار الكومة بثقلها نحو الجانب الزلق حتى تصل إلى زاوية الاسترخاء (30-34 درجة) للثبات. [10]

الشكل الرقم (٨٧)

تكوين الكثبان الرملية



الشكل (4.1): تشكيل الكثبان الرملية [11]

7.1. اشكال الكثبان الرملية

أ- الكثبان المستعرضة (العرضية):

هي عبارة عن سلاسل أو حواجز رملية طويلة تتشكل عندما تندمج الكثبان الهلالية مع بعضها البعض. تظهر بوضوح عندما يتغير اتجاه الرياح وتبدأ بنقل كميات ضخمة من الرمال المتراكمة.

ب- الكثبان الهلالية (البرخان):

تأخذ شكل الهلال، حيث يكون جانبها المواجه للرياح محدباً والجانب الآخر مقعراً. تندفع أطرافها (قرونها) نحو الاتجاه الذي تهب إليه الرياح، وهي من أكثر الأنواع شيوعاً.

ت- الكثبان الطولية (السيوف):

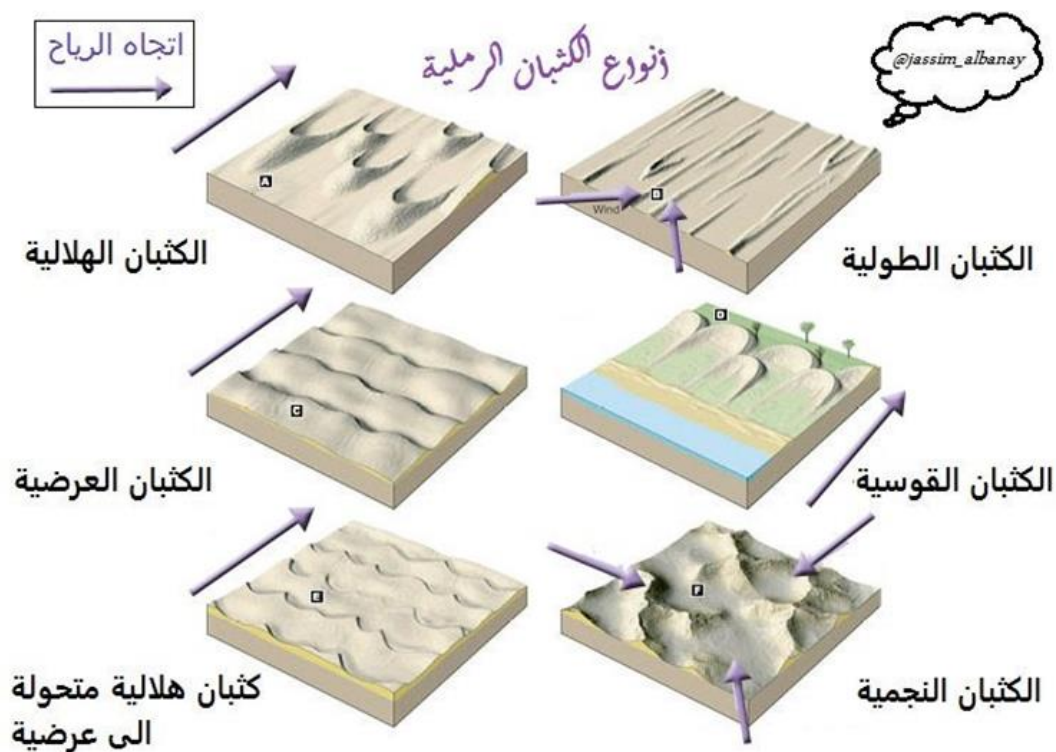
هي تلال رملية مستطيلة تمتد بشكل مواز لاتجاه الرياح. تتكون غالباً عندما ينمو أحد أذرع الكثيب الهلالي ويزداد طولاً بسبب تأثير رياح تهب من اتجاهين (رياح ثابتة ورياح جانبية)، ليكون شكلها النهائي نتاجاً لهما. [12]

ث- النباك (الكثبان النباتية):

تنشأ هذه الكثبان عندما تصطدم الرياح المحملة بالرمال بعوائق نباتية (مثل شجيرات العرفج أو الطرطيع). تعمل هذه النباتات كمصدات طبيعية، مما يؤدي لتبطئ سرعة الرياح وترسيب الرمال حولها لتشكل أكواماً رملية صغيرة. [13]

ج- كثبان الهرمية (النجمية)

هي تلال رملية ضخمة تتميز بقمة مركزية شاهقة تتفرع منها عدة أوجه منحدره، مما يعطيها شكلاً يشبه "النجمة". ينشأ هذا النوع نتيجة تلاقي رياح قوية تهب من اتجاهات متعددة ومتغيرة. [12]



الشكل (5.1): صورة لأشكال الكثبان الرملية [14]

8.1. توزيع الرمال في الجزائر

- تُشكل الكثبان الرملية حوالي 18%. من إجمالي مساحة الصحراء الإفريقية الكبرى. وتحتضن الجزائر جزءاً حيوياً من هذه الصحراء، حيث تغطي الأراضي الصحراوية ما يقارب 80% من المساحة الكلية للبلاد (أي حوالي 2.4 مليون كيلومتر مربع) [15]، حيث تتوزع الرمال في الجزائر على شكل عروق وهي:
- العرق الغربي الكبير: يقع في شمال الصحراء الجزائرية بمساحة 100,000 كم². يتميز بكثبان رملية ضخمة يصل ارتفاعها إلى 120 متراً.
- العرق الشرقي الكبير: هو أكبر تجمع رملي في الجزائر، ويأتي العرق الغربي في المرتبة الثانية بعده من حيث المساحة. [16]



الشكل (6.1): توزيع الرمل في الجزائر [17]

9.1. تطبيقات الرمل

يستخدم الرمل في العديد من المجالات وهي كما يلي:

1. قطاع البناء والتشييد:

يُعد الرمل المادة الخام الرئيسية التي تُبنى منها المدن الحديثة، حيث يدخل في:

الخرسانة: تُستخدم في تشييد مراكز التسوق، المكاتب، والمباني السكنية.

الأسفلت: يُستخدم الرمل لربط الحصى وبناء الطرق التي تربط المدن ببعضها.

2. صناعة الزجاج والإلكترونيات

لا يقتصر الرمل على البناء الخشن، بل يدخل في أدق تفاصيل التكنولوجيا:

الزجاج: صناعة النوافذ والزجاج الأمامي للسيارات.

الشاشات والأجهزة: شاشات الهواتف الذكية المصنوعة من الرمل المذاب.

الرقائق السيليكونية: يدخل في تصنيع المكونات الدقيقة (المعالجات) داخل الهواتف وأجهزة الكمبيوتر.

المعدات الإلكترونية: يدخل الرمل في تركيب كل قطعة إلكترونية تقريباً في المنزل.

3. الصناعات التحويلية (الرُّكام)

يُستهلك الرمل عالمياً كجزء مما يُعرف بـ "الرُّكام" (مزيج من الرمل والحصى)، حيث يستخدم البشر نحو 50 مليار طن سنوياً من هذه المادة لتلبية احتياجات التوسع العمراني. [20]

المقاومة الفيزيائية والكيميائية: تظهر الرمال الكوارتزمية مقاومة عالية للتحويلات التي قد تؤدي إلى فقدان المسامية، مما يحافظ على كفاءتها كخزانات هيدروكربونية. [7][19]

II . السيليكا

1.1. تعريف السيليكا: تُعد السيليكا (Silice) (ثاني أكسيد السيليكون SiO_2) من أهم المركبات غير العضوية وأكثرها انتشاراً في القشرة الأرضية، حيث تتكوّن من اتحاد عنصر السيليكون مع الأكسجين في بنية تساهمية قوية ثلاثية الأبعاد. وتُشكل السيليكا نسبة كبيرة من تركيب الصخور والمعادن، خاصة في الرمال والصخور الرسوبية، حيث يكون معدن الكوارتز الشكل الأكثر شيوعاً لها. [21]

وجد السيليكا في الطبيعة في عدة أشكال بنيوية تُعرف بتعدد الأشكال (Polymorphism)، حيث تختلف في ترتيب الذرات داخل الشبكة البلورية مع احتفاظها بنفس التركيب الكيميائي. ومن أهم هذه الأشكال البلورية: الكوارتز، والتريديميت، والكريستوباليت، والتي تختلف فيما بينها من حيث الكثافة والاستقرار الحراري والبنية البلورية. بالإضافة إلى ذلك، توجد السيليكا

في شكل غير متبلور (Amorphous)، يتميز ببنية عشوائية غير منتظمة، كما هو الحال في السيليكا الزجاجية والسيليكا جل [22]. تتميز السيليكا بمجموعة من الخصائص الفيزيائية والكيميائية المهمة، من أبرزها الصلابة العالية، والاستقرار الحراري، والمقاومة الكيميائية، إضافة إلى كونها مادة عازلة للكهرباء. كما أن بنيتها المستقرة تجعلها مقاومة للتغيرات الفيزيائية والكيميائية في مختلف الظروف البيئية. [23]



الشكل (7.1): الكوارتز، أحد الأنواع البلورية الرئيسية للسيليكا [24]

2.11. تعريف السيليكا جل (Silica Gel): يُعد جل السيليكا مادة غير متفاعلة كيميائيًا وغير سامة، ويتكون من ثاني أكسيد السيليكون في حالته غير المتبلورة. يتميز ببنية داخلية مسامية تتكون من شبكة من المسام الدقيقة المتصلة، ما يمنحه مساحة سطح كبيرة تتراوح عادةً بين 700 و800 متر مربع لكل غرام. وبصيغة توضيحية، فإن المساحة السطحية الداخلية لكمية تعادل ملعقة صغيرة من جل السيليكا قد تقارب مساحة ملعب كرة قدم. تسمح هذه البنية الدقيقة بامتصاص جزيئات الماء أو إطلاقها إلى أن يتحقق التوازن بين ضغط بخار الماء والرطوبة النسبية للهواء المحيط.

تم تسجيل براءة اختراع جل السيليكا سنة 1919 لاستخدامه في امتصاص الأبخرة والغازات داخل أقنعة الغاز خلال الحرب العالمية الأولى. وفي فترة الحرب العالمية الثانية، توسع استخدامه بشكل كبير كعامل تجفيف لحماية المعدات العسكرية والمواد الصيدلانية، إلى جانب تطبيقات أخرى متعددة. ويُعتبر استعماله في ضبط الرطوبة النسبية ضمن مستويات متوسطة، بدلاً من الاكتفاء بدوره كمجفف، من الخصائص المميزة له خاصة في تطبيقات المتاحف. [25]



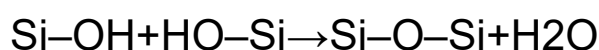
الشكل (8.1): السيليكا جل [24]

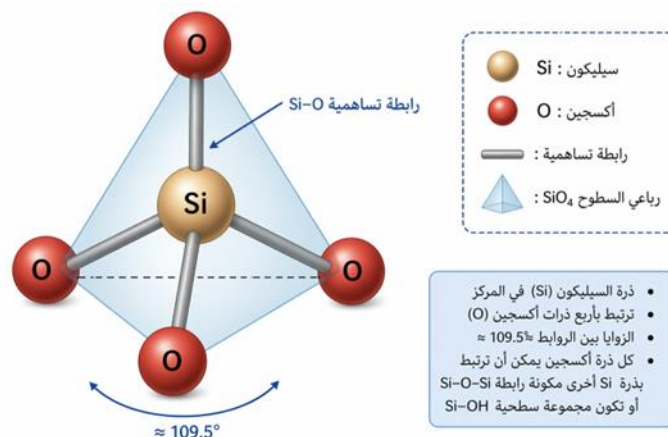
3.11. بنية السيليكا جل:

بنية جل السيليكا (Silica Gel) تُعد من أهم الجوانب التي تفسر خصائصه الامتزازية العالية.

1.3.11. التركيب الكيميائي والبنية الأساسية: جل السيليكا هو شكل غير متبلور (Amorphous) من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2)، يتكون من شبكة ثلاثية الأبعاد من وحدات رباعية السطوح SiO_4 ، حيث ترتبط ذرة السيليكون بأربع ذرات أكسجين عبر روابط تساهمية قوية (Si-O-Si) [26]، الشكل (9.1)

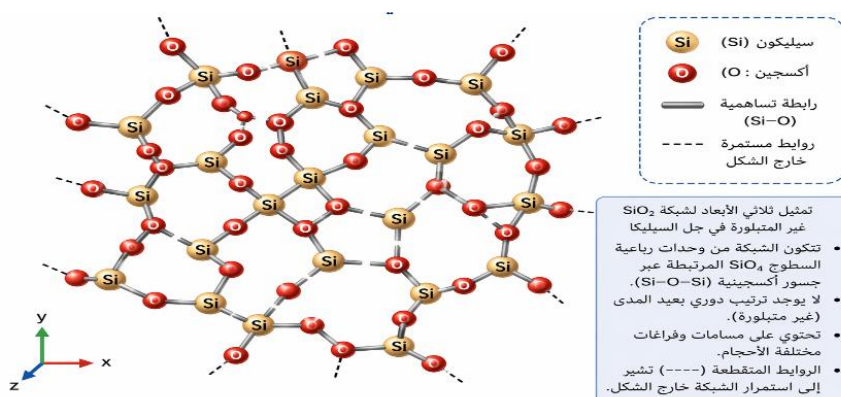
تتشكل هذه الشبكة نتيجة بلمرة حمض السيليك (H_4SiO_4) عبر تفاعلات التكاثف [27]:





الشكل (9.1): البنية البنائية الأساسية لسيليكا جل

2.3.11. الطبيعة غير المتبلورة (Amorphous Structure): يتميز جل السيليكا ببنية غير متبلورة، أي أنه لا يمتلك ترتيباً دورياً طويل المدى كما هو الحال في السيليكا البلورية مثل الكوارتز. هذا الاضطراب البنوي يؤدي إلى توزيع غير منتظم للروابط والمسافات بين الذرات (الشكل (10.1))، وهو ما يساهم بشكل مباشر في تكوين الفراغات الداخلية والمسافات داخل المادة. [28]



الشكل (10.1): الشبكة ثلاثية الأبعاد غير المتبلورة لسيليكا جل

3.3.11. البنية المسامية (Porous Structure): تُعد البنية المسامية من أهم خصائص جل السيليكا، حيث يحتوي على شبكة معقدة من المسام التي تختلف في الحجم والشكل (الشكل (11.1)). ووفقاً لـ تصنيف IUPAC للمسام، تُقسم المسامات إلى ميكروية (<2 نانومتر)، ومتوسطة (2-50 نانومتر)، وكبيرة (>50 نانومتر). غالباً ما يكون جل السيليكا من النوع متوسط المسامية (Mesoporous)، مما يمنحه مساحة سطحية كبيرة تجعله فعالاً في عمليات الامتزاز. [29]

5.3.ii. المساحة السطحية العالية: يتميز جل السيليكا بمساحة سطح داخلية كبيرة جدًا نتيجة لبنيته المسامية، حيث قد تصل إلى 800 متر مربع لكل غرام. يتم قياس هذه المساحة باستخدام طريقة BET، والتي تعتمد على امتزاز الغازات مثل النيتروجين على سطح المادة. هذه المساحة العالية هي العامل الرئيسي في كفاءة جل السيليكا في التطبيقات الصناعية. [31]

4.ii. أنواع السيليكا جل (Silica Gel Types)

تُعد السيليكا جل من المواد المسامية المهمة في الكيمياء التطبيقية والصناعات المختلفة، حيث تتميز ببنية غير متبلورة ومساحة سطحية عالية، مما يمنحها خصائص امتزاز فعالة. ونظرًا لتنوع خصائصها البنوية والكيميائية، تم تصنيفها إلى عدة أنواع وفق معايير تشمل حجم المسام، الشكل الفيزيائي، والخصائص السطحية والكيميائية [32]، [33]. ويساهم هذا التصنيف في اختيار النوع المناسب حسب طبيعة التطبيق الصناعي أو البحثي.

