

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

رقم الترتيب:

رقم التسلسل:



جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي
كلية العلوم الدقيقة
قسم: الفيزياء
مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة



ماستر أكاديمي

ميدان: علوم المادة
تخصص: فيزياء إشعاعات وطاقة
من إعداد الطالبتين:
رحومة شهيرة – رحومة عفاف
الموضوع

تحسين الخصائص الحرارية والميكانيكية لجبس الفولية
بالوادي المستعمل في البناء

نوقشت يوم: 2025/05/28

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيساً	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي	أستاذ محاضر - ب -	الأرقط حنان
مناقشاً	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي	أستاذ محاضر - ب -	ريحية غاني
مشرفاً	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي	أستاذ تعليم عالي	محبوب محمد الصادق

الموسم الجامعي 2025/2024

أنجز هذا العمل في مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قوله تعالى

﴿ فَتَعَالَى اللَّهُ الْمَلِكُ الْحَقُّ وَلَا تَعْجَلْ بِالْقُرْآنِ

مِنْ قَبْلِ أَنْ يُقْضَىٰ إِلَيْكَ وَحْيُهُ وَقُلْ رَبِّ

زِدْنِي عِلْمًا ﴿ طه الآية 114

الإهداء

لم تكن الرحلة قصيرة ولا الطريق محفوف بالتسهيلات
لكنني فعلتها فالحمد لله الذي يسر البدايات وبلغنا النهايات بفضلته وكرمه وجوده.
فأهدي عملي المتواضع هذا لنفسى الطموحة أولاً التي جاهدت
بما أتاهها الله من قوة لإتمام المسير بدون خطأ ولا فتور
وإلى القمر الذي أنار عتمتي وأضاء دربي وخط بكده وتعبه
طريقي من أجل أن أعتلي سلالمة النجاح وإلى الذي أحمل أسمه بكل فخرٍ ولطالما عاهدته بهذا
النجاح ها أنا أتممت وعدي وأهديته إياك من سواه حبيب عيني أبي الغالي
وإلى جنتي فى الأرض التي علمتني الأخلاق قبل الحروف، الداعمة الأولى فى حياتي قررة عيني
ومهجة فؤادي ومصدر قوتي أمي الحبيبة
وإلى جند الخفاء الذي لن أنسى لمستته على مذكرتي وتعبه معي إلى أبي الثاني

عمي الصادق

وإلى النبض الذي شاركني كل حياتي والحب الذي ملأ أركان قلبي إلى ملهمي
نجاحي ومن ساندي بكل حب أخواتي وعلى رأسهن
نوال وتليها مريم، خولة، سناء، صارة، صباح، حليلة، بثينة
ولن أنسى أخواني سندي وكتفي الذي أستند عليه دائماً شموع بيتنا وأعمدة دنيانا
فى الأحزان قبل الأفراح أخواني عبد الرحمان، بدر الدين، ناجي،
وإلى رفيقة الدرب التي لولاها ما اكتملت القصة ولا انتهى المشوار صديقتي

شهيره رحومة

ثم إلى كل من سعى معي لإتمام مسيرتي الجامعية ليدعمني من بعيد ومن قريب شكراً من كل
قلبي وآخر دعوانا أن الحمد لله وما توفيقنا إلا به سبحانه وتعالى.

رحومة حفافه

الإهداء

إلى هديتي من الله، والنعمة الكبيرة التي أعيشها، أمي وأبي، إليكما أهدي هذه
المذكرة، عسى أن تكون صدقة جارية تحني وحنكما
إلى ونسي، وأمانتي وأمانتي، أنتم البيت لما أتعب. أخوتي وأخواتي كل واحد
باسمه

إلى من أستمر بالتقدم لأجله، قرّة عيني أبنّي محمد نزال أهدي هذا البحث
إلى أولئك الذين يفرحهم نجاحنا، أهدي هذا البحث إلى الأقارب قلوبًا وكدًا ووفاء.
إلى رفقاء الحرب الرائعين الذين شاركوني هذه الرحلة التعليمية وأخص بالذكر
صديقتي في هذا العمل "رحومة عفافه"

رحومة شهيرة



الشكر والتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوفيقه تُنال الغايات، وبعد رحلة مليئة بالتحديات أود أن نتقدم بجزيل الشكر والعرفان لكل من كان له دور في دعمنا وتشجيعنا خلال هذا العمل وعلى رأسهم الأستاذ الدكتور "**محبوب محمد الصادق**"

لما وجدنا منه من دعمٍ علمي، وتوجيهٍ كريم، وتشجيعٍ مستمر، كان له الأثر البالغ في إنجاز هذا العمل. كما نتقدم بفائق الشكر والتقدير للدكتورة "**الأرقت حنان**" رئيسة لجنة المناقشة لتكرمها بقبول مناقشة هذه المذكرة، وتخصيص جزء من وقتها الثمين للاطلاع عليها وإبداء الرأي والملاحظات العلمية. كما نتقدم بخالص الشكر والتقدير للدكتور "**غاني ريميه**" لتفضله بقبول مناقشة هذه المذكرة، ولما تكرم به من وقته وجهده ونصحه لنا.

كما نتوجه بالشكر الجزيل لكل من الاستاذ الدكتور "**عطية عبد المالك**"، الدكتور "**جديد طارق**"، الدكتور "**غري محمد الطاهر**" والدكتور "**منصر رضا**" بكلية التكنولوجيا. وشكرا خاص للأستاذ "**غوقالي مبروك**" على إرشاداته القيّمة.

كما لا يسعنا إلا أن أعبر عن شكرنا وامتناننا لأعضاء مخر استغلال و تثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES) وعلى رأسهم المدير الأستاذ الدكتور "**محبوب محمد الصادق**" على كل التسهيلات التي قدمها لنا، دون أن ننسى المهندس "**قده عثمان**" كما لا يفوتنا ان نشكر المهندسة "**غانم كزة**".

وأخيراً، نرفع أسمى معاني الشكر والتقدير لكل من ساهم، ولو بكلمة، في دعمنا وتحفيزنا خلال مسيرتنا الأكاديمية. دمتم جميعاً فخرًا لنا، وعودًا لغيرنا، وأسأل الله أن يكتب لنا ولكم التوفيق دائماً

فهرس المحتويات

I	الإهداء.....
II	شكر وتقدير.....
III	فهرس المحتويات.....
IX	فهرس الأشكال.....
XII	فهرس الجداول.....
XIII	فهرس الرموز.....
2	مقدمة عامة.....
5	قائمة مراجع المقدمة العامة.....

"الجزء النظري"

الفصل الاول: دراسة نظرية عن مادة الجبس وخصائصه

7	1-I-1- مقدمة.....
7	2-I-1- نبذة تاريخية حول الجبس.....
8	1-2-I-1- الجبس في الحضارات القديمة.....
9	2-2-I-2- الجبس عبر العصور.....
10	3-2-I-3- التطبيقات الأولى للجبس.....
11	3-I-3- الجبس في منطقة الفولية.....
11	1-3-I-1- الوصف الجيولوجي لمنطقة الفولية.....
12	2-3-I-2- ظهور مادة الجبس في ولاية الوادي.....
13	3-3-I-3- مميزات الجبس المحلي مقارنة بالجبس في مناطق أخرى.....
13	1-3-3-I-1- الجبس المحلي (جبس الفوليه).....
14	2-3-3-I-2- جبس باريس Plaster of Paris.....
14	4-I-4- المفاهيم الأساسية.....
14	1-4-I-1- التركيب الكيميائي لمادة الجبس.....
16	2-4-I-2- الخصائص الحرارية للجبس.....
16	3-4-I-3- الخصائص الميكانيكية للجبس.....
17	4-4-I-4- تأثير الرطوبة والظروف البيئية على الجبس المستخدم في البناء.....

18.....	5-I- خاتمة الفصل الاول.....
	الفصل الثاني: الوسائل والطرق المستعملة
23.....	1-II- تمهيد.....
23.....	2-II- الأشعة السينية.....
23.....	1-2-II- تعريف الأشعة السينية.....
23.....	2-2-II- نبذة تاريخية للأشعة السينية.....
24.....	3-2-II- آلية توليد الأشعة السينية.....
25.....	1-3-2-II- المهبط (Cathode).....
25.....	2-3-2-II- المصعد (Anode) أو مادة الهدف.....
25.....	3-3-2-II- نظام التبريد.....
27.....	4-2-II- مبدأ انعراج الأشعة السينية XRD.....
27.....	1-4-2-II- قانون براغ.....
28.....	5-2-II- الطرق التجريبية لانعراج الأشعة السينية المستخدمة.....
29.....	6-2-II- خصائص الأشعة السينية.....
30.....	7-2-II- تطبيقات الأشعة السينية.....
30.....	3-II- فلورة الأشعة السينية.....
31.....	1-3-II- تقنية التحليل الطيفي باستخدام فلورية الأشعة السينية (XRF).....
31.....	2-3-II- مبدأ عمل تقنية فلورية الأشعة السينية (XRF).....
32.....	3-3-II- جهاز الفلورة.....
32.....	4-3-II- مطيافية فلور الأشعة السينية.....
33.....	5-3-II- الكشف عن الأشعة السينية المتفلورة.....
33.....	6-3-II- التحليل الكمي والنوعي لنتائج تقنية الفلورة.....
34.....	7-3-II- آلية فحص العينات باستخدام (XRF).....
34.....	4-II- مطيافية امتصاص الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR).....
34.....	1-4-II- الأشعة تحت الحمراء.....
35.....	2-4-II- مصادر الأشعة تحت الحمراء.....
35.....	3-4-II- مبدأ مطيافية الأشعة تحت الحمراء.....
36.....	4-4-II- أنواع الحركات الاهتزازية.....

36.....	II-4-4-1- الاهتزازات التمديدية (Stretching Vibrations)
37.....	II-4-4-2 الاهتزازات الانحنائية (Bending Vibrations)
37.....	II-5-5- جهاز قياس الموصلية الحرارية.....
37.....	II-5-1- تعريف جهاز قياس الموصلية الحرارية.....
37.....	II-5-2- أمثلة على أجهزة القياس.....
38.....	II-5-3- الجهاز المستعمل في التجربة.....
38.....	II-5-4- مبدأ عمل الجهاز.....
39.....	II-5-5- أهمية القياس.....
39.....	II-6-6- جهاز الشد والضغط.....
39.....	II-6-1- تعريف جهاز الشد والضغط.....
40.....	II-6-2- مبدأ العمل.....
40.....	II-6-3- الاستخدامات.....
41.....	II-7- الخاتمة.....