1.4.ii. التصنيف حسب حجم المسام:

يعتمد هذا التصنيف على توصيات IUPAC التي تُعد المرجع الأساسي في توصيف المواد المسامية.

السيليكا جل الميكرونية (Microporous Silica Gel)

تتميز السيليكا جل الميكرونية بامتلاكها مسامات يقل قطرها عن 2 نانومتر، وهو ما يمنحها مساحة سطحية عالية جدًا وقدرة كبيرة على امتزاز الجزيئات الصغيرة، خاصة الغازات. وتُستخدم هذه الأنواع في التطبيقات التي تتطلب انتقائية عالية في الامتزاز، مثل عمليات الفصل الدقيقة والتخزين الغازي، إلا أن صغر حجم المسام يحد من قدرتها على التعامل مع الجزيئات الكبيرة [33]، [34].

السيليكا جل الميزوبورية (Mesoporous Silica Gel)

تُعد السيليكا جل الميزوبورية الأكثر استخدامًا، حيث يتراوح قطر مساماتها بين 2 و50 نانومتر. وتوفر هذه البنية توازنًا مثاليًا بين المساحة السطحية وحجم المسام، مما يسمح بامتزاز فعال لمختلف الجزيئات. لذلك تُستخدم على نطاق واسع في التجفيف، الكروماتوغرافيا، والعمليات الصناعية المختلفة، كما تتميز بإمكانية إعادة تنشيطها بسهولة بعد الاستخدام [32]، [29].

السيليكا جل الماكرونية (Macroporous Silica Gel)

تمتلك السيليكا جل الماكرونية مسامات يزيد قطرها عن 50 نانومتر، مما يجعلها مناسبة لامتزاز الجزيئات الكبيرة مثل المركبات العضوية الثقيلة. وعلى الرغم من انخفاض مساحتها السطحية مقارنة بالأنواع الأخرى، إلا أنها تلعب دورًا مهمًا في التطبيقات الصناعية التي تتطلب معالجة مواد ذات أحجام جزيئية كبيرة [34].

2.4.11. التصنيف حسب الشكل الفيزيائي

السيليكا جل الحبيبية (Granular Silica Gel)

توجد السيليكا جل الحبيبية على شكل حبيبات غير منتظمة ذات سطح خشن، وتستخدم بشكل واسع في امتصاص الرطوبة داخل العبوات. وتتميز بسهولة تصنيعها وانخفاض تكلفتها، إلا أن مقاومتها الميكانيكية أقل مقارنة بالأنواع الكروية [34].

السيليكا جل الكروية (Spherical silica gel)

تتميز السيليكا جل الكروية بشكلها المنتظم، مما يمنحها خصائص ميكانيكية أفضل وتدفعًا أكثر انتظامًا للسوائل والغازات. لذلك تُستخدم بشكل رئيسي في الأعمدة الكروماتوغرافية والتطبيقات الصناعية التي تتطلب استقرارًا في الأداء [34].

السيليكا جل المسحوقة (Powdered Silica Gel)

تأخذ السيليكا جل المسحوقة شكل مسحوق ناعم يتميز بمساحة سطحية كبيرة جدًا، مما يعزز من سرعة الامتزاز والتفاعل. تُستخدم هذه الخاصية في التطبيقات المخبرية والتحفيزية، رغم أن استخدامها الصناعي محدود بسبب صعوبة التعامل معها [29].

3.4.11. التصنيف حسب الوظيفة

السيليكا جل العادية (Regular Silica Gel)

تمثل الشكل الأساسي غير المعدل من السيليكا جل، وتُستخدم أساسًا كمادة مجففة لامتصاص الرطوبة. وتُعد هذه الخاصية نتيجة مباشرة للبنية المسامية ووجود مجموعات السيلانول على السطح [32].

السيليكا جل المؤشرة (Indicating Silica Gel): تحتوي السيليكا جل المؤشرة على مركبات كيميائية تغير لونها عند امتصاص الرطوبة، مثل كلوريد الكوبالت، حيث يتحول اللون من الأزرق إلى الوردي. وتستخدم هذه الخاصية لمراقبة حالة التشبع، إلا أن بعض المؤشرات قد تكون سامة وتتطلب الحذر في الاستخدام [29].

السيليكا جل النشطة (Activated Silica Gel)

يتم تنشيط السيليكا جل حرارياً لإزالة الماء وزيادة عدد المواقع الفعالة، مما يؤدي إلى تحسين قدرتها على الامتزاز. وتستخدم هذه الأنواع في التطبيقات الصناعية التي تتطلب كفاءة عالية في إزالة الرطوبة أو الغازات [29].

4.4.4. التصنيف حسب التعديل الكيميائي

السيليكا جل المحبة للماء (Hydrophilic Silica Gel): تحتوي على مجموعات سيلانول (Si-OH) بكثرة، مما يجعلها مادة قطبية قادرة على امتصاص الماء بكفاءة عالية. وتستخدم في عمليات التجفيف والفصل الكيميائي [32].

السيليكا جل الكارهة للماء (Hydrophobic Silica Gel)

يتم تعديل سطحها لتقليل القطبية، مما يجعلها غير قادرة على امتصاص الماء بسهولة، لكنها فعالة في امتزاز المواد العضوية غير القطبية مثل الزيوت [29].

السيليكا جل المعدلة (Modified Silica Gel): يتم تعديل سطح السيليكا جل بإضافة مجموعات وظيفية عضوية، مما يسمح بتغيير خصائصها الكيميائية وتحسين انتقائيتها. وتستخدم هذه الأنواع في التطبيقات المتقدمة مثل التحفيز والفصل الانتقائي [29].

5.4.4. الأنواع المتقدمة

السيليكا جل النانوية (Nano Silica Gel)

تتميز بحجم جسيمات صغير جداً ومساحة سطحية كبيرة، مما يجعلها ذات نشاط كيميائي مرتفع. وتستخدم في مجالات متقدمة مثل توصيل الأدوية والتكنولوجيا النانوية [29].

السيليكا الميزوبورية المنظمة (Mesoporous silica)

تشمل مواد مثل MCM-41 و SBA-15، والتي تتميز ببنية مسامية منتظمة. ويؤدي هذا التنظيم إلى تحسين الأداء في التطبيقات المتقدمة مثل التحفيز وتخزين الأدوية [29].

5. II. خصائص السيليكا جل

1.5. II. الخصائص الفيزيائية:

ويمكن تلخيصها في الجدول (3.1): الخصائص الفيزيائية لسيليكا جل
الجدول (3.1): الخصائص الفيزيائية لسيليكا جل

المرجع	القيم/النطاق	الوصف	الخاصية الفيزيائية
[35]	SiO ₂	ثاني أكسيد السيليكون غير المتبلور (Amorphous SiO ₂)	التركيب الكيميائي
[36]	/	حببيبات صلبة أو خرز (Beads) أو مسحوق	الشكل الفيزيائي
[37]	/	عديم اللون أو أبيض (وقد يكون أزرق/برتقالي مع مؤشر)	اللون
[38]	-0.6 g/cm ³ 0.8	تعتمد على البنية المسامية	الكثافة الظاهرية
[39]	-600 m ² /g800	مساحة سطح عالية بسبب المسامية	المساحة السطحية النوعية
[40]	nm 50 – 2	يحدد نوع السيليكا جل (غالبًا ميزوبوري)	حجم المسام
[41]	mm 5 – 0.5	يختلف حسب الاستخدام	حجم الحبيبات
[35]	C° 1600 ≈	مرتفعة جدًا	درجة الانصهار
[35]	غير ذائب	غير قابل للذوبان	الذوبانية في الماء
[39]	عالية جدًا	بنية مسامية ثلاثية الأبعاد	المسامية
[38]	حتى 40% من وزنه	يمتص بخار الماء والغازات	القدرة على الامتزاز
[37]	/	صلب لكنه هش نسبيًا	الصلابة

2.5.11. الخواص الكيميائية:**الخمول الكيميائي والثبات:**

تتميز السيليكا جل بخمول كيميائي نسبي في الظروف العادية، حيث لا تتفاعل مع معظم الأحماض (باستثناء حمض الهيدروفلوريك HF) ولا مع العديد من المذيبات العضوية. يعود هذا الاستقرار إلى قوة رابطة Si-O ($\approx 452 \text{ kJ/mol}$)، مما يجعل البنية مقاومة للتفكك [42].

لكنها تتفاعل مع:

القلويات القوية (NaOH, KOH) مكونة سيليكات

حمض HF مكونة فلوروسيليكات

وهذا يوضح أن خمولها نسبي وليس مطلقاً.

كيمياء السطح ومجموعات السيلانول:

يُعتبر سطح السيليكا جل العامل الحاسم في سلوكها الكيميائي، حيث يحتوي على أنواع مختلفة من مجموعات السيلانول:

سيلانول معزول (Isolated Si-OH)

سيلانول متجاور (Vicinal Si-OH)

سيلانول رابط (Geminal Si-(OH)₂)

هذه المجموعات:

تمنح السطح طبيعة قطبية

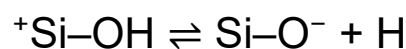
تسمح بتكوين روابط هيدروجينية

تشارك في تفاعلات الامتزاز والتبادل الأيوني

كما يمكن أن تتكاثف هذه المجموعات عند درجات حرارة مرتفعة لتشكيل روابط Si-O-Si مع فقدان الماء (تفاعل إزالة ماء) [43].

الخاصية الحمضية القاعدية للسطح:

تُظهر السيليكا جل سلوكًا حمضيًا ضعيفًا بسبب وجود مجموعات السيلانول، حيث يمكن أن تتفكك وفق التفاعل:



وتعتمد هذه العملية على قيمة pH الوسط، حيث:

عند pH منخفض \rightarrow السطح موجب أو متعادل

عند pH مرتفع \rightarrow السطح سالب الشحنة

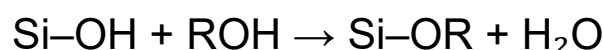
تُعرف نقطة التعادل السطحي بـ (PZC (Point of Zero Charge) وتكون عادة حوالي 2-4، مما يجعل السيليكا جل مادة فعالة في امتزاز الأيونات [44].

التفاعلات السطحية (Surface Reactivity):

رغم خمولها الظاهري، فإن السيليكا جل تُظهر نشاطًا كيميائيًا مهمًا على السطح، حيث يمكن أن تدخل في عدة تفاعلات مثل:

(أ) تفاعلات الأسترة (Esterification)

تتفاعل مجموعات Si-OH مع الكحولات:



(ب) التعديل السطحي (Surface Functionalization)

يمكن تعديل سطح السيليكا باستخدام مركبات عضوية (مثل السيلانات) لإكسابها خصائص جديدة (هيدروفوبية أو انتقائية).

(ج) تفاعلات الأكسدة والاختزال

في ظروف معينة، يمكن أن تلعب المواقع السطحية دورًا في تفاعلات الأكسدة خاصة عند وجود شوائب معدنية [45].

الامتزاز الكيميائي والفيزيائي:

تُعد خاصية الامتزاز من أهم الخصائص الكيميائية للسيليكا جل، وتحدث عبر نوعين:

(أ) الامتزاز الفيزيائي

يعتمد على قوى فان دير فال

لا يغير التركيب الكيميائي

عكوس (Reversible)

(ب) الامتزاز الكيميائي (Chemisorption)

يتضمن روابط كيميائية

يحدث عند مواقع نشطة (Si-OH)

أقل شيوعًا لكنه أكثر ثباتًا

وتُظهر السيليكا جل انتقائية عالية تجاه:

الجزئيات القطبية (مثل الماء)

المركبات العضوية القطبية [46] [43]

التفاعل داخل المسام (Nanoconfinement Effect):

تلعب المسامية دورًا مهمًا في السلوك الكيميائي، حيث تؤثر المسام الدقيقة على:

سرعة التفاعلات

توزيع الجزئيات

استقرار المركبات الممتزة

تُعرف هذه الظاهرة باسم تأثير الحصر النانوي (Nanoconfinement)، حيث تختلف التفاعلات داخل المسام عن الوسط الحر [42].

عدم الذوبان والاستقرار الكيميائي:

السيليكا جل:

غير قابلة للذوبان في الماء

غير ذائبة في معظم المذيبات العضوية

مقاومة للتفكك الحراري حتى درجات حرارة مرتفعة

وهذا يجعلها مناسبة للاستخدام في ظروف قاسية نسبيًا [43].

الانتقائية الكيميائية:

تعتمد انتقائية السيليكا جل على عدة عوامل مثل حجم المسام، وقطبية السطح، وتوزيع مجموعات السيلانول، مما يؤثر بشكل مباشر على سلوك الامتزاز. وهذا ما يجعلها مادة فعالة في تقنيات الكروماتوغرافيا وعمليات الفصل الكيميائي والتنقية الصناعية [47] [48].

III- الدراسات السابقة:

تُعد الرمال السيليسية، وخاصة رمال الكثبان الصحراوية، من أهم المصادر الطبيعية الغنية بثاني أكسيد السيليكون (SiO_2)، مما يجعلها مادة أولية واعدة لإنتاج السيليكا جل بطرق منخفضة التكلفة. في هذا السياق، تناولت العديد من الدراسات إمكانية تحويل هذه الرمال إلى مواد سيليكا ذات خصائص فيزيائية وكيميائية متقدمة باستخدام تقنيات كيميائية مختلفة، وعلى رأسها طريقة Sol-Gel.

1- تُعد دراسة Mohamed Sdiri وآخرين (2014) من أبرز الأعمال التي تناولت تحويل الرمال السيليسية الصحراوية إلى سيليكا جل بطريقة فعالة ومنخفضة التكلفة. وقد هدفت هذه الدراسة إلى تطوير منهجية كيميائية تسمح باستغلال الموارد الطبيعية المحلية لإنتاج مادة ذات خصائص سطحية متقدمة. اعتمد الباحثون على المعالجة الحرارية للرمل مع كربونات الصوديوم للحصول على سيليكات الصوديوم، تلتها عملية ترسيب حمضي باستخدام حمض الهيدروكلوريك وفق تقنية sol-gel. وقد أظهرت النتائج أن السيليكا المنتجة تتميز بمساحة سطحية مرتفعة تتجاوز $300 \text{ m}^2/\text{g}$ ، إضافة إلى بنية مسامية متطورة، مما يجعلها مناسبة بشكل خاص لتطبيقات الامتزاز البيئي. وتبرز أهمية هذه الدراسة في كونها أثبتت إمكانية تحويل مادة طبيعية بسيطة إلى منتج عالي القيمة باستخدام تقنيات كيميائية قابلة للتطبيق صناعياً. [49]

2- ومن جهة أخرى، ركزت دراسة Mohamed Sdiri وآخرين (2011) على توصيف الرمال السيليسية المعروفة بـ *Albian sands*، بهدف تقييم مدى ملاءمتها كمادة أولية لإنتاج السيليكا جل. وقد استخدمت الدراسة تقنيات تحليل متقدمة مثل XRD و XRF لتحديد التركيب المعدني والكيميائي، حيث أظهرت النتائج أن نسبة ثاني أكسيد السيليكون تصل إلى حوالي 97%، مع وجود كميات ضئيلة من الشوائب المعدنية. كما أكدت الدراسة أن هذه النقاوة العالية تقلل من الحاجة إلى عمليات تنقية معقدة، مما يسهل عملية تحويل

الرمل إلى سيليكات جل بجودة عالية. وتُعد هذه الدراسة مرجعاً أساسياً في فهم خصائص المادة الأولية وتأثيرها على جودة المنتج النهائي. [50]

3- كما تناولت دراسة منجزة بجامعة جامعة قاصدي مرباح ورقلة على التوصيف المعدني والكيميائي لرمال الكثبان باستخدام تقنيات تحليل متقدمة مثل حيود الأشعة السينية (XRD) والتحليل الكيميائي بالأشعة السينية (XRF)، إضافة إلى التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR). وقد أظهرت النتائج أن هذه الرمال تتكون أساساً من معدن الكوارتز (SiO_2) بنسبة مرتفعة، مع وجود كميات ضئيلة من بعض الشوائب المعدنية مثل الجبس (CaSO_4) وأكاسيد الحديد، وهو ما يعكس الطبيعة السيليسية الغالبة لهذه الرمال. كما بينت الدراسة أن الخصائص الفيزيائية للرمال، خاصة التوزيع الحبيبي، تتسم بدرجة من التجانس، وهو عامل مهم يساهم في تحسين تفاعلية المادة أثناء المعالجات الكيميائية اللاحقة. وتكمن أهمية هذه النتائج في كونها تؤكد أن رمال الكثبان في منطقة ورقلة تمتلك المقومات الأساسية لإنتاج مواد سيليسية عالية الجودة، دون الحاجة إلى عمليات تنقية معقدة، مما يعزز من إمكانية تثمينها في التطبيقات الصناعية، خاصة في مجال تصنيع السيليكات جل. [7]

4- أما دراسة Arumugam Kalapathy وآخرين (2000)، فقد ركزت على تطوير طريقة بسيطة لاستخلاص السيليكات النقية من مصادر سيليسية طبيعية، وقد شكلت هذه الدراسة أساساً نظرياً مهماً لتقنيات الاستخلاص الكيميائي الحديثة. اعتمدت المنهجية على المعالجة القلوية باستخدام هيدروكسيد الصوديوم، تليها عملية ترسيب حمضي للحصول على سيليكات غير متبلورة ذات نقاوة عالية. وقد أظهرت النتائج أن هذه الطريقة فعالة في إنتاج سيليكات بخصائص فيزيائية جيدة، مما جعلها مرجعاً أساسياً لتطوير طرق تصنيع السيليكات جل من الرمال السيليسية. [51]

5- من جهة أخرى، تناولت دراسة قواسمي أحمد (2020) المنجزة بجامعة جامعة الوادي تأثير المعالجة الكيميائية على نقاوة رمال السيليكات، بهدف تحسين خصائصها وجعلها ملائمة للتطبيقات الصناعية المتقدمة. اعتمدت الدراسة على إجراء سلسلة من المعالجات الحمضية باستخدام أحماض قوية، مثل حمض الهيدروكلوريك وحمض النتريك، من أجل إزالة الشوائب المعدنية المصاحبة للرمال، خاصة أكاسيد الحديد والألمنيوم التي تؤثر سلباً على

نقاوة السيليكا. وقد أظهرت النتائج أن الغسل الحمضي يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في نسبة هذه الشوائب، مع ارتفاع نسبة ثاني أكسيد السيليكون، مما ينعكس إيجاباً على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة. كما بينت الدراسة أن تحسين نقاوة الرمل يساهم في زيادة فعاليته في التفاعلات الكيميائية اللاحقة، ويجعله أكثر ملاءمة للاستخدام في صناعات تتطلب سيليكا عالية الجودة، مثل صناعة الزجاج والمواد الماصة. وتبرز أهمية هذه الدراسة في كونها تؤكد أن المعالجة الكيميائية تمثل خطوة أساسية في تثمين رمال الكثبان وتحضيرها للاستخدام في تطبيقات أكثر تقدماً، مثل تصنيع السيليكا جل. [52]

6- وفي إطار دراسة تأثير ظروف التحضير، قدمت دراسة Liou و Yang (2011)، المنشورة في *Ceramics International*، تحليلاً مفصلاً للعوامل المؤثرة في خصائص السيليكا، خاصة المسامية والمساحة السطحية. وقد تم التحكم في متغيرات أساسية مثل الأس الهيدروجيني ودرجة الحرارة أثناء التحضير، حيث أظهرت النتائج أن الوسط الحمضي (pH منخفض) يؤدي إلى تكوين شبكة مسامية أكثر انتظاماً ومساحة سطحية أكبر، في حين أن المعالجة الحرارية تساهم في تحسين الاستقرار البنيوي وتقليل العيوب. وتُبرز هذه الدراسة أهمية التحكم في شروط التفاعل للحصول على خصائص محددة للسيليكا جل. [53]

7- تبنت دراسة بن عيسى عبد القادر (2019) المنجزة بجامعة جامعة قاصدي مرباح ورقلة إمكانية تحسين خصائص الخرسانة من خلال استخدام رمل الكثبان كبديل جزئي للركام الناعم، مع إضافة مواد سيليسية فعّالة مثل دخان السيليكا. وقد هدفت الدراسة إلى تقييم تأثير هذه الإضافات على الأداء الميكانيكي والدوامي للخرسانة، خاصة في البيئات الصحراوية. اعتمد الباحث على إعداد خلطات خرسانية بنسب مختلفة من رمل الكثبان والإضافات السيليسية، ثم إجراء سلسلة من الاختبارات المخبرية، من بينها مقاومة الضغط، ومقاومة الانحناء، واختبارات النفاذية والمتانة. وقد أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في مقاومة الضغط مع زيادة نسبة الإضافة السيليسية، وهو ما يُعزى إلى التفاعل البوزولاني الذي يؤدي إلى تكوين مركبات إسمنتية ثانوية تساهم في سد المسام الدقيقة وتحسين تماسك البنية الداخلية للخرسانة. كما لوحظ انخفاض في النفاذية وزيادة في مقاومة العوامل البيئية، مما يعكس تحسناً في متانة الخرسانة على المدى الطويل. وتبرز أهمية هذه الدراسة في

تأكيد الدور الفعّال للمواد السيلييسية المستخلصة من رمال الكثبان في تحسين الخصائص الهندسية للمواد الإنشائية، وهو ما يدعم توجه استغلال هذه الموارد الطبيعية في تطبيقات صناعية ذات قيمة مضافة. [54]

المراجع

- [1] Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (1987). *Sand and Sandstone* .(2nd ed.). Springer-Verlag
- [2] United Nations Environment Programme. (2022). *What is sand? Results from a UNEP / GRID-Geneva expert discussion (Technical Report)*. Global Sand Analysis Series
- [3]"Constable, Harriet "How the demand for Sand is killing rivers
- [4] عطالله، ميشيل كامل. (2009). *أساسيات الجيولوجيا (ط. 3)*. دار المسيرة للنشر والتوزيع.
- [5] طويل، مريم. (2025). *تشخيص وتنقية رمال كثبان شمال شرق الصحراء الجزائرية* جامعة قاصدي مرباح ورقلة
- [6] بضيف، س. (2016). *تحديد التركيب الجزيئي للأصناف الحبيبية المختلفة لرمال كثبان منطقة ورقلة وحساب تركيز الكوارتز فيها باستخدام التقنيات الطيفية*. جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر
- [7] مشري، محمد العيد. (2016). *دراسة أثر المعالجة الحرارية على تركيب رمل كثبان ورقلة، وعلى ناقليته الكهربائية، باستخدام الطرق الطيفية [أطروحة دكتوراه]*. جامعة قاصدي مرباح ورقلة.
- [8] مركز البحوث الزراعية. (2003). *الكثبان الرملية (نشرة رقم 854)*. وزارة الزراعة واستصلاح الأراضي؛ الإدارة المركزية للإرشاد الزراعي sand
- [9] Andreotti, B., Claudin, P., & Douady, S. (2010). *Selection of dune shapes and their migration rates. Part I: Dynamics of sand, wind, and*

barchans. Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure, Paris

[10] Bashir, W. (2020, June 12). *The dynamics of sand dunes and their importance in light of the phenomenon of desertification [Harakiyat kuthban al-raml wa-ahmiyatuha ala daw' zahirat al-tasahhur]*. Al-Qafilah Magazine. (In Arabic)

[11] الكثبان الرملية.. (د.ت). الجغرافيا Geographie. تم الاسترجاع من [blog-] [post_6757%20(1).html]

[12] ماهود، محمد إتكهك. (2022). *استخدام المؤشرات الطيفية لرصد التغير في الامتداد المكاني لظاهرة الكثبان الرملية في منطقة علي الغربي*. مجلة الخليج العربي، 50(4).

[13] Al-Shehri, N. S. (2024). *Geomorphology of sand dunes and their impact on human activities*

[14] https://x.com/jasem_albanai/status/82637515422579097

[15] Benna Y, Bedjou S, Gueltahe B, Braray A (2006). *Valorisation des Sables de dune: Application aux Sables des régions de Ouargla et de Boussaada*. National center of Studies and Integrated Researchs CNERI

[16] بوقرة، أ. (2021). *تأثير حجم الحبيبات وتوزيعها على السلوك الميكانيكي من رمال*

الكثبان الرملية. مجلة الهندسة المدنية، 7(2)، 1365-1355.

[17] https://x.com/Geography_Alg

[18] M.L. Mechri, S.Chihi, *Study of the atomic composition of the sand dunes of Ouargla region by XRF spectroscopy, SEM, EDX and ANN*. Ann .Sci Technol Vol .4, No. 2, 2012, page 69-79

- [19] Kavulich Jr, M. J. (2008). *The physics of sand dune formation and migration on Mars [Doctoral dissertation, Worcester Polytechnic Institute]*
- [20] Beiser, V. (2019, November 16). *Why the world is running out of sand.*
- [21] Flörke, O. W., Graetsch, H. A., Brunk, F., Benda, L., Paschen, S., Bergna, H. E., ... & Schiffmann, D. (2000). *Silica*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry
- [22] Hemley, R. J., Prewitt, C. T., & Kingma, K. J. (1994). *High-pressure behavior of silica*. *Reviews in Mineralogy*, 29, 41-41.
- [23] National Center for Biotechnology Information (2026). PubChem Compound Summary for CID 24261, *Silica*. Retrieved April 21, 2026 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Silica>.
- [24] Britannica Editors (2026, March 23). *silica*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/silica>
- [25] Weintraub, S. (2002). *Demystifying silica gel*. Object Specialty Group Postprints, 9, 169-194
- [26] Greenberg, S. A. (1957). *Reaction of silica with water*. *Journal of Physical Chemistry*, 61(7), 960–963.
- [27] Ro, J. C., & In, J. C. (1991). *Structures and properties of silica gels prepared by the sol—gel method*. *Journal of non-crystalline solids*, 130(1), 8-17.

- [28] Unger, K. K. (1979). Porous silica (Vol. 16) Elsevier
- [29] Narayan, R., Nayak, U. Y., Raichur, A. M., & Garg, S. (2018). *Mesoporous silica nanoparticles : A comprehensive review on synthesis and recent advances*. Pharmaceutics, 10(3), 118
- [30] Zhuravlev, L. T. (2000). *The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model*. Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects, 173(1-3), 1-38
- [31] Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). *Adsorption of gases in multimolecular layers*. Journal of the American chemical society, 60(2), 309-319
- [32] Hench, L. L., & West, J. K. (1990). *The sol-gel process*. Chemical Reviews, 90(1), 33–72.
- [33] Sing, K. S. (1985). *Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984)*. Pure and applied chemistry, 57(4), 603-619
- [34] Jeong, W. J. (2014). *Porous silica particles as chromatographic separation media : A review*. Bulletin of the Korean Chemical Society, 35(12), 3465–3474
- [35] National Center for Biotechnology Information. (n.d.). *Silicon dioxide (SiO₂)*. PubChem Compound Summary for CID 60676. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/60676>

- [36] International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). (n.d.). *Silica gel*. In Compendium of Chemical Terminology (the Gold Book). Retrieved May 16, 2026, from <https://goldbook.iupac.org>
- [37] Sigma-Aldrich. (n.d.). *Silica gel product information*. Merck KGaA. <https://www.sigmaaldrich.com>
- [38] Crittenden, J. C., & Thomas, W. J. (2012). *Adsorption technology and design*. Elsevier
- [39] Lowell, S., Shields, J. E., Thomas, M. A., & Thommes, M. (2004). *Characterization of Porous Solids and Powders : Surface Area, Pore Size and Density*. Springer.
- [40] Gregg, S. J., & Sing, K. S. W. (1982). *Characterization of porous solids*. Academic Press
- [41] Merck Group. (n.d.). *Silica gel 60 for column chromatography – Technical information*. Merck KGaA
- [42] Iler, R. K. (1979). *The Chemistry of Silica : Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*. John Wiley & Sons.
- [43] Bergna, H. E., & Roberts, W. O. (2005). *Colloidal Silica : Fundamentals and Applications*. CRC Press.
- [44] Kosmulski, M. (2009). *Surface Charging and Points of Zero Charge*. CRC Press.
- [45] Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel Science : The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press.

- [46] Gregg, S. J., & Sing, K. S. W. (1982). *Adsorption, Surface Area and Porosity (2nd ed.)*. Academic Press.
- [47] Snyder, L. R., Kirkland, J. J., & Dolan, J. W. (2010). *Introduction to Modern Liquid Chromatography (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
- [48] Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K., Llewellyn, P., & Maurin, G. (2014). *Adsorption by Powders and Porous Solids : Principles, Methodology and Applications (2nd ed.)*. Academic Press.
- [49] Sdiri, M., Higashi, T., Jamoussi, F., & Bouaziz, S. (2014). *Preparation and characterization of silica gel from siliceous sands of southern Tunisia*. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(4), 486–493
- [50] Sdiri, M., Jamoussi, F., & Higashi, T. (2011). *Mineralogical and geochemical characterization of Albian silica sands from southern Tunisia : Evaluation for industrial applications*. *Applied Clay Science*, 52(1–2), 97–103
- [51] Kalapathy, U., Proctor, A., & Shultz, J. (2000). *A simple method for production of pure silica from rice hull ash*. *Bioresource Technology*, 73(3), 257–262
- [52] Qawasmi, A. (2020). *Effect of chemical treatment on the purity of silica sands and their suitability for industrial applications*. Master's thesis, University of El Oued, Algeria

[53] Liou, T. H., & Yang, C. C. (2011). *Synthesis and surface characteristics of nanosilica produced from alkali-extracted rice husk ash*. *Ceramics International*, 37(1), 93–101

[54] Ben Aissa, A. (2019). *Improvement of concrete properties using dune sand and siliceous additives*. Master's thesis, Kasdi Merbah University Ouargla, Algeria

الفصل الثاني

الأجهزة والأدوات والتقنيات المستعملة في التحليل

المقدمة:

يُمثل هذا الفصل الجانب العملي والركيزة الأساسية لهذه الدراسة، حيث ننتقل فيه من الاستعراض النظري لخصائص الرمل والسيليكا إلى مرحلة التثمين الفعلي لهذه الموارد الطبيعية. إن الهدف الرئيس من هذا الفصل هو استكشاف الإمكانيات التقنية لتحويل رمل الكثبان، المتوفر بكثرة في المناطق الصحراوية، إلى مادة "السيليكا" ذات القيمة المضافة العالية، والتي تدخل في تطبيقات صناعية وتكنولوجية واسعة. سنقوم في هذا الجزء بتفصيل المسار التجريبي الذي تم اتباعه، بدءاً من توصيف المادة الأولية (رمل الكثبان) لتحديد نقائها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية، مروراً بمراحل التحضير والمعالجة، وصولاً إلى عملية الاستخلاص الكيميائي للسيليكا. كما سيتم عرض الأجهزة والأدوات المخبرية المستخدمة.