"الجزء التجريبي"

الفصل الثالث: الدراسة البنيوية والتركيبية للجبس

46.....	III-2- تحضير عينات الدراسة البنيوية.....
47.....	III-3- تحليل إنعراج الأشعة السينية (XRD).....
49.....	III-4- نتائج إنعراج الأشعة السينية XRD.....
49.....	III-4-1- تحسين نتائج الانعراج بطريقة "Rietveld".....
49.....	III-4-1-1- طريقة ريتفالد (Rietveld).....
50.....	III-4-1-2- معالجة البيانات باستعمال برنامج Rex – Powder Diffraction.....
51.....	III-5- نتائج التحليل الطيفي للعينة بتقنية XRF.....
52.....	III-6- تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR).....
53.....	III-7- مناقشة النتائج.....
53.....	III-7-1- مناقشة نتائج الأشعة السينية.....
54.....	III-7-2- مناقشة نتائج المتحصل عليه للأشعة تحت الحمراء (FTIR).....
55.....	III-8- تحضير العينات.....

55.....	III -8-1- تحضير العينات في المرحلة الاولى
57.....	III-8-2- تحضير العينات في المرحلة الثانية
57.....	III -8-3- تحضير النماذج في المرحلة الثالثة
59.....	III-9- الخاتمة
الفصل الرابع: دراسة النتائج ومناقشتها	
62.....	IV -1- المقدمة
62.....	1- تجارب ميكانيكية
62.....	2- تجارب حرارية
62.....	IV -2- اختبار خواص العينات الميكانيكية (مقاومة الانحناء والضغط)
64.....	IV-3- تجربة التوصيل الحراري (قياس الناقلية الحرارية)
66.....	IV-4- قياس درجة الحرارة T
70.....	IV-5- دراسة تغير الكتلة بعد التعرض للرطوبة
72.....	IV-6- مناقشة النتائج
72.....	IV -6-1- تجربة الانحناء
72.....	IV -6-2- تجربة الضغط
73.....	IV -6-3- اختبار العزل الحراري
74.....	IV -6-4- تجربة الرطوبة
75.....	IV -6-5- الاستنتاج العام
75.....	IV -7- الخلاصة
77.....	قائمة مراجع الفصل الرابع
79.....	خاتمة عامة
82.....	الملاحق
87.....	الملخص

فهرس الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	ترتيب الشكل
الفصل الأول		
3	أهرامات الجيزة بمصر	(1-I)
3	تمثال نفرتيتي الشهير المصنوع من الحجر الجيري	(2-I)
5	تشاتال هويوك تطل على سهل قونية جنوب شرق مدينة قونية الحالية بتركيا	(3-I)
5	هرم الجيزة الأكبر (خوفو) على بطاقة بريدية من القرن 19	(4-I)
6	يوضح قلعة ستمنستر (بيوت البرلمان) بالمملكة المتحدة	(5-I)
8	مسجد سيدي مسعود الشابي بولاية الوادي	(6-I)
8	من أقدم مساجد الوادي (مأخوذة من أرشيف الوادي)	(7-I)
9	غرف مصنوعة من الجبس المحلي في قلب الغيطان	(8-I)
10	جبس (جص) باريس	(9-I)
11	بلورة الجبس	(10-I)
11	حجارة جبس منطقة الوادي	(11-I)
11	حجارة جبس منطقة تيميمون	(12-I)
11	حجارة جبس ولاية تقرت	(13-I)
13	صور توضح آثار الرطوبة والتآكل على الأسقف والجدران	(14-I)
14	صورة توضح آثار التعفن على الأسقف	(15-I)
الفصل الثاني		
20	كونراد رونتنغن أستاذ بجامعة فورتسبورغ	(1-II)
21	الاجزاء الاساسية في مولد الاشعة السينية	(2-II)
22	يوضح طرق توليد الاشعة الانكباحية	(3-II)

الصفحة	عنوان الشكل	ترتيب الشكل
23	يوضح كيفية توليد الأشعة السينية المستمرة	(4-II)
24	انتشار الأشعة السينية بين مستويين متوازيين بمسافة فاصلة d	(5-II)
26	صور لمناطق مختلفة لجسم الإنسان بواسطة الأشعة السينية	(6-II)
27	المبدأ الأساسي لفلورة الأشعة السينية	(7-II)
27	ظاهرة اصدار أشعة الفلورة	(8-II)
29	يوضح آلية التأين لمعالجة البيانات في جهاز الحاسوب	(9-II)
31	امتصاص الأشعة تحت الحمراء	(10-II)
32	اهتزازات التمدد	(11-II)
32	يوضح أنماط الانحناء	(12-II)
33	الجهاز الموصلية الحرارية المستعمل في التجربة	(13-II)
34	صورة توضح حامل عينة والعينة والحساس المرن	(14-II)
35	صورة الجهاز مع العينة	(15-II)
الفصل الثالث		
41	جس الفوليه الصناعي	(1-III)
42	تحضير عينات المرحلة البنيوية	(2-III)
42	مخطط يوضح المرحلة البنيوية	(3-III)
43	جهاز الانعراج الآلي للأشعة السينية من نوع (PROTO AXRD Benchtop powder diffraction)	(4-III)
44	حامل العينة داخل الجهاز	(5-III)
44	الحاسوب المتصل بجهاز (XRD)	(6-III)

الصفحة	عنوان الشكل	ترتيب الشكل
45	مخطط إنعراج الأشعة السينية لعينة من جبس الفولية	(7-III)
47	النتيجة النهائية لتحسين ريتفاد لمخطط إنعراج العينة من جبس الفولية	(8-III)
49	جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)	(9-III)
50	طيف الأشعة تحت الحمراء للعينة Gy-3	(10-III)
52	تحضير الإضافات	(11-III)
53	طرق تحضير العينات في المرحلة الثانية	(12-III)
54	طرق تحضير عينات في المرحلة الثالثة	(13-III)
56	طرق تحضير عينات في المرحلة الرابعة	(14-III)
الفصل الرابع		
60	آلة اختبار الانحناء والضغط	(1-IV)
61	تجربة الموصلية الحرارية باستخدام جهاز THB	(2-IV)
63	الجهاز الخاص بتسجيل درجات الحرارة في تجربة العزل الحراري	(3-IV)
63	أخذ القياسات داخل المخبر	(4-IV)
63	أخذ القياسات في الهواء الطلق	(5-IV)
65	منحنيات تغير درجة الحرارة T بدلالة الزمن للنماذج داخل المخبر	(6-IV)
66	منحنيات تغير درجة الحرارة T بدلالة الزمن للنماذج في الهواء الطلق	(7-IV)
67	تجربة الرطوبة	(8-IV)

فهرس الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	ترتيب الجدول
الفصل الثالث		
46	نتيجة التحليل الطيفي باستعمال تقنية XRF لعينة من الجبس	(1-III)
48	نطاقات الامتصاص المميزة في طيف FTIR لعينة من الجبس (CaSO ₄ .2H ₂ O)	(2-III)
49	نتائج تحسين ريفالدم لمخطط (XRD) تتضمن عوامل الثقة ونسبة تواجد الأطوار للعينة Gy-1	(3-III)
51	المقادير الوزنية الدقيقة لتحضير خلطة قالب صغير	(4-III)
الفصل الرابع		
59	نتائج تجربة الانحناء	(1-IV)
59	نتائج تجربة الضغط	(2-IV)
62	قيم الموصلية الحرارية لجبس	(3-IV)
62	قيم الموصلية الحرارية المتوسطة لعينات من جبس الفولية بدون وبوجود الإضافات وجبس أولاد جلال النقي	(4-IV)
68	جدول يحتوي على المتوسط الحسابي لكتل العينات قبل وبعد التعرض للرطوبة والنسب المئوية للتغير في الكتلة	(5-IV)

فهرس الرموز

❖ الرموز

- λ طول الموجة (Å)
- Å أنغستروم ويساوي 10^{-10} m
- n رتبة الانعراج (الحيود)
- d_{hkl} المسافة الشبكية لمجموعة المستويات hkl [Å]
- Θ زاوية الانعراج لبراغ [°]
- I شدة الاصدار
- K معامل التناسب
- C تركيز العنصر في العينة
- GoF معامل التوافق أو معامل وجود التطابق
- R_{WP} عامل موثوقية الشكل الجانبي الموزون
- R_{exp} عامل الموثوقية المتوقع
- N عدد النقاط في طيف انعراج المسحوق المشاهد.
- P عدد الوسائط المحسنة
- W_i عامل التوازن
- Y_i^{obs} الشدة الملاحظة
- Y_i^{calc} الشدة المحسوبة
- R_f مقاومة الانحناء بـ MPa
- F القوة المطبقة على العينة بـ KN
- L المسافة بين نقطتي الارتكاز بـ cm
- b عرض العينة بـ cm
- h ارتفاع العينة بـ cm
- σ الانحراف المعياري للعينة
- n عدد القيم في العينة
- x_i كل قيمة في العينة
- \bar{x} المتوسط الحسابي للعينة

❖ الاختصارات

- X-ray الأشعة السينية
- XRD انعراج الأشعة السينية
- XRF الأشعة السينية الفلورية
- FTIR تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء (Fourier Transform InfraRed)

المقرمة العامة

مقدمة عامة

الجبس معدن طبيعي يعد حجر الزاوية في البناء لقرون عديدة. لكن شعبيته الدائمة ليست مجرد انعكاس للتقاليد في المباني الحديثة، بل يظل مادة متنوعة ودائمة وفعالة من حيث التكلفة مما يجعله خياراً جذاباً للمشاريع. وتكمن أهمية الجبس في تحمل جدرانه وأسقفه اختبار الزمن، مما يوفر عنصر بناء يدوم طويلاً ومستقر [1]. ويعد الجبس من الخامات الأرضية الشائعة وهو من أكثر معادن الكبريتات انتشاراً في الطبيعة، حيث يوجد كمعدن أو صخر رسوبي. يتميز الجبس بأهمية معمارية كبيرة، إذ استُخدم منذ العصر الفرعوني في صناعة المونة وطبقات البياض، كما وظّفه الإغريق والرومان في تشييد المباني [2]، بحيث يتمتع الجبس في قدرته على إعطاء أجواء مريحة وجمالية كمادة بناء تزيد من الطلب عليه. فهو منتج طبيعي متاح بشكل شائع وخالي من الرائحة في الوقت الحاضر والذي يخضع العديد من ميزات البناء الداخلي والخارجي في الغالب إلى إنشاءات الجبس أو منتجاته [3].

ولمادة الجبس (Gypsum) عدة خصائص فيزيائية نذكر منها صلابة موس لهذا المعدن هي 2 [4] مما يعني انه معدن ناعم يمكن خدشه بسهولة والكثافة النوعية تقدر ب (2.31-2.33)، والكتلة المولية له $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ تقدر ب $172.15g/mol$ [5,6]، له نظام تبلور أحادي الميل (Monoclinic) [7]، ويتميز الجبس بسهولة التشكيل وخفة الوزن ومقاومة الحرارة، مما يجعله مناسباً للعزل الحراري [8]، وعند زيادة درجة الحرارة فإنه يصبح أقل قابلية للذوبان في الماء وهي سمة مميزة له ويعرف بالذوبان الرجعي [6].

نتطرق الآن إلى بعض الخصائص الكيميائية لمعدن الجبس يعتبر الجبس مادة ليست حساسة للحرارة المنخفضة والمعتدلة ولكن عند تعرضه لدرجات عالية أكثر من $100^\circ C$ فإنه يفقد الماء الموجود فيه ويتحول إلى كبريتات الكالسيوم النصف مائية $(CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O)$ المعروفة باسم "الباسينيت" (جبس باريس) وإذا تم تسخينه على درجة أكثر من $900^\circ C$ فإنه يتحول إلى كبريتات الكالسيوم اللامائية $(CaSO_4)$ والمعروف باسم أنهيدريت (الجبس الميت) ويصبح هشاً وقد يفقد قوته تماماً [6]، لا يتفاعل بسهولة مع القلويات مما يجعله مستقراً في بيئة القاعدية ولكن يتفاعل مع الأحماض عند التسخين. وأما الخصائص البصرية لهذا المعدن فهو أبيض ناصع أو شفافاً ولكن عندما تتخلله بعض الشوائب يتحول إلى اللون الرمادي أو الأصفر أو البني أو الوردي [9] له قرينة انكسار (1.519-1.530) [5] وتكون بلورات هذا المعدن كبيرة وهي من شفافة إلى شبه شفافة وقد يتأثر مستوى الشفافية بكمية ونوع الشوائب الموجودة فيه [4] ويعد الجبس مادة متعددة الاستخدامات في البناء حيث يجمع بين الكفاءة والتكلفة المنخفضة والمرونة في التصميم مما يجعله عنصراً أساسياً في عملية البناء والتشطيب حيث يستخدم في عدة تطبيقات نذكر منها الديكورات الداخلية والأسقف المعلقة لخفة وزنه وسهولة تشكيله وأيضاً يستخدم لصناعة ألواح جبس بورد التي تتميز بمقاومتها للحريق والرطوبة [8] ويستخدم الجبس في صناعة الزخارف الجبسية مثل التماثيل والنقوش إضافة إلى استخدامه في تقسيم المساحات داخل المباني، وأيضاً يستخدم في صناعة بعض أنواع الإسمنت [10].

وتهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تحسين الخصائص الحرارية والميكانيكية لجبس منطقة الفولية بولاية الوادي، بالإضافة إلى اقتراح طرق لمعالجة وتحسين أدائه. حيث تُعد منطقة الفولية من المناطق الغنية بالجبس في ولاية الوادي، لكن خصائصه الحرارية والميكانيكية لم تُدرس بشكل كافٍ، مما يتطلب إجراء دراسة تفصيلية لتحسين أدائه وتوسيعه في التطبيقات المختلفة. كما ان التحليل الحراري والميكانيكي يُعتبر

أمراً ضرورياً لفهم استقرار الجبس في الظروف البيئية المختلفة. حيث تؤثر مقاومته للحرارة على متانته الميكانيكية، مما يستدعي دراسة التعديلات الممكنة لتحسين أدائه. وعلى هذا الأساس تم تقسيم المذكرة الى أربعة فصول:

❖ الفصل الأول: دراسة نظرية حول مادة الجبس وخصائصه

يتناول هذا الفصل الوصف الجيولوجي لمنطقة الفولية ومقارنة خصائص الجبس المحلي بجبس مناطق أخرى. كما يُناقش التركيب الكيميائي للجبس وتأثيره على خصائصه الحرارية والميكانيكية، بالإضافة إلى دراسة تأثير الرطوبة والظروف البيئية على أدائه في البناء.

❖ الفصل الثاني: التقنيات والوسائل المستعملة

سيتم فيه التطرق الى تقنيات التحليل المستخدمة في هذه الدراسة وإعطاء نظرة عامة وتوضيح مبدأ عمل كل منها.

❖ الفصل الثالث: العمل التجريبي وتحليل النتائج

في هذا الفصل سيتم تحضير ودراسة عينات الجبس وذلك من خلال تحضير العينات (استعمال الجبس المعبأ في الاكياس)، تصميم خلطات لتحسين الخصائص وذلك بإضافة مواد مضافة مثل الالياف .

❖ الفصل الرابع: تقييم الخصائص الحرارية والميكانيكية للخلطات

سنتطرق في هذا الفصل الى تحليل الخصائص الحرارية والميكانيكية والممثلة في قياس الموصلية الحرارية، اختبار الصلابة واختبارات الشد والضغط وقياس درجة الحرارة ومن ثم مناقشة النتائج عليها وأخيرا الآفاق المستقبلية.

قائمة مراجع المقدمة العامة

❖ مواقع أنترنت:

[1] https://www.usgme.com/default_ar/blog/post/gypsum-the-versatile-and-durable-workhorse Browsing history 16/02/2025

[3] <https://www.handasa.xyz/2021/08/gypsum-production-and-its-usage-in-construction-industry.html> -16/02/2025

[9] <https://www.zmescience.com/feature-post/natural-sciences/geology-and-paleontology/rocks-and-minerals/gypsum> , Browsing history 12- 03- 2025

[10] <https://www.britannica.com/science/gypsum> -Browsing history 12- 03- 2025

❖ المراجع باللغة العربية:

[2] كتاب خامات البناء-المؤلف: محمد عبد الله الدرايسة- عدلي محمد عبد الله-الفصل العاشر-عمان : مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع 2011 -الطبعة العربية الأولى (2012) .

[4] ولتر شومان (2001)، كتاب أحجار كريمة في العالم ، شركة روبرت هيل المحدودة، صفحة 210.

[5] باي نسيمة وبن ساسي مريم ، دراسة تأثير المعالجات الحرارية على مادة الجبس في منطقة الفولية بالوادي، مذكرة ماستر ،جامعة حمه لخضر ،الوادي، (2021) .

[6] سهيلة الطويل وبالهادف أسماء، دراسة تجريبية حول تحسين خواص جبس منطقة الفولية بالوادي ، مذكرة ماستر ،جامعة حمه لخضر،الوادي،(2023).

[7] هناء قطوبة وإبتسام حماتي، دراسة تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الفيزيوكيميائية لمادة الكوارتز، مذكرة ماستر ،جامعة حمه لخضر،الوادي،(2023).

[8] غريب عبد الحميد ، دراسة عامة لمادة جبس منطقة الفولية بالوادي ،مذكرة ماستر ،جامعة حمه لخضر بالوادي،2022.

الجزء النظري

الفصل الأول

دراسة نظرية عن ما هو

الجين وخصائصه

I-1- مقدمة

الجبس هو معدن طبيعي يُعرف كيميائيًا باسم كبريتات الكالسيوم ثنائية الهيدرات ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، وقد استخدمه الإنسان منذ آلاف السنين في مجالات متعددة نظرًا لتنوع خصائصه وتوفره الواسع. يُعد الجبس من المواد ذات الاستخدامات اليومية، حيث يدخل في العديد من المنتجات التي نعتمد عليها بصفة مستمرة.

في قطاع البناء، يُستخدم الجبس في إنتاج الأسمنت البورتلاندي، ألواح الجدران الجافة (الجبسية)، وكذلك في صناعة القوالب المستخدمة في أدوات المائدة وتركيبات الحمامات.

كما يُعد الجبس كذلك مادة بناء مستدامة وفعّالة من حيث التكلفة، كما يتميز بانخفاض بصمته الكربونية، مما يجعله خيارًا مثاليًا لتشييد مبانٍ صحية وعالية الجودة من الناحية البيئية والاقتصادية [1].

ومن هنا سنتطرق في هذا الفصل إلى الدراسة النظرية لمادة الجبس وخصائصها وهو التعرف عليه عبر العصور التاريخية ومن ثم سنقوم بالوصف الجيولوجي لمنطقة الفولية بولاية الوادي ومن ثم مميزات الجبس المحلي (جبس الفولية) مقارنة بالجبس في مناطق أخرى. بالإضافة إلى كل ما سبق، سنتطرق إلى التركيب الكيميائي لهذا المعدن وكذلك خصائصه الحرارية والميكانيكية وأخيرًا تأثير الرطوبة والظروف البيئية على الجبس المستخدم في البناء.

I-2- نبذة تاريخية حول الجبس

يُعد استخدام الجبس في عمليات البناء من الممارسات القديمة التي تعود جذورها إلى الحضارات العريقة في مصر، روما، واليونان، حيث تشير الأدلة الأثرية إلى أن استخدامه بدأ منذ أكثر من 6000 سنة قبل الميلاد. وتُعد الأهرامات المصرية من أبرز الشواهد التاريخية التي تعكس مدى تطور تقنيات البناء باستخدام الجبس في تلك العصور [2، 3].