IV. المواد والتجهيزات و التقنيات المستعملة:

1.IV. المواد:

ويمكن تلخيصها في الجدول (1.ii) التالي:

الجدول (1.ii) المواد المستخدمة ودرجة نقاوتها والشركة المنتجة

المواد	درجة النقاوة	الشركة المنتجة
هيدروكسيد صوديوم ($NaOH$)	97%	BIOCHEM Chemopharma
حمض الهيدروكليك (HCL)	37%	BIOCHEM Chemopharma
هيدروكسيد بوتاسيوم (KOH)	85%	SIGMA ALDRICH
ماء مقطر	عالي النقاوة	NASSAH

المواقع التي أخذت منها عينات الرمل

✓ تقع منطقة أخذ العينة عند الإحداثيات الجغرافية $33^{\circ}07'55.2''\text{N}$ و $6^{\circ}09'33.5''\text{E}$

بمنطقة الطيبات، ولاية تفرت.

✓ تقع منطقة أخذ العينة بسيدي خويلد، ولاية ورقلة، عند الإحداثيات $31.971237^{\circ}\text{N}$

و 5.446211°E .



الشكل (1.ii): صورة توضيحية للمواقع الجغرافية

2.IV. الأجهزة المستعملة:

تم الاعتماد على العديد من الأجهزة والتي كان كل منها له دوره الخاص

1.2.IV. الأجهزة مخبرية:

1- ميزان إلكتروني حساس: جهاز من نوع Adam Equipment انتاج شركة Nimbus

i NBL214 حساسيه 10^{-4} ميزان إلكتروني مخبري عالي الدقة مزود بحجرة زجاجية لحمايته

من تيارات الهواء والغبار، يُستخدم لقياس الكتل الصغيرة بدقة كبيرة، ويعرض النتائج رقمياً

على شاشة أمامية.



الشكل (2.11): صورة توضيحية لجهاز الميزان الالكتروني حساس

2- جهاز الرج المغناطيسي: من نوع ARE انتاج شركة VELP SCIENTIFICA هذا الجهاز هو مسخن ومحرك مغناطيسي (Heating Magnetic Stirrer)، يستخدم لتسخين السوائل وخلطها في آن واحد وبشكل متجانس.



الشكل (3.11): صورة توضيحية لجهاز الرج المغناطيسي

3- مجفف كهربائي: من نوع DIGITHEAT من شركة SELECTA الإسبانية هذا فرن كهربائي ذو حجرة معزولة حرارياً يُستخدم لتجفيف العينات والزجاجيات وتحضير العينات قبل التحليل وإزالة الرطوبة منها عند درجات حرارة مضبوطة..



الشكل (4.11): صورة توضيحية لجهاز المجفف الكهربائي

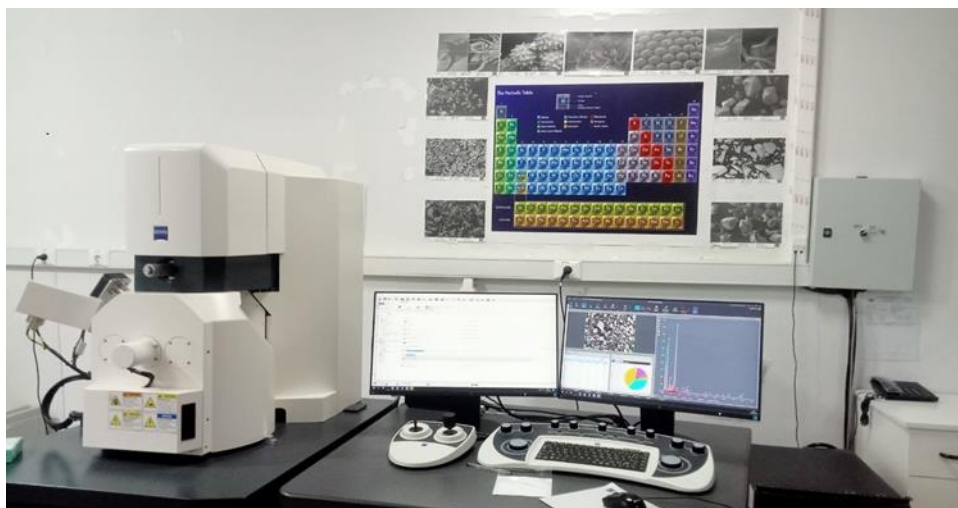
4- مجفف زجاجي: من النوع STANDARD DESICCATOR جهاز تجفيف بسيط يتكون من وعاء يحتوي على هيدروكسيد بوتاسيوم لامتصاص الرطوبة، تعلوه عينات داخل حيز مغلق بإحكام، بهدف توفير وسط جاف لتجفيف المواد أو حفظها



الشكل (5.11): صورة توضيحية لجهاز التجفيف الزجاجي

2.2.IV. أجهزة توصيف:

1-جهاز المجهر الإلكتروني الماسح SEM: (طراز ZEISS EVO 15) حيث يُستخدم لتوصيف المواد ودراسة تضاريس أسطح العينات بدقة عالية جداً تصل إلى مستوى الميكروميتر والنانومتر.



الشكل (6.II): صورة توضيحية لجهاز المجهر الإلكتروني الماسح SEM

2-جهاز حيود الأشعة تحت الحمراء (FTIR): يُستخدم لتحليل المواد وتحديد تركيبها الكيميائي من خلال قياس كيفية امتصاصها للأشعة تحت الحمراء.

-الشركة المصنعة: شركة (Agilent Technologies).


-الطراز (الموديل): (Cary 630 FTIR). كاري 630



الشكل (7.11): صورة توضيحية لجهاز الأشعة الحمراء FTIR

V. طريقة تحضير سيليكات جل:

تعد طريقة الصول-جل من أهم الطرق الكيميائية المستعملة في تحضير السيليكات جل، لما تتميز به من سهولة في التحضير وإمكانية التحكم في خصائص المادة الناتجة مثل المسامية والمساحة السطحية. في هذه الدراسة تم تحضير السيليكات جل انطلاقاً من رمل الكثبان الرملية، حيث خضع الرمل لعدة مراحل معالجة كيميائية بهدف استخلاص السيليكات وتحويلها إلى هلام السيليكات. وتشمل خطة العمل مراحل غسل الرمل وتجفيفه، ثم استخلاص السيليكات باستعمال هيدروكسيد الصوديوم، يلي ذلك الترشيح والتحميض للحصول على الهلام، ثم الغسل والتجفيف والطحن للحصول في النهاية على مسحوق السيليكات جل الجاهز للتحليل والاستعمال، حيث نلخصها في المخطط (الشكل (8.11)) التالي:



رمل طبيعي (SiO₂) 10 g

غسل بحمص HCl مخفف مع التحريك لمدة 1 إلى 2 ساعة إزالة الشوائب

تجفيف وطحن ناعم

إضافة الماء

إضافة NaOH (20 g) بالتدرج مع التحريك حتى الذوبان التام

ترشيح المحلول محلول سيليكات الصوديوم

ضبط pH 6-7 ملية سيليكات

شيخوخة (Aging) (24 ساعة)

غسل وتجفيف 110-120°C

سيليكات جل مسامية (SiO₂ · nH₂O)

آلية Sol-Gel

1. تحلل مائي

$$\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$

(ماء) (سيليكات الصوديوم) (قاعدة) (صلب)

↔

تحلل مائي

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{Na}^+ + \text{H}_2\text{SiO}_3$$

(حمض السيليسيك)

2. تكافف

أ. تكافف بين جزيئين

$$2\text{H}_2\text{SiO}_3 \rightarrow \text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O}$$

(ماء)

ب. تكافف مع السطح

$$\text{Si-OH} + \text{HO-Si} \rightarrow \text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O}$$

(ماء)

3. تكوين شبكة ثلاثية الأبعاد (جل)

$$\begin{array}{c} -\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}- \\ | \quad | \quad | \\ \text{OH} \quad \text{H} \quad \text{OH} \\ \downarrow \\ -\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}- \\ | \quad | \quad | \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{H}_2\text{O} \end{array}$$

4. نزع الماء (تجفيف)

$$\text{Si-OH} \rightarrow \text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O}$$

5. التفاعل النهائي

$$\text{SiO}_2 + x\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} + x\text{H}_2\text{O}$$

(جل السيليكات)

يمكن تعديل المنتج النهائي:

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \text{ (aq)} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl}$$

النتائج: سيليكات جل مسامية عالية المساحة.

✓ pH المتالي: 6-7.

✓ درجة التجفيف: 110-120°C.

✓ شيخوخة (Aging) تحسن التجانس والخواص المسامية.

الشكل (8.11): مخطط تحضير السيليكات جل من الرمل بطريقة الصول-جل

VI. التقنيات المستعملة في تحليل العينات :**1.VI. المجهر الإلكتروني الماسح (SEM):**

يُعد المجهر الإلكتروني الماسح Scanning Electron Microscope تقنية متقدمة تُستخدم للحصول على صور دقيقة لسطح العينة من خلال مسحها بحزمة من الإلكترونات المركزة. وتعتمد هذه التقنية على مبدأ تفاعل الحزمة الإلكترونية مع سطح المادة، مما يسمح بإنتاج صور عالية الدقة تُظهر الخصائص المورفولوجية والبنية السطحية للعينة.

وعند تسليط الحزمة الإلكترونية على العينة تحدث عدة ظواهر فيزيائية ناتجة عن تفاعل الإلكترونات مع المادة، من بينها انبعاث الإلكترونات الثانوية، والإلكترونات المرتدة، إضافة إلى انبعاث أشعة X والفوتونات الضوئية وتولّد مجالات كهربائية ومغناطيسية. وتُنقَط هذه الإشارات بواسطة كواشف خاصة ثم تُحوّل إلى صورة رقمية دقيقة تمثل تضاريس سطح العينة وتركيبها البنيوي [1]. كما يمكن ربط الجهاز بتقنية EDX لتحليل التركيب العنصري والكيميائي للعينة.

1.1.VI. التحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX):

تقنية التحليل الطيفي بالأشعة السينية المشتتة للطاقة EDX تُستخدم مع المجهر الإلكتروني لتحليل التركيب الكيميائي للعناصر الموجودة في العينة. وتعتمد هذه التقنية على تفاعل الحزمة الإلكترونية الساقطة مع ذرات العينة، حيث يؤدي هذا التفاعل إلى إثارة إلكترونات المدارات الداخلية للذرات وخروجها من مستوياتها، مما يسبب انتقال إلكترونات من مستويات طاقة أعلى لملء الفراغات الناتجة. وخلال هذا الانتقال تنبعث أشعة سينية مميزة لكل عنصر كيميائي، ومن خلال تحليل طاقة هذه الأشعة يمكن التعرف على نوع العناصر الموجودة في العينة وتحديد نسبها التقريبية.

وتتميز تقنية EDX بقدرتها على إجراء تحليل نوعي وكمي سريع للعناصر الكيميائية، إضافةً إلى إمكانية دراسة توزيع العناصر على سطح المادة عند ربطها بالمجهر الإلكتروني. لذلك

تُستخدم هذه التقنية على نطاق واسع في علوم المواد والجيولوجيا والهندسة والتحليل المعدنية، نظرًا لدقتها العالية وسهولة دمجها مع تقنيات التصوير المجهر الإلكتروني. [2]

2.1.VI. مبدأ عمل الجهاز:

يعتمد مبدأ عمل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) على تفاعل حزمة إلكترونية مركزة مع سطح العينة المراد تحليلها. حيث يتم توليد الإلكترونات بواسطة المدفع الإلكتروني ثم تُسرَّع داخل عمود المجهر في وسط مفرغ من الهواء، وبعد ذلك تمر عبر عدسات كهرومغناطيسية تعمل على تكثيف الحزمة الإلكترونية وتركيزها في نقطة دقيقة جدًا قد يصل قطرها إلى عدة نانومترات. بعد تركيز الحزمة تقوم ملفات المسح بتحريكها بانتظام فوق سطح العينة من اليسار إلى اليمين ومن الأعلى إلى الأسفل، وبذلك يتم مسح كامل سطح العينة نقطةً بنقطة.

وعند اصطدام الحزمة الإلكترونية بسطح العينة تنتج عدة إشارات وانبعاثات مختلفة نتيجة التفاعل بين الإلكترونات الساقطة وذرات المادة. ويتم التقاط هذه الإشارات بواسطة كواشف خاصة ثم تُحوَّل إلى إشارات رقمية تُستخدم لتكوين صورة عالية الدقة لسطح العينة وإظهار خصائصها المورفولوجية والتركيبية. [1]

ومن أهم الإشارات الناتجة عن هذا التفاعل:

الإلكترونات الثانوية (Secondary Electrons): تنتج من الطبقات السطحية للعينة،

وتُستخدم لإظهار تفاصيل السطح مثل المسام والخشونة والشقوق بدقة عالية.

الإلكترونات المرتدة (Backscattered Electrons): هي إلكترونات تترد من سطح العينة

بسبب طاقتها العالية، وتساعد في التمييز بين العناصر المختلفة حسب العدد الذري.

الأشعة السينية المميزة (Characteristic X-rays): تنتج نتيجة انتقال الإلكترونات داخل

الذرات، وتُستخدم في التحليل الكيميائي للعناصر بواسطة تقنية EDS أو EDX.

الفوتونات والإشعاعات الأخرى: تنتج بسبب إثارة الذرات أثناء التصادم، وتوفر معلومات

إضافية حول طبيعة المادة وبنيتها.

وبفضل هذه الإشارات يستطيع المجهر الإلكتروني الماسح إعطاء صور عالية الدقة وتحليل التركيب الكيميائي للعينات المختلفة، لذلك يُستخدم على نطاق واسع في علوم المواد والجيولوجيا والهندسة والكيمياء. [3]

3.1.VI. مكونات الجهاز:

يتكوّن المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) من مجموعة من الأجزاء الأساسية التي تعمل معًا لإنتاج الحزمة الإلكترونية وتكوين صورة دقيقة لسطح العينة (الشكل (9.ii)):

المدفع الإلكتروني (Electron Gun): يُستخدم لتوليد الإلكترونات التي تكوّن الحزمة الإلكترونية داخل المجهر.

العدسات الكهرومغناطيسية (Electromagnetic Lenses): تعمل على تركيز الحزمة الإلكترونية والتحكم في مسارها قبل وصولها إلى سطح العينة.

ملفات المسح (Scanning Coils): تقوم بتحريك الحزمة الإلكترونية فوق سطح العينة بطريقة منتظمة لتكوين الصورة.

حجرة العينة (Specimen Chamber): وهي المكان الذي توضع فيه العينة داخل الجهاز تحت ظروف الفراغ.