وقد شكّل انتقال الإنسان من الحياة داخل الكهوف إلى بناء المساكن باستخدام الحجارة أو القصب، وتغطيتها بطبقات من الجص الترابي، تحولاً جوهرياً في تطور العمران. فقد أتاح له هذا التحول إمكانية إنشاء "كهف اصطناعي" في أي مكان يرغب فيه. وساهم بناء مساكن دائمة بالقرب من مصادر المياه العذبة أو الأراضي الزراعية الخصبة في تشكّل التجمعات السكانية الأولى، والتي مهدت بدورها لنشوء المدن المبكرة.

في بدايات استخداماته، كان الجص يُحضّر من مكونات طبيعية بسيطة، مثل الطين والرمل والقش، دون الحاجة إلى أفران، حيث كانت هذه الخلائط تُجفف تحت أشعة الشمس. وقد استُخدم هذا الخليط في تصنيع الطوب، كما استُعمل بنفس التركيبة الأساسية كملاط وجص للبناء. ولا تزال الأنواع الترابية من الجص، وعلى رأسها الجص الطيني، تُعد من أكثر أنواع الجص شيوعاً واستخداماً على مستوى العالم. [5]

I-2-1- الجبس في الحضارات القديمة

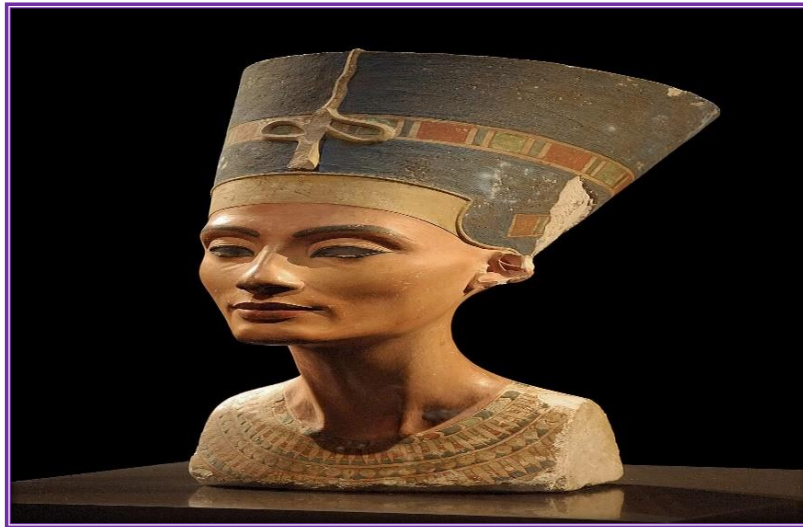
أ- الحضارة المصرية:

يُعد المصريون القدماء من أوائل الشعوب التي وظّفت الجبس في فنون العمارة والبناء، حيث استخدموا نوعاً مميزاً من الجبس يُعرف بـ"الجبس المرمرى" في تصميم واجهات الأهرامات والمقابر، وقد أتاح هذا النوع من الجبس إمكانية توفير أسطح ملساء مثالية لتنفيذ الجداريات والنقوش الدقيقة، واعتمد المصريون في ذلك على ملاط مكوّن من الجبس والجير، والذي لا تزال آثاره مرئية حتى يومنا هذا، كما هو الحال في أهرامات الجيزة، (الشكل I-1)، والتي تضم الهرم الأكبر (خوفو)، وهرم خفرع، وهرم منقرع (منكاورع) [4].



الشكل (I-1): أهرامات الجيزة بمصر [8].

كما تُعد مصر منبعاً للفنون الجدارية والزخارف الغنية التي لا حصر لها، والتي لا تزال باقية وشاهدة على عظمة الحضارة المصرية القديمة. ومن أبرز هذه الأعمال تمثال نفرتيتي المصنوع من الجبس (الشكل I-2)، والذي يُعتبر أحد أشهر القطع الأثرية المصرية، ويعود تاريخه إلى أكثر من 3300 عام. ويُجسّد هذا التمثال تطوراً فنياً موازياً في مجال النحت الجبسي، مما يعكس مدى التقدم والابتكار الذي بلغه الفن المصري القديم في استخدام خامة الجبس كوسيط تعبيرى".



الشكل (I-2): تمثال نفرتيتي الشهير المصنوع من الحجر الجيري [8].

وفي الواقع تميز الجص المصنوع من الجير والجبس في مصر القديمة بجودة عالية في العديد من الحالات، تفوق في بعض الأحيان الجودة المتوفرة في المنتجات التجارية الحديثة. ويُعد هذا دليلاً واضحاً على أن صناعة الجبس شهدت تطوراً تجريبياً مستمرًا على مدى أجيال عديدة، ما يعكس الخبرات المتراكمة والمهارات التقنية المتقدمة التي امتلكها الحرفيون في العصور القديمة [5].

ب- الرومان واليونانيون:

لقد استخدم الرومان الجص الجبسي على نطاق واسع في أعمال البناء، حيث أدرك البنائون في تلك الحقبة القيمة الوظيفية لهذه المادة، لا سيما في حماية المباني من الحرائق. وتشير العديد من المخطوطات التاريخية التي تعود إلى العهد الروماني إلى صدور تعليمات تُلزم أصحاب المباني بتغطية جميع الجدران بطبقات من الجبس لهذا الغرض [4،5].

وقد تأثر الإغريق بهذه الممارسات، فاستعاروا مفهوم "الجص" كمزيج من الرمل والجير، وهو مصطلح مشتق من الكلمة اليونانية القديمة التي تعني "التلطix". وقد استُخدم هذا المزيج على نطاق واسع في تزيين معابدهم، سواء من الداخل أو الخارج [6].

I-2-2- الجبس عبر العصور

أ- العصور الوسطى وعصر النهضة

خلال العصور الوسطى وما بعدها، استمر استخدام الجبس في أوروبا، حيث أصبح مادة أساسية في تصميم الديكورات الداخلية المزخرفة، لا سيما في الكنائس والقصور. وقد أدرك الفنانون آنذاك أهمية الجبس كعنصر أساسي في تنفيذ اللوحات الجدارية، إذ وُفّر سطحًا مناسبًا للرسم ومكّن من إبراز التفاصيل الفنية بدقة عالية. وقد لاقت هذه التقنية رواجًا كبيرًا في إيطاليا على وجه الخصوص، حيث كانت جزءًا لا يتجزأ من النهضة الفنية والمعمارية التي شهدتها البلاد [4].

ب- العصر الحديث

شهد إنتاج الجبس الصناعي ازديادًا ملحوظًا في القرنين التاسع عشر والعشرين، مدفوعًا بالتقدم في تقنيات التعدين والمعالجة وقد ساهمت هذه التطورات في تسهيل استخراج الجبس وتوفيره بأسعار مناسبة، مما أدى إلى استخدامه على نطاق واسع في البناء الحديث وكان من أبرز نتائج هذا التحول ظهور تقنية الحوائط الجافة، التي تتكون من لب الجبس (الطبقة الأساسية التي توضع على الجدران أو الأسقف)، والتي أحدثت ثورة في مجال البناء خلال القرن العشرين. فقد ساهمت هذه التقنية في تطوير أساليب بناء أكثر سرعة وكفاءة، مقارنة بالطرق التقليدية [4].

تُعد مدينة تشاتال هيوك (Çatalhöyük)، التي تعود إلى نحو 7500 ق م وتقع في منطقة الأناضول جنوب تركيا حاليًا، من أقدم الشواهد الأثرية التي تجمع بين مظاهر الحضارة واستخدام الجص، كما هو موضح في (الشكل I-3). فقد كانت تشاتال هيوك بلدة ذات كثافة سكانية عالية، تميزت بمبانيها المشيدة من الطوب الطيني اللين، وأرضياتها المطلية بطين المارل المتوفر محليًا، والذي شكّل آنذاك نوعًا فعالاً من الجص. وما نعرفه عن هذه الحضارة القديمة لا يزال قائمًا من خلال الجداريات الجيرية التي رُيّنت بها

جدرانها، حيث تصور هذه اللوحات مشاهد متنوعة من الحياة اليومية، كالصيد، إضافةً إلى مشاهد للبراكين وأنماط هندسية زخرفية تُبرز الجس الفني المتقدم لدى سكان تلك الحقبة [5].



الشكل (3-I): تشاتال هويوك تطل على سهل قونية جنوب شرق مدينة قونية الحالية بتركيا (الصحافة التركية) مأخوذة من قناة الجزيرة [8].

I-2-3- التطبيقات الأولى للجبس

في بدايات استخدامه، استعمل الجبس كمادة أسمنتية لتثبيت ألواح الحجارة المتداخلة أثناء بناء الأهرامات، مما ساهم في تعزيز استقرار البنية المعمارية لهذه المنشآت الضخمة. كما استخدم خام الجبس، وتحديداً أنواعه المصقولة مثل الجوهرة والمرمر، كمادة خام في تصنيع عناصر معمارية وزخرفية دقيقة، من أبرزها التوابيت الخاصة بأفراد العائلة الملكية. ويُعد تابوت الملك خوفو أحد الأمثلة البارزة على هذا الاستخدام، كما هو موضح في (الشكل I-4) [7].



الشكل (4-I): هرم الجيزة الأكبر (خوفو) على بطاقة بريدية من القرن 19 [8].

• في القرن الثالث عشر:

شكّل الجص المكلس مادة زخرفية أساسية في القصور الأوروبية، ومع تطور الحضارة الغربية، ترسّخ استخدامه ليصبح عنصراً معمارياً شائعاً ومعتمداً رسمياً في تصميم وتزيين المباني. وقد أبدى الملك هنري الثاني ملك إنجلترا إعجابه الشديد بجودة الجص المنتج في باريس، والذي عُرف لاحقاً باسم "جص

باريس". وقد استُخدم هذا النوع من الجص في تزيين عدد من المعالم المعمارية البارزة، من بينها دير، وقصر وستمنستر (كما يظهر في الشكل I-5)، بالإضافة إلى قلعة توتنغهام [7].



الشكل (I-5): يوضح قلعة ستمنستر (بيوت البرلمان) بالمملكة المتحدة [8].