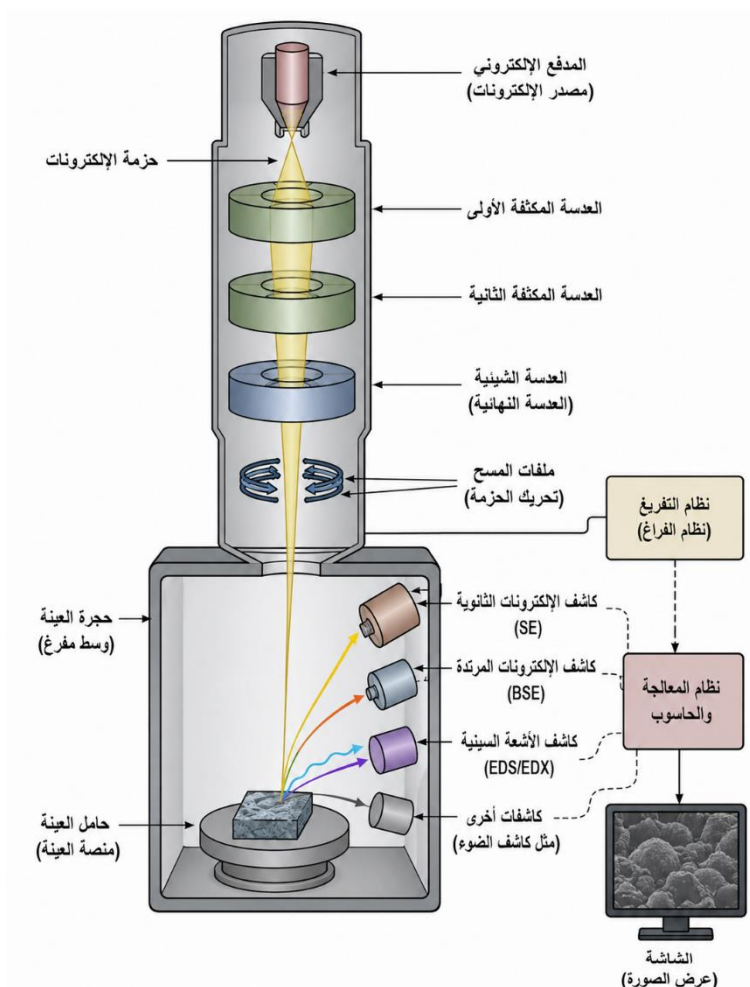
حامل العينة (Sample Stage): يُستخدم لتثبيت العينة وتحريكها في اتجاهات مختلفة أثناء التحليل.

الكواشف (Detectors): تقوم بالتقاط الإشارات الناتجة عن تفاعل الإلكترونات مع العينة مثل الإلكترونات الثانوية والأشعة السينية.

نظام الفراغ (Vacuum System): يحافظ على وجود وسط مفرغ من الهواء داخل المجهر لمنع تشتت الإلكترونات.

نظام العرض والحاسوب (Display System): يُستخدم لتحويل الإشارات إلى صور

وبيانات تحليلية تُعرض على الشاشة. [3]



الشكل (9.11): رسم تخطيطي لجهاز المجهر الإلكتروني الماسح [1]

2.VI. مطيافية الأشعة ما تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR):

تُعرف تقنية Fourier Transform Infrared Spectroscopy بأنها إحدى أهم التقنيات التحليلية المستخدمة في دراسة وتوصيف المواد الكيميائية، حيث تعتمد على قياس امتصاص المادة للأشعة تحت الحمراء عند ترددات محددة. ويحدث هذا الامتصاص نتيجة تفاعل الأشعة تحت الحمراء مع الروابط الكيميائية داخل الجزيئات، مما يؤدي إلى اهتزاز الذرات وانتقالها بين مستويات طاقة مختلفة. وتمتلك كل مجموعة وظيفية أو رابطة كيميائية نطاق امتصاص

مميز، لذلك يمكن استعمال هذه التقنية للتعرف على التركيب الكيميائي وتحديد المجموعات الوظيفية والبنية الجزيئية للمواد المختلفة بدقة عالية. [4]

حيث يتم تقسيم مجال الأشعة تحت الحمراء الي ثلاث اقسام وهي:

الجدول (2.ii): تقسيم مجالات الأشعة تحت الحمراء (FTIR) [4]

المنطقة	الطول الموجي (μm)	العدد الموجي (cm^{-1})
الأشعة تحت الحمراء القريبة (Near IR)	2.5 – 0.78	4000 – 12800
الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (Mid IR)	25 – 2.5	400 – 4000
الأشعة تحت حمراء البعيدة (Far IR)	1000 – 25	10 – 400

ويُعد المجال المتوسط للأشعة تحت الحمراء الأكثر استعمالاً في تقنية التحليل مطيافية الأشعة ما تحت الحمراء بتحويل فورييه لأنه يحتوي على معظم الاهتزازات الجزيئية التي تسمح بتحديد البنية الكيميائية والروابط الوظيفية للمواد.

1.2.VI. مبدأ عمل تقنية FTIR:

تعتمد تقنية FTIR على امتصاص الجزيئات للأشعة تحت الحمراء عند ترددات محددة تتوافق مع الترددات الطبيعية لاهتزاز الروابط الكيميائية داخل الجزيء. ويؤدي هذا الامتصاص إلى حدوث اهتزازات مختلفة للذرات، مثل الاهتزازات التمددية والانحنائية، مما يسبب تغيرات دورية في أطوال الروابط الكيميائية والزوايا بينها. وتختلف طاقة الاهتزاز باختلاف نوع الذرات وطبيعة الروابط الكيميائية الموجودة في المادة، لذلك يمتلك كل مركب طيف امتصاص مميز خاص به. ومن خلال دراسة قمم الامتصاص في طيف الأشعة تحت الحمراء يمكن التعرف على المجموعات الوظيفية والروابط الكيميائية الموجودة في الجزيء، ولهذا تُعد هذه التقنية من أهم وسائل التحليل النوعي والتوصيف الجزيئي للمواد. [4] [5]

2.2.VI. مكونات جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR):

يتكون جهاز FTIR من عدة أجزاء أساسية تعمل معًا للحصول على طيف الأشعة تحت الحمراء، ومن أهم هذه المكونات (الشكل (10.11)):

مصدر الأشعة تحت الحمراء: يقوم بإنتاج حزمة من الأشعة تحت الحمراء تغطي مجالًا واسعًا من الأطوال الموجية.

مقسم الشعاع (Beam Splitter): يعمل على تقسيم الشعاع الساقط إلى شعاعين؛ أحدهما يتجه نحو المرآة الثابتة والآخر نحو المرآة المتحركة.

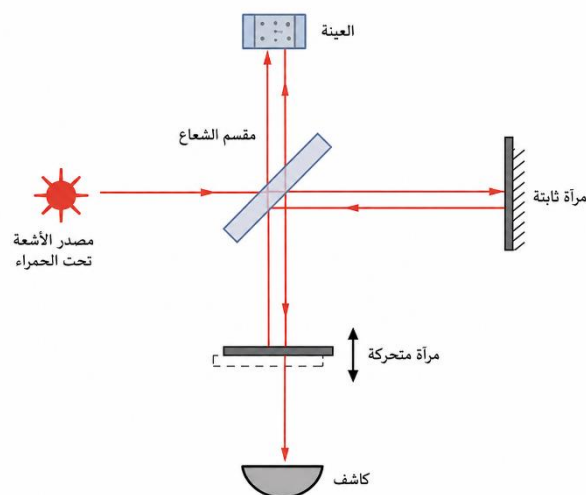
المرآة الثابتة: تعكس الشعاع في مسار ثابت نحو مقسم الشعاع.

المرآة المتحركة: تتحرك ذهابًا وإيابًا لتغيير الفرق في المسار البصري بين الشعاعين، مما يؤدي إلى تكوين التداخل الضوئي.

العينة: تمر الأشعة المتداخلة عبر العينة، حيث تمتص المادة بعض الترددات الموافقة لاهتزاز الروابط الكيميائية.

الكاشف (Detector): يستقبل الإشارة الضوئية الناتجة بعد مرور الأشعة عبر العينة ويحولها إلى إشارة كهربائية.

الحاسوب أو نظام معالجة البيانات: يقوم بتحليل الإشارة باستخدام تحويل فورييه للحصول على طيف الامتصاص بدلالة العدد الموجي. [4]



الشكل (10.ii): رسم تخطيطي لجهاز مطيافية الأشعة ما تحت الحمراء لتحليل فورييه

[5] (FTIR)

3.VI. مطيافية انعراج الأشعة السينية (XRD):

تقنية XRD أو حيود الأشعة السينية (X-Ray Diffraction) تُعد من أهم التقنيات التحليلية المستخدمة في دراسة المواد الصلبة، إذ تسمح بالتعرف على التركيب البلوري والبنية الداخلية للمواد بدقة عالية. وتعتمد هذه التقنية على تفاعل الأشعة السينية مع الذرات المرتبة داخل الشبكات البلورية، حيث تنعكس الأشعة بزوايا محددة تعطي نمط حيود مميز لكل مادة، مما يسمح بالتعرف عليها وتحليل خصائصها البنيوية. [6]

ظهرت فكرة حيود الأشعة السينية بعد اكتشاف العالم Max von Laue سنة 1912 أن البلورات تعمل كشبكات حيود للأشعة السينية بسبب الانتظام الدوري للذرات داخلها، ثم قام العالمان Bragg بتطوير الأساس النظري لهذه التقنية من خلال قانون براج الذي يربط بين زاوية الحيود والمسافة البينية بين المستويات البلورية. [7]

1.3.VI. مبدأ عمل تقنية XRD:

يعتمد مبدأ عمل تقنية حيود الأشعة السينية XRD على تفاعل الأشعة السينية مع الذرات المرتبة داخل المادة البلورية. فعندما تُسلط حزمة من الأشعة السينية أحادية الطول الموجي على عينة بلورية، فإن هذه الأشعة تخترق العينة وتنعكس من المستويات الذرية المنتظمة داخل البلورة

بزوايا محددة. وعند تحقق شرط التداخل البنّاء بين الأشعة المنعكسة تتكون قمم حيود يمكن تسجيلها وتحليلها للتعرف على البنية البلورية للمادة. [8]

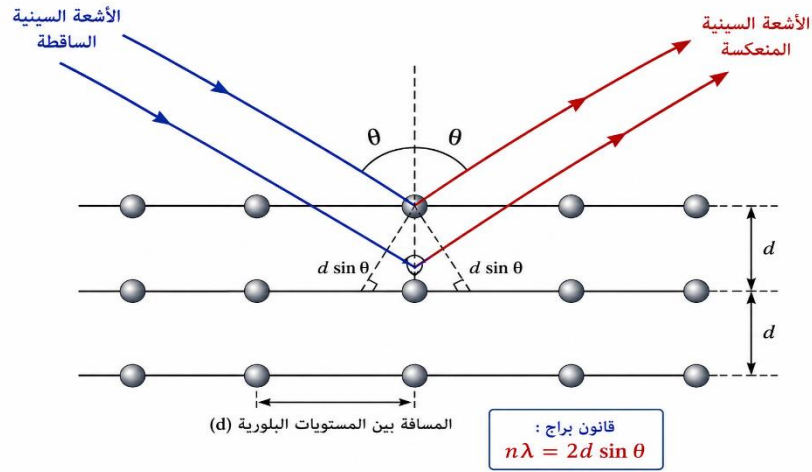
ويعتمد هذا المبدأ على قانون براج الذي يربط بين زاوية الحيود والمسافة بين المستويات البلورية داخل المادة، ويكتب كما يلي [6]:

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

حيث:

- n رتبة الحيود.
- λ طول موجة الأشعة السينية.
- d المسافة بين المستويات البلورية.
- θ زاوية الحيود.

عندما تحقق الأشعة المنعكسة هذا الشرط (الشكل (11.ii))، يحدث تداخل بنّاء يؤدي إلى ظهور قمم حيود واضحة على مخطط يسمى Diffractogram، وهو منحنى يمثل شدة الأشعة المنعكسة بدلالة زاوية الحيود 2θ . وتُعتبر هذه القمم بمثابة بصمة تعريفية للمادة، لأن لكل مادة ترتيباً ذرياً خاصاً يعطي نمط حيود مميز. [8]



الشكل (11.ii): مخطط يوضح مبدأ حيود الأشعة السينية وقانون براغ [8]

المراجع

- [1] Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.
- [2] Williams, D. B., & Carter, C. B. (1978). *Transmission electron microscopy*. *Systematic Materials Analysis*, 4, 407-432.
- [3] Reed, S. J. B. (2005). *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. Cambridge university press.
- [4] Stuart, B. H. (2004). *Infrared spectroscopy: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- [5] Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy (2nd ed.)*. CRC Press.
- [6] Giannini, C., et al. (2016). *X-ray Diffraction : A Powerful Technique for the Multiple-Length-Scale Structural Analysis of Nanomaterials*. *Crystals*, 6(8), 87.
- [7] Als-Nielsen, J., & McMorrow, D. (2011). *Elements of modern X-ray physics*. John Wiley & Sons.
- [8] Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). *X-ray diffraction techniques for mineral characterization: A review for engineers of the fundamentals, applications, and research directions*. *Minerals*, 12(2), 205

الفصل الثالث

تفسير ومناقشة النتائج

مقدمة

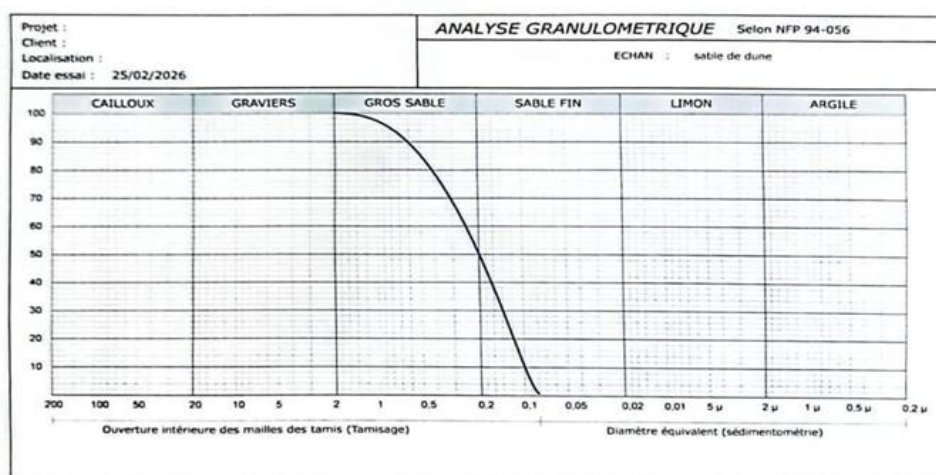
لقد قمنا في هذا الفصل بعرض أهم مختلف النتائج المتحصل عليها ومناقشتها من خلال التقنيات والأجهزة المستعملة، بهدف مدى نجاح مسار التثمين المقترح لرمل الكثبان (رمل الطيبات، ورقلة) وتحويله من مادة خام طبيعية غنية بالسيليكا إلى مادة 'السيليكا جل' (Silica gel) ذات القيمة المضافة العالية في التطبيقات الصناعية والتكنولوجية.

يبدأ التحليل بتوصيف المادة الأولية (الرمل الخشن/الناعم) للتأكد من ملاءمتها ونقاؤها، لينتقل إلى تحليل مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) لتحديد المجموعات الوظيفية وروابط السيليكا، وحيود الأشعة السينية (XRD) للكشف عن طبيعة البنية (بلورية أم غير متبلورة).