• في القرن السابع عشر:

ظهر مسحوق الجبس، المعروف اليوم بألواح الجبس أو (الجبس بورد أو Board Gypsum)، رسميًا في أمريكا الشمالية بالتزامن مع اكتشاف القارة وهجرة أعداد كبيرة من الأوروبيين إليها. وقد بدأت المباني الأولى في الظهور على أرض غنية بموارد طبيعية كالخشب والجبس، إلا أن طابعها المعماري اختلف إلى حد ما عن الطراز الحجري الأوروبي التقليدي. فقد كانت الجدران الخارجية تُبنى في الغالب من الخشب، بينما تُغطى الجدران الداخلية بطبقات سميكة من الجبس المقاوم للحريق.

وفي ظل الزيادة الكبيرة في الطلب على إنشاء المساكن، برزت الحاجة إلى تطوير مواد بناء أكثر كفاءة وسرعة في التنفيذ، مما ساهم في تحويل ألواح الجبس إلى مورد اقتصادي مهم. وقد أدى ذلك إلى تسارع تطوير هذه المادة، التي أصبحت تُعد اليوم من الحلول المستدامة والمفضلة في مجال البناء الداخلي [7].

I-3- الجبس في منطقة الفولوية

I-3-1- الوصف الجيولوجي لمنطقة الفولوية

منذ تشكل الأرض من تصلب الغبار الكوني قبل حوالي 5.4 مليار سنة، وهي تشهد تغييرات مستمرة على سطحها. إذ تختلف واجهتها في العصر الحالي بشكل كبير عن العصور القديمة، ويعود ذلك إلى العمليات الطبيعية مثل التجوية والحركات التكتونية التي تؤثر على القشرة الأرضية.

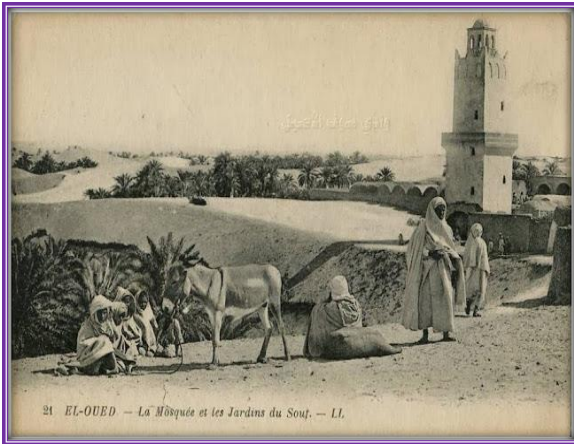
وتُعد الفترة الزمنية الممتدة من 1.64 مليون سنة حتى يومنا هذا واحدة من أهم الفترات التي مرّت بها المنطقة خلال تاريخها الجيولوجي. فقد تكونت الرسوبيات الرملية والصخرية التي تغطي المنطقة خلال هذه

الحقبة، مما جعلها تشكل إقليمًا مناخيًا وجيومورفولوجيًا ونباتيًا نشأ في المراحل الأخيرة من العهد السينوزوي، أي خلال الزمن الرابع. ومن أبرز تكوينات هذا الزمن:

- **الطبقة الرملية:** وهي التي تشكل السماط السطحي يتراوح حجمها بين (9 و 129) m، وهي الطبقة التي يتأرجح فيها مستوى السماط السطحي.
- **الصلصال:** يوجد في شكل صفائح قاسية، يدخل في تكوينه صافات من بلورات حديدية متداخلة ومتماسكة بشدة، وذات سمك ضعيف جدا نجدها في منطقة وادي سوف ووادي ربيع.
- **القشرة الجبسية:** وتتسم القشرة الجبسية التي تشكل جزءًا من هذه المنطقة بسمك يبلغ حوالي 69 cm تقريبًا، وتتكون من جبس رقيق ممزوج بالرمال، وتعد هذه القشرة من الميزات المميزة لتربة سوف، وهي منتشرة في مناطق واسعة شمالي وادي سوف بما في ذلك منطقة الفولية، تتواجد هذه القشرة على عمق يتراوح بين (1.5 و 2) m، وهي عبارة عن تشكيلات جبسية صلبة غنية بالكالسيوم [9].

I-3-2- ظهور مادة الجبس في ولاية الوادي

يُعتبر حجر التافزة المادة الأولية لصناعة الجبس، ووجد هذا الحجر مغمورًا تحت الرمال على شكل مقاطع في غيطان النخيل، وعلى شكل مسطحات بالجهة الشمالية من المنطقة حيث تقلع هذه الحجارة ثم تحرق وبعد تطور صناعة الجبس ظهرت الافران التقليدية. ففي خضم الصراع بين زناته والطرود حول بناء قرية قرب تكسبت مانع أهل زناته بحجة ضيق الأرض وشح الماء، عمد الطرود الى البناء خفية فحرقوا الجبس في سندروس. وأتو بالحجر من منطقة الفولية وبنو لزعمائهم بيوتا صغيرة. وفي رواية أخرى يعود ظهور الجبس الى حوالي 1030 للهجرة في منطقة وادي سوف، ويتضح قدم هذه المادة، حيث تم بناء مسجد سيدي مسعود بالوادي سنة 1600 م (الشكل I-7) غير أنها لم تكن في متناول الجميع، ولم تكن المعارف المتعلقة بصناعة الجبس التقليدي قد خبرها سكان المنطقة [10، 11].



الشكل I-7): من أقدم مساجد الوادي (مأخوذة من أرشيف الوادي) [8].



الشكل I-6): مسجد سيدي مسعود الشابي بولاية الوادي مأخوذة من شريط وثائقي [8].

I-3-3-3- مميزات الجبس المحلي مقارنة بالجبس في مناطق أخرى

I-3-3-3-1- الجبس المحلي (جبس الفوليه)

الجبس المحلي هو الجبس المستخرج من منطقة الفوليه بولاية وادي سوف صيغته الكيميائية وهو يتكون من ثلاثة أطوار أساسية وهي ($CaSO_4-2H_2O$) ، الكوارتز (الرمل) SiO_2 وهما الطورين الأكثر تواجدا في هذه المادة بالإضافة إلى الكالسيت (الطباشير) $CaCO_3$ [12]، ويحتوي أيضا على بعض الشوائب [13].

لقد أظهرت النتائج السابقة بأن طريقة معالجة جبس الفوليه غير سليمة حيث كانت نتائج معالجته بالطرق التقليدية تشكل ما يقارب 50% لمادة الجبس اللامائي وللذي يسمى بالجبس المحترق الميت (الأنهيدريت) (Dead Burnt Plaster) وهذا ما يجعله جبس ذو نوعية رديئة في الأسواق والحل لهذا المشكل يكون في تسخين الجبس ضمن ظروف منظمة بدقة ليفقد ثلاثة أرباع الماء المكون له للحصول على ما يسمى " جبس باريس " [14] .

يمتاز جبس فوليه (الجبس التقليدي) بسرعة التصلب والجفاف، والمقاومة الجيدة للنار، وغير قابل للاحتراق، وغير ناقل للحرارة، ورخيص التكلفة، وسهل الإنجاز، وغير ملوث للبيئة ولا يشكل خطرا على الانسان، مقارنة بأنواع أخرى مثل جبس أولاد جلال، يعتبر جبس الفوليه غير مناسب لديكورات الراقية والتشطيب لقله جودته ودرجة نقاوته المنخفضة إذ يعتبر لونه باهت مقارنة مع الأنواع الأخرى، ويمكن استعماله في الأعمال العادية والبسيطة والمؤقت [10].



الشكل (I-8) : غرف مصنوعة من الجبس المحلي في قلب الغيطان [10].

I-3-3-2- Paris Plaster

جبس أو جبس باريس يعرف بهذا الاسم بسبب تحضيره من الجبس المتوفر بالقرب من باريس (فرنسا) ، يتك ون من مسحوق أبيض ناعم صيغته الكيميائية $(CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O)$ ويتميز هذا الجبس بأنه سريع التثبيت ولهو خاصية رائعة تتمثل في التواجد في كتلة صلبة عند التبليل بالماء [15،16].

يتميز هذا النوع من الجبس بخصائصه الفريدة، حيث لا يتعرض للتقلص أو التشنج عند جفافه، مما يجعله مادة مثالية لصب القوالب. هذه الخاصية تضمن عدم حدوث تشققات في الهيكل، مما يسهل بناء الشكل المطلوب بدقة. كما يمتاز الجبس بالنعومة واللمسة النهائية الجذابة، مما يعزز من سهولة التعامل معه في الأعمال الفنية والمعمارية [17،18].

يتم إنتاج "جبس باريس" عن طريق تسخين الجبس المفتت إلى درجة حرارة $120C^0$ ، ويستخدم على نطاق واسع في تصنيع الأجزاء الجبسية المزخرفة التي توضع على الأسقف والكورنيش. بالإضافة إلى ذلك، يُستخدم الجبس المكرر في عمليات الصب المسبق لإنتاج أجزاء زخرفية من الجبس، والتي يتم تركيبها على الأسطح أو الأسقف، مثل الأسقف المستعارة وجوانب الغرف [19،20].



الشكل (I-9): جبس (جبس) باريس [21].

I-4-4- المفاهيم الأساسية**I-4-1- التركيب الكيميائي لمادة الجبس**

الجبس أو الجبس هو مادة معروفة منذ القدم الذي يتشكل من الروابط المائية وهي مادة طبيعية صلبة و من المعادن المتوفرة بكثرة في الأرض كما توضحه الأشكال (I-10)، (I-11)، (I-12)، (I-13) وهو أكثر معدن كبريتي منتشر في الطبيعة بأحد شكله المعدني أو الصخر الرسوبي وقد يكون وجوده على سطح الأرض أو على أعماق قد تصل إلى 320m والذي يتداخل مع الأنهدريت (كبريتات الكالسيوم اللامائية

أو (CaSO_4) والذي يتواجد مع الدولوميت والطين و الحجر الجيري وهو ذو لون رمادي أو أبيض و يميل الى الاحمرار في بعض الأحيان [14، 22] وغالبا يكون على شكل بلورات شفافة تسمى سيلينيت Selenite أو بلورات ليفية تسمى 'ساتين سبار Satin Sapar', ويتواجد عادة في قيعان البحار المالحة القديمة وكذلك في الرواسب البركانية [14].