.III. نتائج التحليل

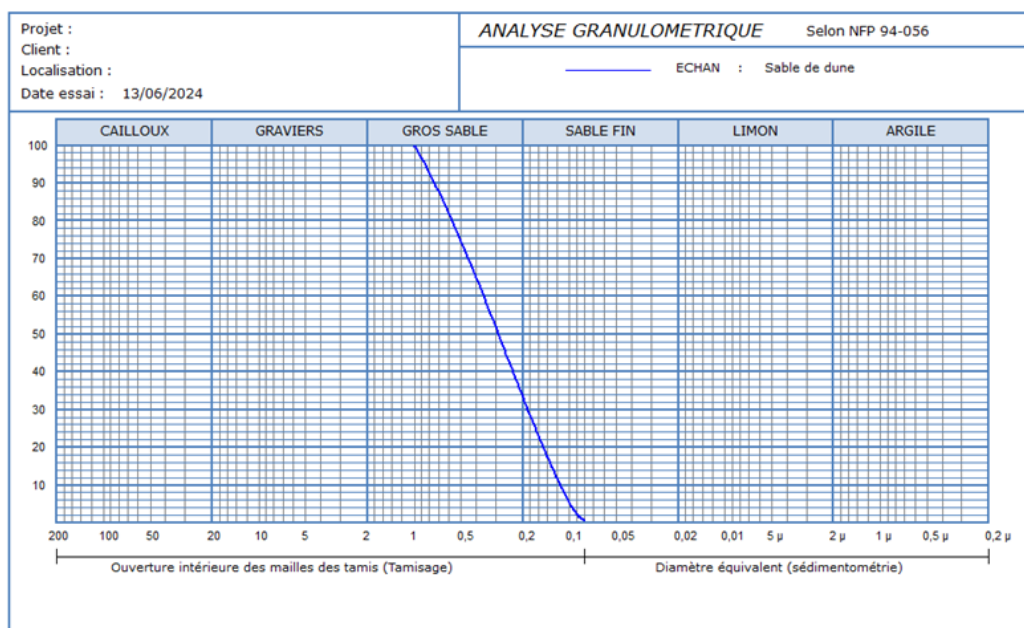
1.III. نتائج تحليل حجم الحبيبات (التصنيف الحبيبي):

يهدف التحليل الحبيبي إلى دراسة توزيع أحجام الحبيبات داخل عينة الرمل لمنطقتي طيبات وورقلة، وذلك لفهم طبيعتها الفيزيائية ودرجة تجانسها. وتعد هذه الدراسة ضرورية في مناقشة خصائص رمل الكثبان، لأنها تسمح بتحديد الصنف الحبيبي السائد ومدى احتواء العينة على الحبيبات الدقيقة أو الخشنة، إضافةً إلى تقييم ملاءمتها للاستعمالات الصناعية المختلفة. ويوضح الشكل (1.III) التالي نتائج التحليل الحبيبي لعينة الرمل الطيبات.



الشكل (1.III): منحنى تسجيل لتصنيف الحبيبي لعينة رمل الطيبات

يُظهر منحنى التحليل الحبيبي الخاص بعينة رمل الكثبان الطيبات توزيعاً حجمياً متجانساً وضيقاً للغاية، حيث تقع الحبيبات المكونة للعينة بالكامل تقريباً ضمن نطاق الرمل الخشن والرمل الناعم. حيث تنحصر أقطار الحبيبات بشكل رئيسي بين 0.1 مم و1 مم ومن خلال القراءة البيانية للمنحنى، يُلاحظ أن القطر الأقصى لا يتعدى 2 مم، في حين تنعدم تماماً العناصر الحصوية الخشن وكذا العناصر الدقيقة جداً كالطيني والطين كما أن العينة تتميز بـ توزيع حبيبي ذي فرز جيد جداً



الشكل (2.III): تسجيل التصنيف الحبيبي لرمل ورقلة

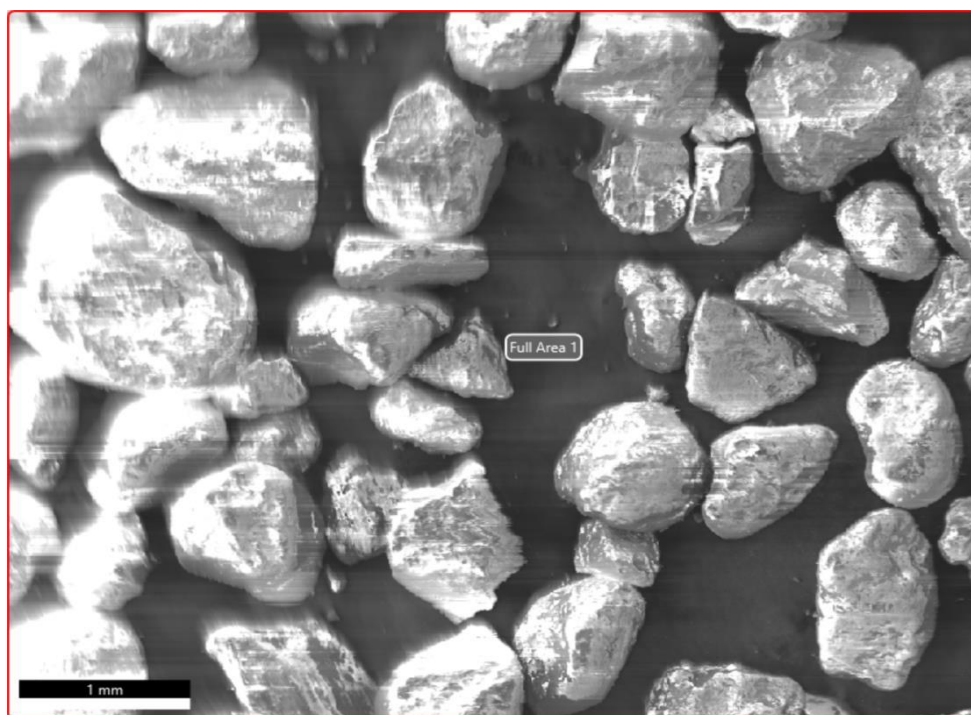
يظهر التسجيل الجهاز منحنى بياني للتدرج الحبيبي لعينة رمل ورقلة يمثل توزيعاً دقيقاً لتوزيع أقطار الحبيبات داخل العينة، حيث يظهر ان غالبية الحبيبات تقع ضمن المجال الرملية (0,063-2 مم) مع غياب شبه كلي للغرين والطين ما يدل على نقاوة العينة.

2.IV. نتائج المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)

من أجل دراسة الخصائص المورفولوجية والتركيب العنصري للعينات المدروسة، تم إجراء تحليل المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بتقنية التحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة (SEM-EDX) لكل من عينات الرمل المستخرجة من منطقتي الطيبات وورقلة، إضافة إلى عينات السيليكا جل المحضرة منهما. سمح هذا التحليل بدراسة شكل الحبيبات وطبيعة السطح ودرجة التجانس، إلى جانب تحديد العناصر الكيميائية المكونة للعينات ومقارنة درجة النقاوة قبل وبعد استخلاص السيليكا جل.

1.2.IV. نتائج SEM-EDX لعينة رمل الطيبات:

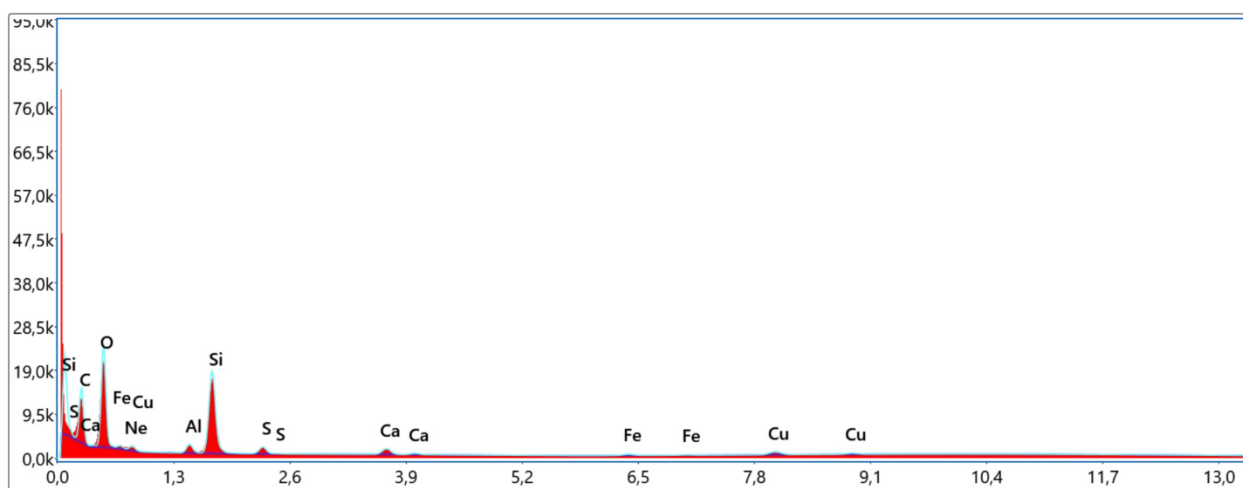
يظهر الشكل (3.III) صورة SEM لعينة رمل الطيبات أن الحبيبات ذات أحجام متقاربة نسبيًا وأشكال شبه زاوية إلى شبه مستديرة. كما تبدو أسطح الحبيبات خشنة وتحتوي على تشققات وآثار تكسير ميكانيكي ناتجة عن عملية السحق والطحن. ويُلاحظ كذلك غياب التكتلات الكبيرة مع وجود توزيع متجانس نسبيًا للحبيبات، مما يدل على فعالية عملية الطحن في تقليل حجم الحبيبات وزيادة المساحة السطحية للرمل.



الشكل (3.III): صورة SEM لرمل الطيبات

كما يعطي لنا التحليل بتقنية EDX أهم مكونات لعينة الرمل ونسبها:

اذ يظهر التحليل النوعي وجود عناصر أساسية أهمها الأكسجين (O) والسيليكون (Si)، مما يؤكد أن العينة غنية بمركبات السيليكا. كما أظهرت النتائج وجود بعض العناصر الشائبة بنسب ضعيفة مثل الألمنيوم (Al)، الحديد (Fe)، الكالسيوم (Ca) والنحاس (Cu)، وهي ناتجة عن المعادن المصاحبة للرمل الطبيعي.



الشكل (4.III): طيف EDX لرمل الطيبات

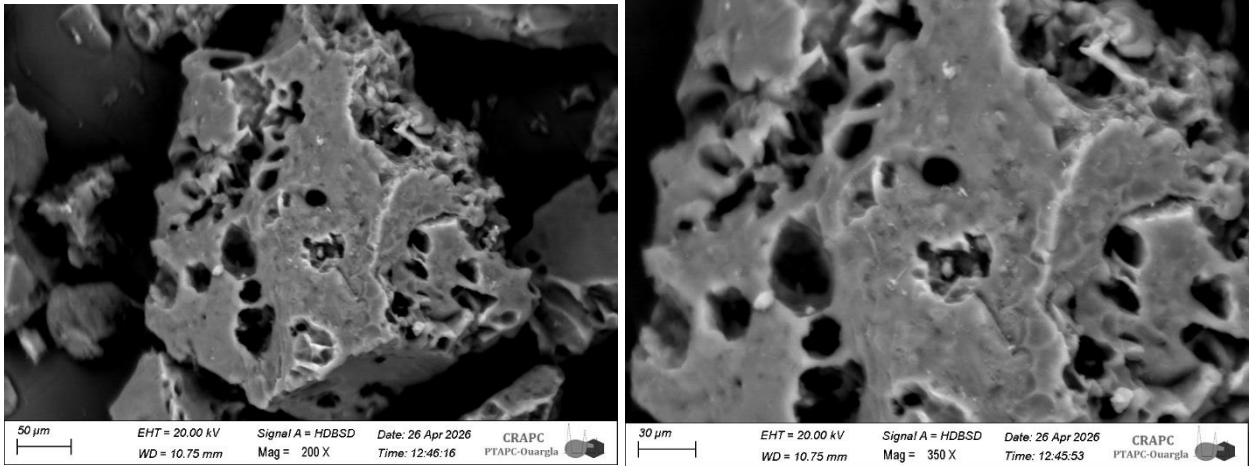
وتُظهر النتائج الكمية في الجدول (1.III) أن نسبة الأكسجين بلغت حوالي 44.55% ونسبة السيليكون حوالي 11.87%، مما يدل على احتواء العينة على كمية معتبرة من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2). كما تشير النسب المنخفضة للعناصر الأخرى إلى أن الرمل يتمتع بدرجة نقاوة جيدة نسبياً، الأمر الذي يجعله مناسباً لاستخلاص السيليكا وتحضير السيليكا جل.

Elément	% de masse
C K	33.43
O K	44.55
Al K	1.43
Si K	11.87

الجدول (1.III): التركيب العنصري لرمل الطيبات

2.2.IV. نتائج SEM-EDX لعينة سيليكات جل الطيبات:

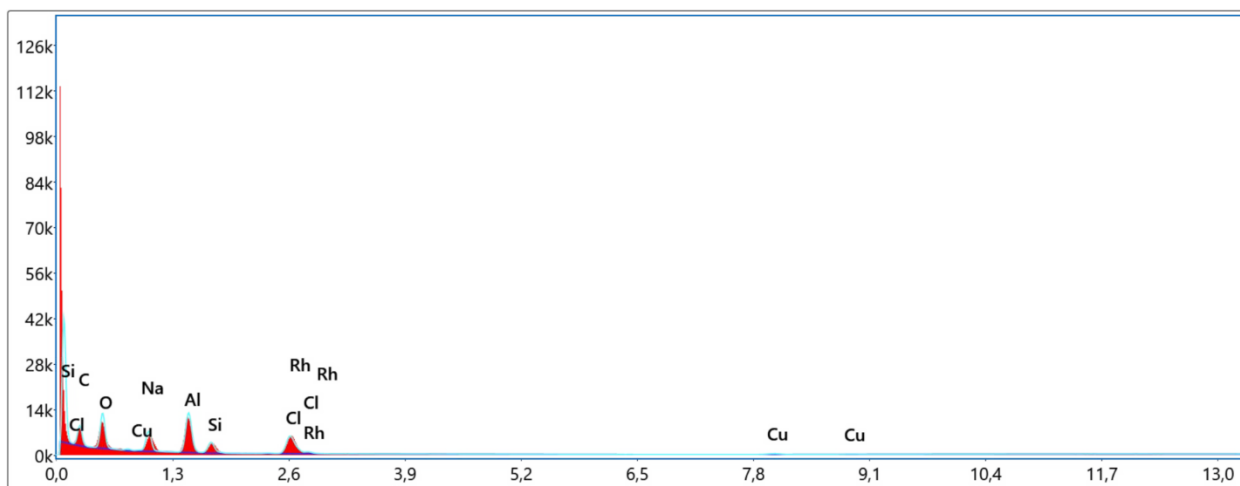
يظهر الشكل (5.III) صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) الخاصة بسيليكات جل عينة الطيبات بنية مورفولوجية مسامية واضحة، حيث تبدو العينة على شكل تكتلات غير منتظمة ذات سطح خشن وملئ بالثقوب والتجاويف. وتُلاحظ مسامات بأحجام مختلفة موزعة على كامل السطح، مما يمنح المادة مظهرًا إسفنجيًا مميزًا. كما تكشف الصور المكبرة عند $350\times$ عن وجود شبكة داخلية متداخلة من القنوات والفراغات الدقيقة، وهو ما يدل على ارتفاع المساحة السطحية النوعية للسيليكات جل



الشكل (5.III): صورة SEM لسيليكات جل الطيبات

كما يتيح التحليل بتقنية EDX تحديد أهم العناصر الكيميائية المكوّنة للعينة ونسبها التقريبية:

فقد أظهرت أن العينة تحتوي أساساً على عناصر الأكسجين والسيليكون، بالإضافة إلى نسب من الكربون والصوديوم والألمنيوم. حيث بلغت نسبة الأكسجين (31.62%) ونسبة السيليكون (3.63%)، بينما بلغت نسبة الكربون (27.48%)، والصوديوم (10.98%)، والألمنيوم (13.25%). وتشير قمم السيليكون والأكسجين في طيف EDX الشكل (6.IV) إلى وجود السيليكات داخل العينة، في حين يمكن تفسير وجود الصوديوم والألمنيوم ببقايا شوائب معدنية أو آثار المواد الكيميائية المستعملة أثناء التحضير



الشكل (6.III): طيف EDX لسيليكاجل الطيبات

Elément	% de masse
C K	27.48
O K	31.62
NaK	10.98
AlK	13.25
SiK	3.63

الجدول (2.III): التركيب العنصري لسيليكاجل الطيبات

كما أن ارتفاع نسبة الأكسجين مقارنة بالسيليكون يتوافق مع التركيب الكيميائي للسيليكاجل (SiO₂).

لحساب نسبة السيليكاجل التقريبية داخل العينة نحول نسبة السيليكون إلى ثاني أكسيد السيليكون:

- نسبة السيليكون في الجدول هي:

$$Si = 3.63\%$$

- نستعمل معامل التحويل من Si إلى SiO₂:

$$O_2 = \frac{M_{SiO_2}}{M_{Si}} = \frac{60.08}{28.08} \approx 2.14$$

اذن:

$$SiO_2 = 3.63 \times 2.14 \approx 7.77\%$$

حسنًا، إذا كانت:

- نسبة السيليكا النقية = 7.77 %
- كتلة السيليكا غير النقية = 16 g
- كتلة الرمل الأصلية = 10 g

فنحسب أولًا كتلة السيليكا النقية الحقيقية:

$$m_{SiO_2} = 16 \times \frac{7.77}{100} \approx 1.24g$$

ثم نحسب مردود الاستخلاص:

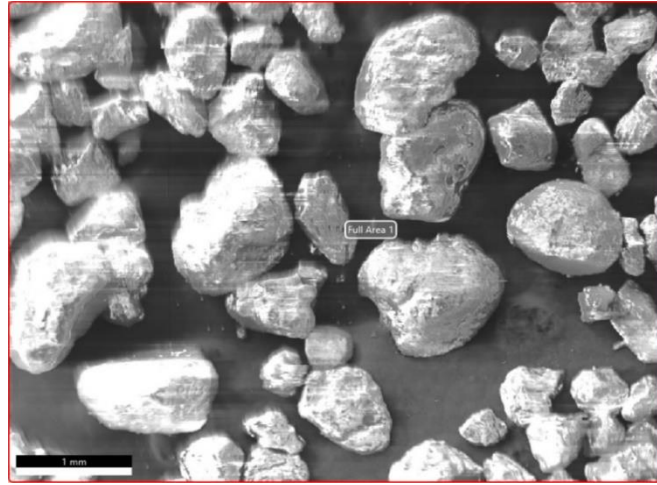
$$R(\%) = \frac{1.24}{10} \times 100 \approx 12.4\%$$

مردود الدراسة $\approx 12.4\%$

أي أن 10 غرامات من الرمل أعطت حوالي 1.24 غرام من السيليكا النقية الفعلية داخل السيليكا جل غير النقية.

3.2.IV. نتائج SEM-EDX لعينة رمل ورقلة:

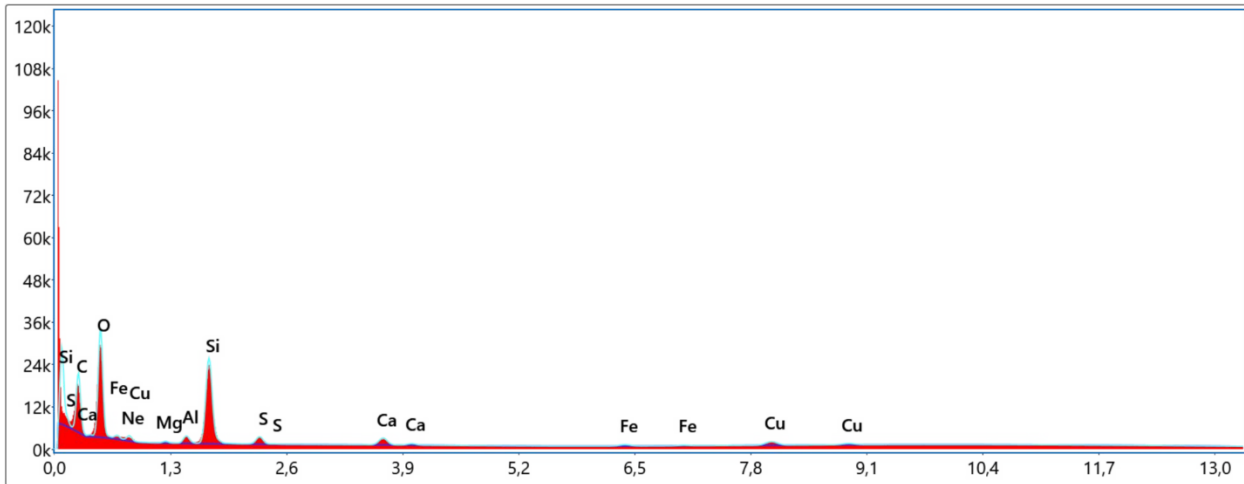
يظهر الشكل (7.III) صورة SEM لعينة رمل ورقلة أن الحبيبات ذات أشكال غير منتظمة تميل إلى شبه المستديرة مع وجود بعض الحواف الزاوية الناتجة عن تأثير التعرية والعوامل الميكانيكية. كما تبدو الحبيبات متقاربة نسبيًا في الحجم مع أسطح خشنة تحتوي على آثار تشققات وخدوش ناتجة عن الاحتكاك أثناء النقل الريحي. ويلاحظ كذلك تجانس نسبي في توزيع الحبيبات مع غياب واضح للتكتلات الطينية الكبيرة، مما يدل على نقاوة جيدة للرمل ورقلة.



الشكل (7.III): صورة SEM لعينة رمل ورقلة

كما تسمح تقنية EDX بالتعرف على التركيب العنصري للعينة وتحديد العناصر الرئيسية المكونة لها من أهمها:

اذ يبين الشكل (8.III) طيف EDX أن العينة تتكون أساساً من عنصري الأكسجين (O) والسيليكون (Si)، مما يؤكد غنى الرمل بمركبات السيليكا (SiO_2). كما ظهرت بعض العناصر الأخرى بنسب ضعيفة مثل الألمنيوم (Al)، المغنيسيوم (Mg)، الحديد (Fe)، الكالسيوم (Ca) والنحاس (Cu)، وهي تمثل شوائب معدنية طبيعية مرافقة للرمل.



الشكل (8.III): طيف EDX لرمل ورقلة

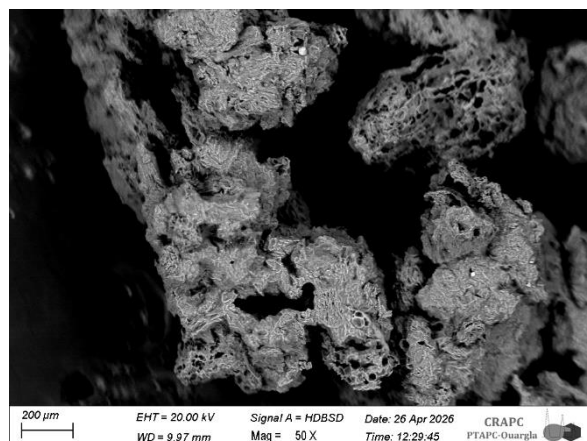
وأظهرت النتائج الكمية في الجدول (3.III) أن نسبة الأكسجين بلغت حوالي 44.12% بينما بلغت نسبة السيليكون حوالي 11.65%، وهي نسب متقاربة مع نتائج عينة الطيبات، مما يدل على احتواء رمل ورقلة أيضاً على كمية معتبرة من السيليكا. كما تشير الانخفاضات المسجلة في العناصر الشائبة إلى أن العينة تتمتع بدرجة نقاوة مناسبة لاستخلاص السيليكا وتحضير السيليكا جل.

Elément	% de masse
C K	33.20
O K	44.12
AlK	1.13
SiK	11.65

الجدول (3.III): التركيب العنصري لرمل ورقلة

4.2.IV. نتائج SEM-EDX لعينة سيليكا جل ورقلة:

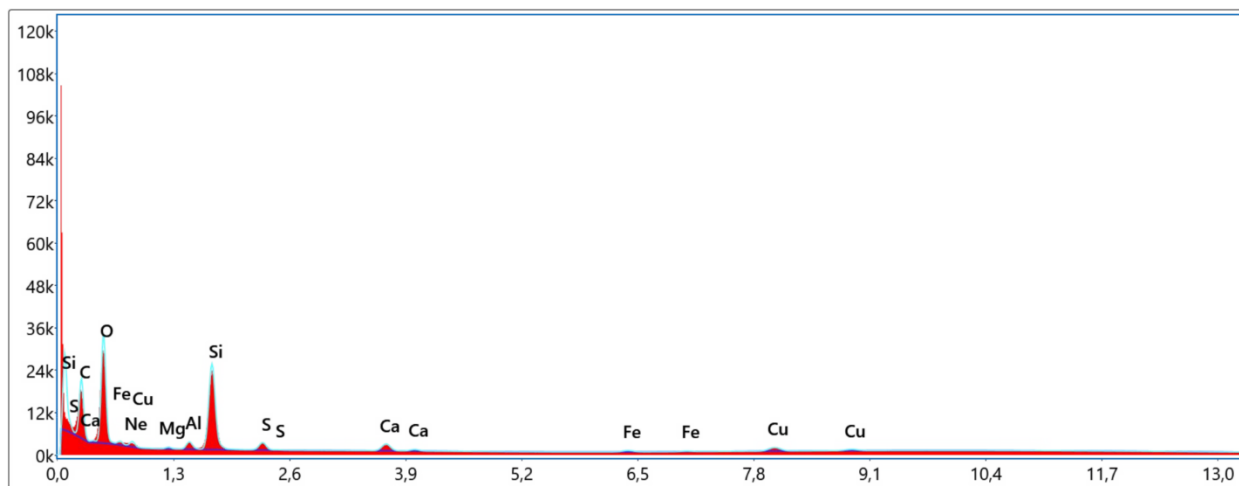
يظهر الشكل (9.III) صورة SEM لعينة سيليكا جل ورقلة بنية غير منتظمة ذات طبيعة إسفنجية ومسامية واضحة، حيث نلاحظ وجود فراغات ومسام منتشرة على سطح العينة. ويُعزى هذا التركيب المسامي إلى تشكل شبكة السيليكا أثناء عملية التحضير، وهو ما يُعد من الخصائص المميزة للسيليكا جل. كما تبدو الجزيئات متكثلة نسبياً مع أسطح خشنة وغير متجانسة، مما يدل على حدوث تغير واضح في البنية المورفولوجية مقارنة بالرمل الخام. وتساهم هذه المسامية المرتفعة في زيادة المساحة السطحية للسيليكا جل، وهو ما يمنحها قدرة جيدة على الامتزاز والاستعمال في التطبيقات الصناعية المختلفة.



الشكل (9.III): صورة SEM لسيليكا جل ورقلة

كما يعطي لنا التحليل بتقنية EDX أهم مكونات لعينة سيليكا جل ورقلة:

يبين الشكل (10.III) طيف EDX لعينة سيليكا جل ورقلة وجود عنصري الأكسجين (O) والسيليكون (Si) كعناصر أساسية، مما يؤكد تكوّن السيليكا داخل العينة. كما ظهرت بعض العناصر الأخرى مثل الصوديوم (Na) والألمنيوم (Al) بنسب متفاوتة، إضافة إلى آثار لعناصر أخرى تعود غالبًا إلى بقايا الكواشف الكيميائية أو الشوائب المعدنية المرافقة أثناء عملية التحضير.



الشكل (10.III): طيف EDX لسيليكا جل ورقلة

وأظهرت النتائج الكمية في الجدول (4.III) أن نسبة الأكسجين بلغت حوالي 30.50% بينما بلغت نسبة السيليكون حوالي 8.07%، في حين سُجلت نسبة معتبرة للألمنيوم والصوديوم. ويُفسر ذلك باحتمال بقاء بعض المركبات غير المتفاعلة أو حدوث تداخل لعناصر

مرافقة خلال عملية الاستخلاص والتحضير. ورغم وجود هذه الشوائب، فإن نتائج التحليل تؤكد نجاح تكوين السيليكا جل انطلاقاً من رمل ورقلة.

Elément	% de masse
C K	12.78
O K	30.50
NaK	10.43
AlK	16.31
SiK	8.07

الجدول (4.III): التركيب العنصري لسيليكا جل ورقلة

لحساب نسبة السيليكا (SiO_2) من نتائج EDX لا نعتمد على نسبة السيليكون وحده مباشرة، بل نحول نسبة عنصر السيليكون (Si) إلى نسبة ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2).

نسبة السيليكون في الجدول هي:

$$Si = 8.07\%$$

نستعمل معامل التحويل من Si إلى SiO_2 :

$$O_2 = \frac{M_{SiO_2}}{M_{Si}} = \frac{60.08}{28.08} \approx 2.14$$

إذن:

$$SiO_2(\%) = 8.07 \times 2.14 \approx 17.27\%$$

أي أن نسبة السيليكا التقريبية في العينة تساوي:

$$SiO_2 \approx 17.27\%$$

لدينا:

- كتلة الرمل الابتدائية = 10g
- كتلة السيليكا جل غير النقية = 16g

• نسبة السيليكا النقية داخلها = 17.27%

أولاً نحسب كتلة السيليكا النقية الحقيقية:

$$m_{\text{SiO}_2} = 16 \times \frac{17.27\%}{100} \approx 2.76\text{g}$$

ثم نحسب المردود:

$$R(\%) = \frac{2.76}{10} \times 100 \approx 27.6\%$$

إذن:

مردود استخلاص السيليكا النقية $\approx 27.6\%$

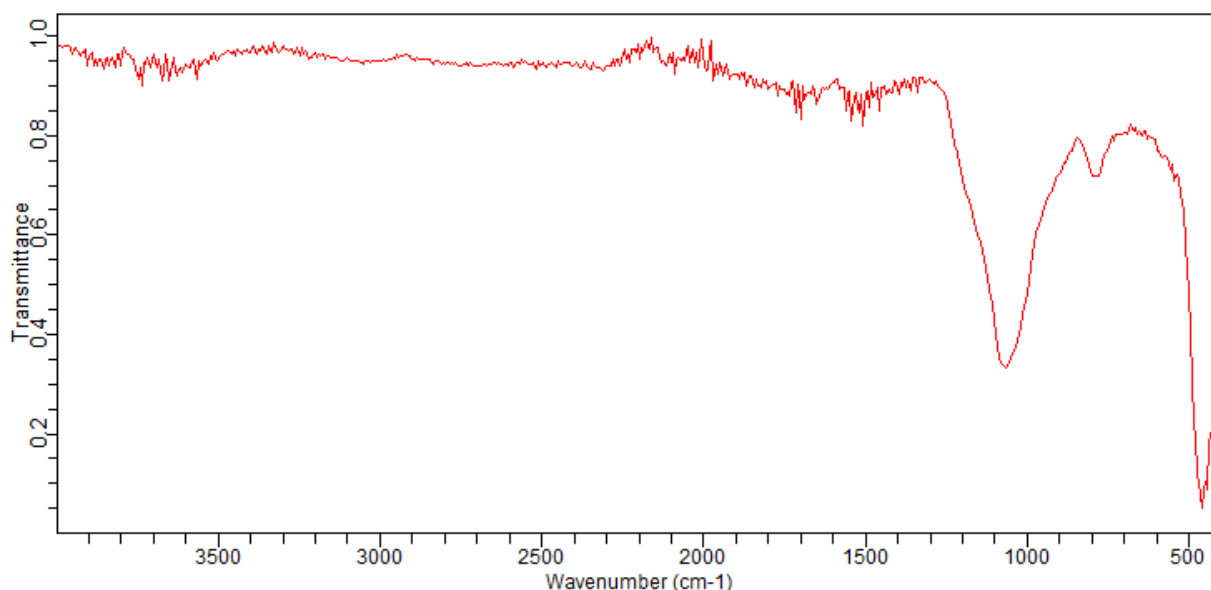
وهذا يعني أن كل 10 غرام من الرمل أعطت حوالي 2.76 غرام من السيليكا الفعالية النقية داخل السيليكا جل المحضرة.