ويحتوي خام الجبس على 79.1% من كبريتات الكالسيوم و 20.9% ماء, و هو يحتوي عادة على أطوار أخرى من أهمها السيليكات أو الرمل (SiO_2) وكربونات الكالسيوم (CaCO_3) [22، 23].



الشكل (I- 10): بلورة الجبس [24].



الشكل (I- 12): حجارة جبس منطقة تيميمون [25].



الشكل (I- 11): حجارة جبس منطقة الوادي [25].



الشكل (I- 13): حجارة جبس ولاية تقرت [25].

I-4-2- الخصائص الحرارية للجبس

ان الخصائص الحرارية التي يوفرها بناء الجبس تساهم في تحقيق توازن مثالي بين مستويات الرطوبة ودرجات الحرارة داخل الأماكن المغلقة. يتضمن بناء الجبس، مثل اللوح الجبسي أو القوالب الجبسية ذات التجاويف، خصائص عزل إضافية تعزز من كفاءته. كما أن استخدام الألواح الجبسية في البناء الداخلي يعمل كحاجز فعال للبخار، مما يمنع تراكم الرطوبة في البيئات الداخلية [26]. ومن بين الخصائص التي يتميز بها الجبس نذكر:

1- الموصلية الحرارية المنخفضة:

يتميز الجبس بموصلية حرارية منخفضة، مما يجعله مادة عازلة فعالة لتقليل انتقال الحرارة عبر الجدران. هذه الخاصية تساهم في تحقيق كفاءة طاقة عالية من خلال تقليل الحاجة إلى التدفئة في الشتاء أو التبريد في الصيف، مما يؤدي إلى توفير استهلاك الطاقة وتحقيق بيئة داخلية أكثر راحة.

2- مقاوم للحريق:

بفضل محتواه الطبيعي من جزيئات الماء المترابطة كيميائياً (ماء التبلور)، يتمتع الجبس بمقاومة ممتازة للحريق. عند تعرضه للحرارة العالية، يطلق الجبس هذا الماء بشكل

تدريجي، مما يبطئ من انتقال الحرارة ويمنع انتشار النيران. يمكن للجبس تحمل الحرائق لمدة تصل إلى ثلاث ساعات، مما يجعله خياراً آمناً لتحسين العزل الحراري والحماية في المباني.

3- عدم وجود شقوق انكماشية:

ان الجبس أقل عرضة لتكوين الشقوق الانكماشية مقارنة بالمواد الأخرى مثل الأسمنت، وذلك بسبب التفاعل الحراري المنخفض أثناء عملية التجفيف. هذا الاستقرار يعزز الخصائص الحرارية للجبس على المدى الطويل، حيث لا تتأثر قدرته على العزل الحراري بسبب الشقوق التي قد تسمح بانتقال الحرارة أو الرطوبة.

4- الحد من انتقال الحرارة الشديدة:

يعتبر الجبس قادراً على تنظيم درجات الحرارة الداخلية من خلال إطلاق الماء المحتبس فيه أو امتصاصه حسب الحاجة. هذه العملية الديناميكية تساعد في الحد من انتقال الحرارة الشديدة، مما يساهم في توفير بيئة داخلية مستقرة ومريحة من حيث درجة الحرارة والرطوبة [29].

I-4-3- الخصائص الميكانيكية للجبس

تتراوح قوة تحمل الجبس للضغط من $(50-200) \text{ kg/cm}^2$ وتتوقف هذه المقاومة على المواد المضافة للجبس لتقليل:

- سرعة تصلبه.

- درجة حرارة تكليس الخام .

- كمية الماء اللازمة لعمل عجينة لينة من الجبس فتزيد مقاومة الجبس للضغط كلما قلت كمية الماء.

- درجة جفاف الجبس ومقاومة الشد للجبس ضعيفة ومعايير مرونة الجبس حوالي 70 t/cm^2 ، كما تتأثر خاصية مقاومة الضغط تبعاً لنسبة الرمل والركام المضافة وكذلك نسبة الجير والاسمنت ونسبة المياه المضافة أيضاً، بحيث أن خاصية مقاومة الضغط تزيد مع الإقلال من كمية الماء المضافة كما أن زيادة نسبة الاسمنت البورتلاندي تخفض المتانة .

- بداية تصلبه تتطلب 8 دقائق أما تصلبه النهائي فيستغرق وقتاً من 25 إلى 30 دقيقة [30] .

I-4-4- تأثير الرطوبة والظروف البيئية على الجبس المستخدم في البناء

يُعدُّ الجبس من المواد الطبيعية ذات الأهمية البالغة في مجال البناء والتشييد، وقد تطوّر استخدامه على مر العصور. بدأ استخدامه في الحضارات القديمة مثل الفرعونية والرومانية التي اعتمدت عليه في أعمال الزخرفة كما أسلفنا سابقاً، واستمر حتى العصر الحديث حيث أصبح الجبس عنصراً أساسياً في التصميمات المعمارية المعاصرة، وهو مادة بناء تعتمد في تركيبها على كبريتات الكالسيوم المائي ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، ويظهر حساسية عالية تجاه الرطوبة.

وتعتبر الرطوبة أكبر عدو للجبس، حيث أنه معدن مسامي يمتص الماء، وإذا تعرض للرطوبة لفترات طويلة يبدأ بالتفتت والتآكل تدريجياً [31].

الجبس المشبع بالرطوبة كما يمكن أن يشكل بيئة مناسبة لنمو العفن والفطريات، مما يضر بصحة الإنسان ويفسد المظهر الخارجي للمباني.

دون أن ننسى الجبس المعرض للرطوبة في الأسطح مثل الأسقف المعلقة والديكورات يصبح عرضة لسقوط أجزاء منه، وقد يتسبب ذلك في حدوث التشققات وتدهور الهيكل العام.

وقد تؤدي الرطوبة قد تؤدي إلى تغير لون الجبس وظهور بقع خضراء أو صفراء تشوه المنظر الخارجي لذلك يتجنب استخدامه في المطابخ والحمامات [32]. كما أن الأثر الواضح على استخدام مادة الجبس في البناء، فعلى سبيل المثال:

- تتراكم الرياح المحملة بالغبار والأتربة على الزخارف والتماثيل الخارجية فيفسد مظهرها ولونها .
- تؤدي الأمطار وخاصة الأمطار الحمضية تؤدي إلى تفتت وتآكل الجبس في الأسطح المكشوفة [33].
- تؤثر درجات حرارة العالية والمنخفضة أيضاً على الجبس إما بالتمدد أو الإكماش [34 35].



الشكل (14-I): صور توضح آثار الرطوبة والتآكل على الأسقف والجدران [35].



الشكل (15-I) : صورة توضح آثار التعفن على الأسقف [35].

5-I- الخلاصة

تناول هذا الفصل دراسة شاملة للجبس واستخداماته المتنوعة عبر العصور. بدأنا بتعريف الجبس كمعدن طبيعي وقد وضحنا أن له تطبيقات واسعة في البناء والفنون، بالإضافة إلى استخداماته في الحياة اليومية مثل معجون الأسنان وغسول الشعر. كما تم استعراض تاريخ استخدامه في الحضارات القديمة مثل مصر وروما. ثم قدمنا دراسة جيولوجية لمنطقة الفولية في ولاية الوادي، حيث تم استخراج مميزات الجبس المحلي من خلال دراسات سابقة، وقمنا بمقارنته بالجبس المستخرج من مناطق أخرى مثل جبس باريس. ثم تطرقنا إلى التركيب الكيميائي وخصائص الجبس الحرارية والميكانيكية، مع التركيز على تأثير الرطوبة والظروف البيئية مثل درجة الحرارة على الجبس المستخدم في البناء.

قائمة مراجع الفصل الأول

❖ مواقع انترنت:

- [1] gypsum building uses, attributes, price and desigtrends,by Anton Giuroiu,
Browsing history 24-01-2025
- [2] <https://futurefriends1.tripod.com/id19.html> ,Browsing history 24-01-2025
- [3] <https://gpda.com/gypsum/> , Browsing history 24-01-2025
- [4] <https://sites.google.com/view/buildux-gypsum-plastering/history>
,Browsing history 24-01-2025
- [5]The History of Plaster in Architecture, The Ancient and Classical Periods ,
By Patrick webb , 1August2012, Browsing history 24-01-2025
- [6] / <https://p3plastering.co.uk/plastering-across-ages-little-bit-plastering-history>
..Browsing history 16/02/2025
- [7] <https://yoshino-gypsum.vn/en/gypsum-materials-history>
Browsing history 16/02/2025
- [8] <https://ar.wikipedia.org/wiki> Browsing history08-04-202
Browsing history 24-01-2025
- [15] <https://chemistrysources.com-plaster-of-paris> , Browsing history 18-04-2025
- [16] <https://www.britannica.com/technology/plaster-of-paris> 18-04-2018 ,
Browsing history 09-05-2025
- [20]<https://www.business4lions.com/gypsum> , Browsing history 18-04-2025
- [21] <http://www.google.com/urlhttp://www.expoegypt.gov.eg/products> , Browsing
history 18-04-2025
- [23] <http://www.byto.com.com/vb/member.php?u=844> history 18-04-2025
- [25] <https://www.mindat.org/locentries.php?m=1784&p=21894> history 18-04-2025
, Browsing history 16/02/2025
- [26] <https://www.handasa.xyz/2021/08/gypsum-production-and-its-usage-in-construction-industry.html> , Browsing history 16/02/2025
- [27] <https://ar.celotech.com/news/gypsum-plaster-advantages>
Browsing history 11/03/2025
- [28] <https://www.saint-gobain.my/events-news/advantages-and-disadvantages-gypsum-plaster> Browsing history 11/03/2025

[33] <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/F-06-2016-0068/full/html> , Browsing history 18-04-2025

❖ مراجع باللغة الأجنبية:

[31] Guo, J., Tan, Q., He, M., & Yang, S. (2021). Effect of microstructure and relative humidity on strength and creep behavior of natural gypsum rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 3747–3762

[34] Silva, A. P., Magalhães, A. C., & Ferreira, M. D. (2014). Effect of Humidity on Gypsum Properties in Coastal Environments. *Advanced Materials Research*, 1051, 763–768.