3.IV. نتائج مطيافية الأشعة تحت حمراء بتحويل فورييه FTIR:

1.3.IV. نتائج FTIR لسيليكا جل لرمل ورقلة:

يمثل الشكل (11.III) طيف تحليل FTIR لعينة السيليكا جل المستخرجة من الرمل ورقلة، ويُظهر مجموعة من الحزم الامتصاصية المميزة لمركبات السيليكا. نلاحظ وجود حزمة امتصاص قوية وعميقة حول 1100–1000 cm^{-1} ، وهي تعود إلى اهتزازات التمدد غير المتماثل لرابطة Si–O–Si، وتُعد هذه الحزمة الدليل الأساسي على وجود بنية السيليكا. كما تظهر حزمة أخرى بالقرب من 800–790 cm^{-1} مرتبطة بالاهتزاز المتماثل لرابطة Si–O، بينما تعود الحزمة الموجودة قرب 500–460 cm^{-1} إلى اهتزازات الانحناء لرابطة Si–O–Si، وهي من الإشارات المميزة للسيليكا غير المتبلورة.

كذلك يمكن ملاحظة نطاق ضعيف وعريض في المنطقة 3400 cm^{-1} مع إشارة قرب 1630 cm^{-1} ، ويرتبط ذلك بوجود مجموعات الهيدروكسيل (OH) وجزيئات الماء الممتصة على سطح السيليكا جل، وهو أمر شائع بسبب الطبيعة المسامية والسطحية العالية لهذه المادة. كما أن غياب قمم قوية خاصة بالشوائب العضوية أو المعدنية يدل على نجاح عملية الاستخلاص والحصول على سيليكا جل بدرجة نقاوة جيدة نسبياً.

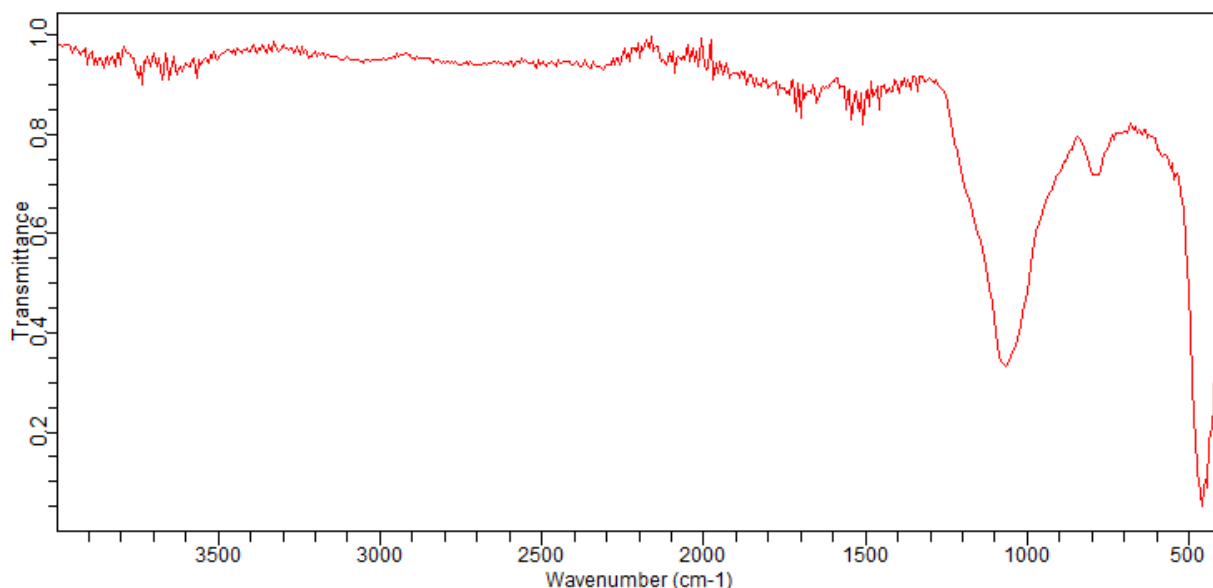


الشكل (11.III): طيف تحليل FTIR لعينة السيليكا جل المستخرجة من الرمل ورقلة

2.3.IV. نتائج FTIR لسيليكا جل لرمل طبيبات:

يبين الشكل (11.III) طيف FTIR لهذه العينة وجود الحزم الامتصاصية المميزة للسيليكا جل، حيث تظهر قمة قوية وواضحة في المجال $1100-1000\text{ cm}^{-1}$ ، وهي ناتجة عن اهتزازات التمدد غير المتماثل لرابطة Si-O-Si، وتُعد أهم دليل على تشكل بنية السيليكا. كما تظهر حزمة عند حوالي $800-790\text{ cm}^{-1}$ مرتبطة بالاهتزاز المتماثل لرابطة Si-O، بالإضافة إلى قمة واضحة قرب $500-460\text{ cm}^{-1}$ تعود إلى اهتزازات الانحناء لرابطة Si-O-Si، وهي من الخصائص المعروفة للسيليكا غير المتبلورة.

ويُلاحظ أيضاً وجود نطاق ضعيف وعريض في المنطقة 3400 cm^{-1} ، مع إشارة قرب 1630 cm^{-1} ، ويعود ذلك إلى اهتزازات مجموعات الهيدروكسيل (OH) وجزيئات الماء الممتصة على سطح السيليكا جل، نتيجة الطبيعة المسامية العالية للمادة. كما أن انخفاض شدة القمم الخاصة بالشوائب يدل على تحسن نقاوة العينة بعد عملية التحضير.



الشكل (12.III): طيف تحليل FTIR لعينة السيليكا جل المستخرجة من الرمل طبيبات

ومن أجل التحليل الطيفي، يكفينا تحديد أطوال الموجات الممتصة الموافقة للمجموعات الوظيفية الموجودة في العينة، وذلك ما يتوافق مع الدراسات السابقة. [1] [2]

4.IV. نتائج حيود الأشعة السينية XRD:

تُبيّن أنماط حيود الأشعة السينية (XRD) لهلامات السيليكا الموضحة في الشكلين ((12.III) ((13.III)) أن العينات المحضرة تمتلك بنية شبه غير متبلورة، حيث يظهر انتفاخ واسع أو هالة غير متبلورة متمركزة تقريباً عند الزاوية $2\theta = 21^\circ$ ، وهي سمة مميزة للسيليكا غير المتبلورة. ويؤكد ذلك نجاح عملية تحضير هلام السيليكا مع فقدان الانتظام البلوري بعيد المدى.

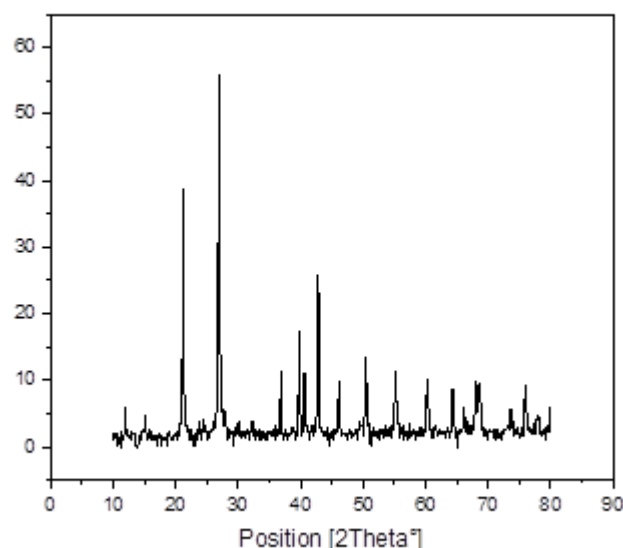
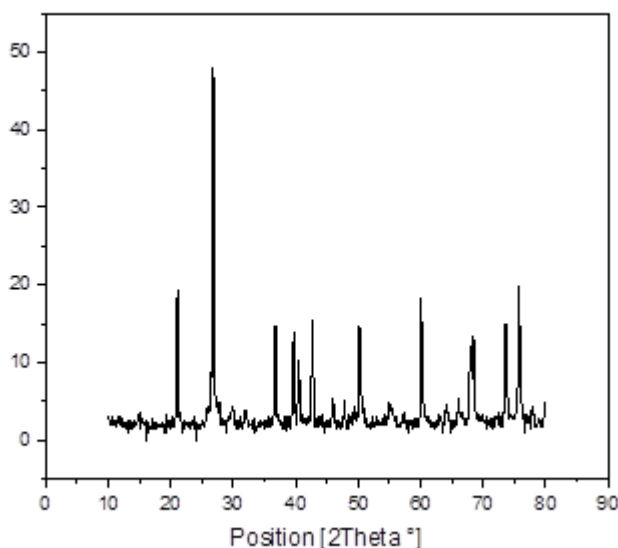
ورغم الطابع غير المتبلور السائد، تُلاحظ بعض القمم الحادة ذات الشدة المرتفعة، ما يدل على وجود طور متبلور متبقّي داخل العينات، يُعزى أساساً إلى معدن الكوارتز. كما تشير القمم الظاهرة قرب الزاوية $2\theta = 28^\circ$ إلى بقاء آثار من معادن الفلسبارات، ويُحتمل أن يكون ذلك ناتجاً عن عدم اكتمال عملية الصهر القلوي وعدم ذوبان جميع المكونات المعدنية للرمال الأولية بشكل كامل.

وتُعد الفلسبارات من أهم المعادن السيليكاتية الألومينية (Aluminosilicates)، إذ تتكون أساساً من السيليكون والألومنيوم والأكسجين، إضافة إلى عناصر قلوية أو قلوية ترابية مثل البوتاسيوم والصوديوم والكالسيوم. وتمثل هذه المعادن النسبة الأكبر من معادن القشرة الأرضية، حيث تشكل حوالي 50-60% من مكوناتها.

ومن الناحية البنيوية، تنتمي الفلسبارات إلى معادن التكتوسيليكات (Tectosilicates)، وتمتلك بنية شبكية ثلاثية الأبعاد مكوّنة من وحدات رباعية السطوح (SiO_4) و(AlO_4) المترابطة عبر ذرات الأكسجين المشتركة، مع وجود كاتيونات موجبة مثل K^+ و Na^+ و Ca^{2+} لمعادلة الشحنة الناتجة عن إحلال الألومنيوم محل السيليكون داخل الشبكة البلورية. أما الصيغة الكيميائية العامة للفلسبارات فتكتب على الشكل:



حيث يمثّل الرمز M أحد العناصر القلوية أو القلوية الترابية مثل البوتاسيوم (K) أو الصوديوم (Na) أو الكالسيوم (Ca).



الشكل (13.III): طيف XRD لسيليكات جل ورقلة الشكل (14.III): طيف XRD لسيليكات جل طبيبات

المراجع

- [1] Petreanu, I., Niculescu, V.-C., Enache, S., Iacob, C., & Teodorescu, M. (2023). *Structural characterization of silica and amino-silica nanoparticles by Fourier transform infrared (FTIR) and Raman spectroscopy*. Analytical Letters, 56(3), 390–403.
- [2] Schaller, J., Stein, M., & Ellerbrock, R. (2022). *Comparison of amorphous silica, short-range-ordered silicates, and silicic acid species by FTIR*. Scientific Reports, 12(1), Article 11708.

الخلاصة العامة وآفاق مستقبلية

الخلاصة العامة:

في ختام هذه الدراسة، تم التطرق إلى موضوع استخراج السيليكا وتحضير السيليكا جل انطلاقاً من الرمال الصحراوية الجزائرية، لما لهذا المجال من أهمية علمية وصناعية واقتصادية كبيرة. وقد هدفت هذه الدراسة إلى تثمين الموارد الطبيعية المحلية، خاصة الرمال الصحراوية المتوفرة بكثرة في منطقتي ورقلة والطيبات، واستغلالها كمصدر أولي للحصول على مواد ذات قيمة مضافة عالية.

أظهرت النتائج المتحصل عليها من مختلف التحاليل الفيزيائية والكيميائية نجاح عملية استخراج السيليكا وتحضير السيليكا جل، حيث أكدت نتائج تحليل DRX وجود طور الكوارتز في العينات الرملية، بينما أبرزت نتائج FTIR الروابط الكيميائية المميزة للسيليكا مثل Si-O-Si و Si-OH. كما أوضحت صور SEM أن السيليكا جل المحضرة تمتلك بنية سطحية غير منتظمة ومسامية، وهي من أهم الخصائص التي تمنحها قدرة عالية على الامتزاز. إضافة إلى ذلك، بين تحليل EDX ارتفاع نسبة السيليكون والأكسجين وانخفاض نسبة الشوائب مقارنة بالرمل الخام، مما يدل على فعالية طريقة التحضير والتنقية المستعملة.

ومن خلال هذه النتائج يمكن القول إن الرمال الصحراوية الجزائرية تمثل مادة أولية واعدة لاستخلاص السيليكا وتحضير السيليكا جل بخصائص جيدة، الأمر الذي يفتح المجال أمام استغلالها في عدة تطبيقات صناعية وبيئية مثل التجفيف، الامتزاز، معالجة المياه، والصناعات الكيميائية والإلكترونية.

وفي الأخير، تبقى هذه الدراسة خطوة أولية يمكن تطويرها مستقبلاً من خلال تحسين طرق التحضير والتنقية، وإجراء تحاليل إضافية لدراسة المساحة السطحية والمسامية بدقة أكبر، بالإضافة إلى توسيع مجالات استعمال السيليكا جل المحضرة محلياً في التطبيقات الصناعية المختلفة.

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى استخراج السيليكا وتحضير السيليكا جل انطلاقاً من الرمال الصحراوية الجزائرية، مع دراسة خصائصها الفيزيائية والكيميائية والبنوية باستعمال عدة تقنيات تحليلية حديثة. وقد تم اختيار عينات رملية من منطقتي ورقلة والطيبات نظراً لغناها بالسيليكا وإمكانية استغلالها صناعياً.

شمل الجانب النظري التعريف بالرمال والسيليكا والسيليكا جل، إضافة إلى خصائصها وأهم تطبيقاتها الصناعية. أما الجانب التطبيقي فقد تضمن تحضير السيليكا والسيليكا جل ثم توصيف العينات باستخدام تقنيات DRX و FTIR و SEM و EDX.

أظهرت النتائج وجود طور الكوارتز في الرمال، كما أكدت تحاليل FTIR الروابط الكيميائية المميزة للسيليكا، بينما بينت صور SEM الطبيعة المسامية للسيليكا جل. كذلك أوضح تحليل EDX ارتفاع نسبة السيليكون والأكسجين مع انخفاض الشوائب بعد التحضير.

وقد بينت الدراسة أن الرمال الصحراوية الجزائرية تمثل مصدراً واعداً لاستخراج السيليكا وتحضير السيليكا جل ذات خصائص جيدة، مما يفتح المجال لاستعمالها في العديد من التطبيقات الصناعية والبيئية.

Summary:

This study aims to extract silica and prepare silica gel from Algerian desert sands, investigating their physical, chemical, and structural properties using several modern analytical techniques. Sand samples were selected from the Ouargla and Tayebat regions due to their silica richness and potential for industrial exploitation.

The theoretical section included a definition of sand, silica, and silica gel, as well as their properties and key industrial applications. The practical section involved the preparation of silica and silica gel, followed by sample characterization using DRX, FTIR, SEM, and EDX spectroscopy techniques.

The results showed the presence of a quartz phase in the sands. FTIR analysis confirmed the characteristic chemical bonds of silica, while SEM images revealed the porous nature of the silica gel. EDX analysis also demonstrated a high silicon and oxygen content with low impurity levels after preparation.

The study indicates that Algerian desert sands represent a promising source for extracting silica and preparing silica gel with favorable properties, opening the door to its use in numerous industrial and environmental applications.