❖ مراجع باللغة العربية:

[9] د. غميمة وآخرون، طرق التنمية وتطوير الموارد المائية في المناطق الجافة والصحراوية، دراسة حالة واحة وادي سوف (الصحراء الجزائرية)، مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة حمه لخضر الوادي، الجزائر 2021.

[10] أ، فاتح باهي، "أفران الجبس التقليدية ودورها في تنشيط الحركة العمرانية في وادي سوف مطلع القرن 20"، مجلة قيس للدراسات الإنسانية والاجتماعية، المجلد 02، العدد 02، ديسمبر 2018

[11] دراسات مغاربية تراث وادي سوف بالجزائر 18-08-2019، تاريخ التصفح 12-04-2025.

[12] ن. باي، م. بن ساسي، "دراسة تأثير المعالجات الحرارية على مادة الجبس في منطقة الفولية بالوادي"، مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة حمه لخضر الوادي، الجزائر 2021.

[13] هايل الجازي، كيف تصنع الجبس، مقالة، 8-04-2018.

[14] ع. غريب، "دراسة عامة لمادة جبس منطقة الفولية بالوادي"، مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة حمه لخضر الوادي، الجزائر، 2022.

[17] أفنان قاقيش، "الفرق بين الاسمنت الأبيض والجبس"، مقالة، 202 .

[18] م. محمد، "جبس باريس استخدامات إيجابيات وسلبيات، طريقة الإعداد"، مقالة، 2021 .

[19] س. الطويل، أ. بالهادف، "دراسة تجريبية حول تحسين خواص جبس منطقة الفولية بالوادي"، مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة حمه لخضر الوادي، 2023

[22] الدكتور محمد حمود مهنا، "الفصل الثالث محاضرات مواد بناء"، جامعة الانبار، كلية الهندسة المدنية 2019-2020.

[24] مقدمة في علم الجيولوجيا (علم المعادن) للأستاذ الدكتور k. Mengel والدكتور K. W. Straub.

[29] خواص واختبارات المواد-الوحدة الثالثة-المملكة العربية السعودية، المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني، الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، تخصص تقنية معمارية.

[30] كتاب خامات البناء- المؤلف: محمد عبد الله الدرايسة- عدلي محمد عبد الله-الفصل العاشر- عمان مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع 2011 -الطبعة العربية الأولى: 2012-1433هـ.

[32] ع. قوجيل، ف. بقاري، "دراسة مدى تأثير العوامل الخارجية على طوب الجبس التقليدي المدعم بالخشب"، مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، 2023.

[35] مهندسة لين رحمون، رطوبة الأسطح الخرسانية أنواعها وطرق معالجتها، مقالة، 2024-04-25.

الفصل الثاني

الطرق والوسائل

المسئلة

II-1- تمهيد

سننظر في هذا الفصل للتعرف على مختلف الطرق المتبعة والوسائل المستعملة في هذا العمل التجريبي والمتمثلة في تقنية انعراج الأشعة السينية (XRD) والتي يمكن من خلالها تحديد الأطوار البلورية ومعرفة الشوائب وتقنية فلورية الأشعة السينية (XRF) لتحديد التركيب العنصري ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) وذلك لتحديد الروابط الكيميائية للمواد. بالإضافة إلى ذلك، تم توظيف جهاز الشد والضغط لدراسة الخواص الميكانيكية للعينات من حيث مقاومة الشد والانضغاط، وجهاز قياس الموصلية الحرارية لتقييم السلوك الحراري للمواد ومدى قدرتها على العزل.

II-2- الأشعة السينية

تتطلب دراسة التركيب البلوري استخدام إشعاع ذو طول موجي مساوي أو أقصر من مسافات البينية بين الذرات ويتم ذلك من خلال ظاهرة تسمى الانعراج وهي انحراف شعاع عن مساره نتيجة تفاعله مع المادة، وتنتهي XRD إلى إشعاعات كهرومغناطيسية [1].

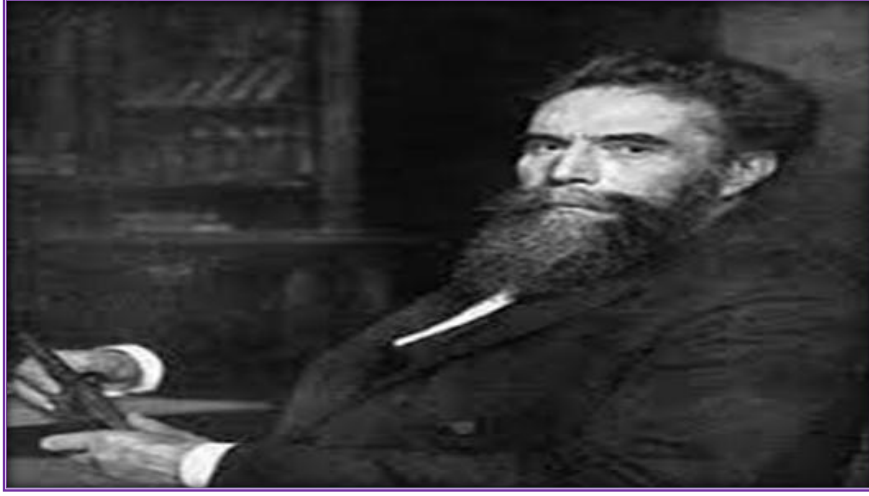
II-2-1- تعريف الأشعة السينية

تُعد الأشعة السينية (X-rays) نوعاً من الأمواج الكهرومغناطيسية ذات قدرة عالية على النفاذ، وتتراوح أطوالها الموجية بين 0.1 و 100 Å. وتولد هذه الأشعة نتيجة اصطدام إلكترونات سريعة بحاجز معدني (هدف فلزي)، كما يمكن أن تنبعث نتيجة التغيرات في ترتيب الإلكترونات داخل الذرة [2].

تتميز الأشعة السينية بخصائص الموجات الكهرومغناطيسية، حيث تُظهر خصائص مزدوجة كموجة وجسيم، وتنطبق عليها قوانين البصريات الهندسية والفيزيائية. وتنتقل هذه الأشعة في خطوط مستقيمة دون أن تتأثر بالمجالات المغناطيسية أو الكهربائية [3]. ونظراً لقصر طولها الموجي وارتفاع طاقة فوتوناتا نسبياً، فإنها تتفاعل بفاعلية كبيرة مع المادة، ما يجعلها أداة فعالة في العديد من التطبيقات العلمية. ومن أبرز استخداماتها تحليل البنية البلورية للمواد، حيث تُستخدم الأشعة السينية التي يتراوح طولها الموجي بين 0.5 Å و 2.5 Å في مجال علم البلورات [4].

II-2-2- نبذة تاريخية للأشعة السينية

تم اكتشاف الأشعة السينية في عام 1895 على يد العالم الألماني فيلهلم كونراد رونتغن (Wilhelm Röntgen) في مدينة فورتسبورغ بألمانيا، وذلك أثناء دراسته للأشعة المهبطية بهدف فهم طبيعتها وظاهرة الفلورة المصاحبة لها. وفي تجربته التاريخية، قام بتغطية أنبوب الأشعة بورق أسود لتقليل تسرب الضوء، ولاحظ بشكل غير متوقع أن لوحة معدنية موضوعة على مسافة غير مرئية أصبحت مرئية نتيجة لاختراق نوع جديد من الأشعة للأجسام. ونظراً لغرابة هذه الظاهرة وعدم معرفته بطبيعتها في حينه، أطلق عليها اسم "الأشعة X" [5] وقد نال رونتغن جائزة نوبل في الفيزياء عام 1901 تكريماً له بهذا الاكتشاف الرائد الذي شكل نقطة تحول في تاريخ الفيزياء والعلوم الطبية.



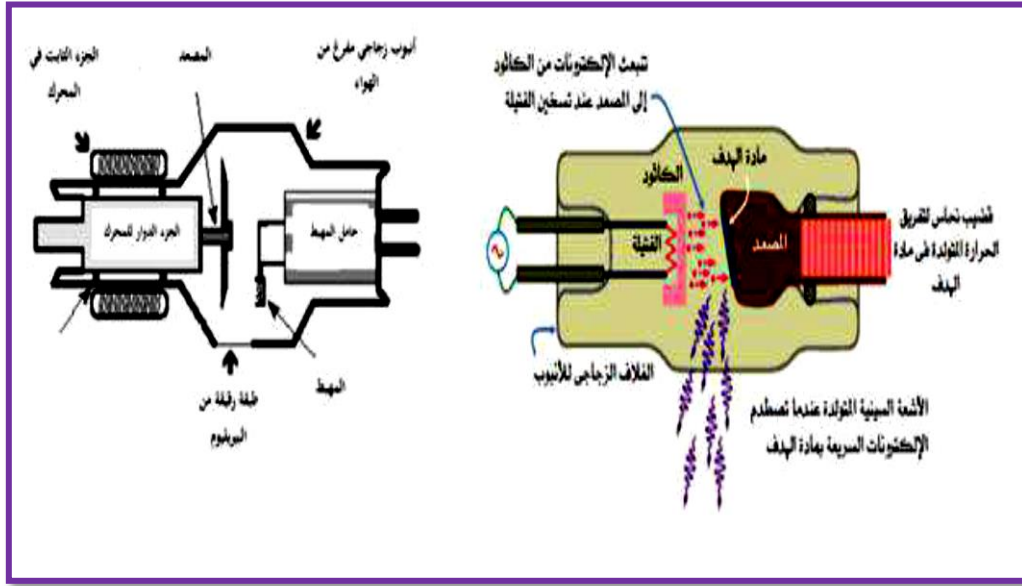
الشكل (II-1): كونراد رونتغن أستاذ بجامعة فورتسبورغ [7].

وقد منح هذا الاكتشاف العلمي شهرة واسعة، مما حفّز العلماء على التوسع في دراسة خصائص الأشعة السينية واستكشاف تطبيقاتها المتعددة. وكان من أوائل مجالات استخدامها دراسة البنية البلورية للمواد الصلبة، حيث مكن استخدام ظاهرة انعراج الأشعة السينية من تحليل التركيب الداخلي للبلورات. ومن خلال قياس زوايا الانعراج والزمرة الفراغية، أصبح بالإمكان تحديد الأبعاد الهندسية للشبكات البلورية بدقة عالية، مما أسهم في تطوير علم البلورات بشكل ملحوظ.

في عام 1912، قدّم العالم فون لاوي (Von Laue) مقالة علمية بعنوان "طريقة جديدة لتحليل مواد كيميائية"، طرح فيها مبدأً أساسياً في علم البلورات بالأشعة السينية. فقد أشار إلى أن كل مادة بلورية تنتج نمط حيود (انعراج) مميز وخاص بها، وأن هذا النمط يظل ثابتاً لكل مادة بلورية مهما تكررت التجربة. كما أوضح أنه في حال وجود خليط من المواد، فإن كل مادة تُنتج نمطها الخاص بشكل مستقل عن المواد الأخرى. وقد شكّل هذا الأساس العلمي قاعدة لتطوير تقنية حيود الأشعة السينية، التي أصبحت أداة فعالة لتحديد البنية البلورية للمواد ذات التركيب المجهول. ويُعد هذا الأسلوب مفيداً في حل العديد من الإشكاليات العلمية، من بينها فهم آليات نقل أيونات الأوكسجين في مركبات معقدة مثل البراونميلييريت (Brownmillerite) [6].

II-2-3- آلية توليد الأشعة السينية

يتكوّن جهاز توليد الأشعة السينية أساساً من عدة مكونات رئيسية، تشمل أنبوب توليد الأشعة، لوحة التحكم، مولد الجهد العالي، ونظام التبريد. وتُعد أنابيب الأشعة السينية من العناصر المحورية في هذا الجهاز، وهي عبارة عن أنابيب زجاجية مغلقة بإحكام ومفرغة من الهواء، لضمان خلّوها من الشوائب الغازية التي قد تؤثر في توليد الأشعة. وتحتوي هذه الأنابيب على فتحة مغطاة بطبقة رقيقة من عنصر البيريليوم (Be)، الذي يمتاز بشفافيته العالية للأشعة السينية، مما يسمح بانبعث الإشعاع بشكل فعال إلى الخارج [8,9].



الشكل (2-II): الاجزاء الاساسية في مولد الاشعة السينية [9].

يتكوّن أنبوب الأشعة السينية من عدة مكونات داخلية أساسية، هي:

1-3-2-II المهبط (Cathode)

يُصنع من مادة ذات درجة انصهار عالية، ويُطبق عليه تيار كهربائي يتراوح بين 3 إلى 8A، مع توتر كهربائي في حدود 20V. يؤدي هذا التيار إلى رفع درجة حرارة المهبط إلى مستوى يسمح بتحرير الإلكترونات السطحية، نتيجة لانخفاض طاقتها الارتباطية بالذرة.

2-3-2-II المصعد (Anode) أو مادة الهدف

يُصنع من مادة ذات عدد ذري مرتفع لتسهيل توليد الأشعة السينية بكفاءة عالية. ويُستخدم عادة عنصر التنغستن في التطبيقات الصناعية، وعناصر النحاس Cu، الحديد Fe، الموليبيديوم Mo، الكروم Co في التطبيقات العلمية، بينما يُفضل استخدام الموليبيديوم Mo أو الروديوم Ra في الأجهزة الطبية الخاصة بتصوير الثدي (الماموغرام)، نظرًا لخواصها المناسبة لإنتاج إشعاعي ملائم لهذا النوع من الفحوصات.

3-3-2-II نظام التبريد

يتضمن أنابيب تبريد مصممة لتبديد الحرارة الناتجة عن عملية التصادم، وتُستخدم مياه نقية لهذا الغرض لضمان كفاءة التبريد، خاصة لمادة الهدف (المصعد).

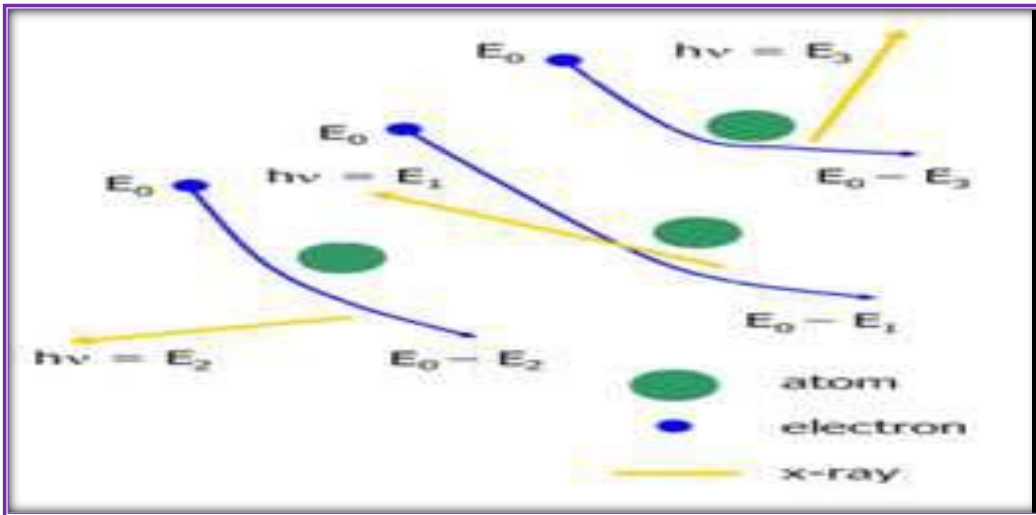
تُنتج الأشعة السينية عند تطبيق فرق جهد عالٍ بين المهبط والمصعد، حيث يتم تسخين المهبط لإصدار الإلكترونات، والتي يتم تسريعها ثم توجيهها نحو المصعد. وعند ارتطام هذه الإلكترونات السريعة بالبقعة المحورية على سطح مادة الهدف (المعروفة بالبقعة البؤرية Focal Spot)، تتحرر طاقة هائلة.

ومن الجدير بالذكر أن حوالي 99% من طاقة الاصطدام تتحول إلى حرارة، مما يستدعي التخلص منها عبر أنظمة التبريد الفعالة، سواء بالماء أو بالزيت، أما 1% المتبقي فقط فهو مسؤول عن توليد طيف الأشعة السينية، والذي يتكوّن من مكونين رئيسيين هما:

- الأشعة السينية الإنكباحية (Bremsstrahlung)
- الأشعة السينية المستمرة (Characteristic X-rays) [8,9].

أ- الأشعة السينية الإنكباحية

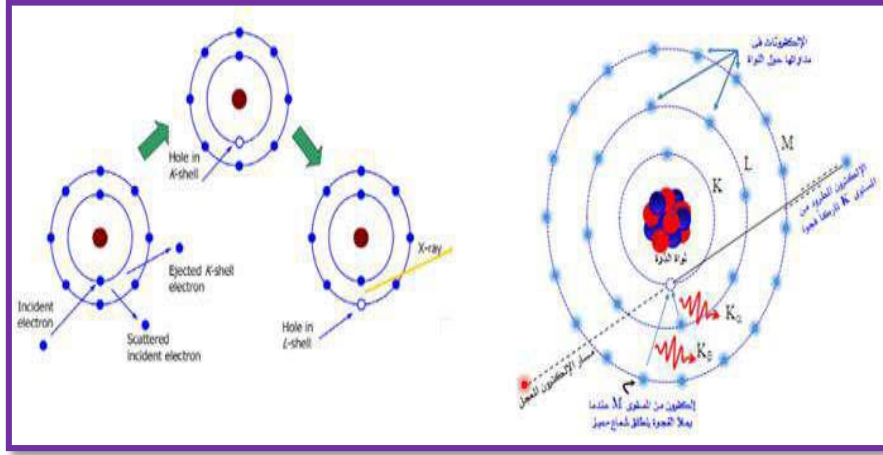
تنشأ الأشعة السينية الإنكباحية (Bremsstrahlung) نتيجة لتفاعل كولوم بين الإلكترونات المسرّعة ونواة ذرات مادة الهدف. أثناء هذا التفاعل، تتأثر الإلكترونات السريعة بالحقل الكهرومغناطيسي القوي للنواة، مما يؤدي إلى كبح سرعتها وتغيير مسارها. ونتيجة لهذا الكبح، تفقد الإلكترونات جزءاً من طاقتها الحركية، يُحوّل إلى فوتونات تُصدر على شكل إشعاع كهرومغناطيسي. يُعرف هذا الإشعاع بالأشعة الإنكباحية، ويتميز بطيف مستمر يتدرج في طاقته من الصفر وحتى حد أقصى يعادل طاقة الإلكترونات المسرّعة، ويوضح الشكل المرافق آلية انبعاث الفوتونات الإنكباحية خلال هذه العملية [8].



الشكل (II-3) : يوضح طرق توليد الأشعة الإنكباحية [8].

ب- الأشعة السينية المستمرة

تنتج الأشعة السينية المميزة (Characteristic X-rays) نتيجة لتفاعل الإلكترونات المسرّعة مع الإلكترونات المدارية في ذرات مادة الهدف، حيث يقوم الإلكترون المسرّع بتأيين الذرة عن طريق منح أحد الإلكترونات الذرية طاقة كافية لإخراجها من الذرة. يترتب على هذا التفاعل تكوّن فراغ في الطبقة المدارية التي تم نزع الإلكترون منها. لتلبية هذا الفراغ، تقوم الإلكترونات من الطبقات العليا بإعادة ملأه، مما يؤدي إلى انبعاث فوتونات ذات طاقة معينة. هذه الفوتونات تنتج طيفاً مميزاً يتم تمثيله في خطوط طيفية تسمى سلاسل K، L، وM. يوضح الشكل أدناه (II-4) عملية انبعاث فوتونات الأشعة السينية المميزة أو الإلكترونات المفقودة (أوجي Auger) الناتجة عن هذا التفاعل [8].



الشكل (II-4): يوضح كيفية توليد الأشعة السينية المستمرة [8].

II-4-2-4- مبدأ انعراج الأشعة السينية XRD

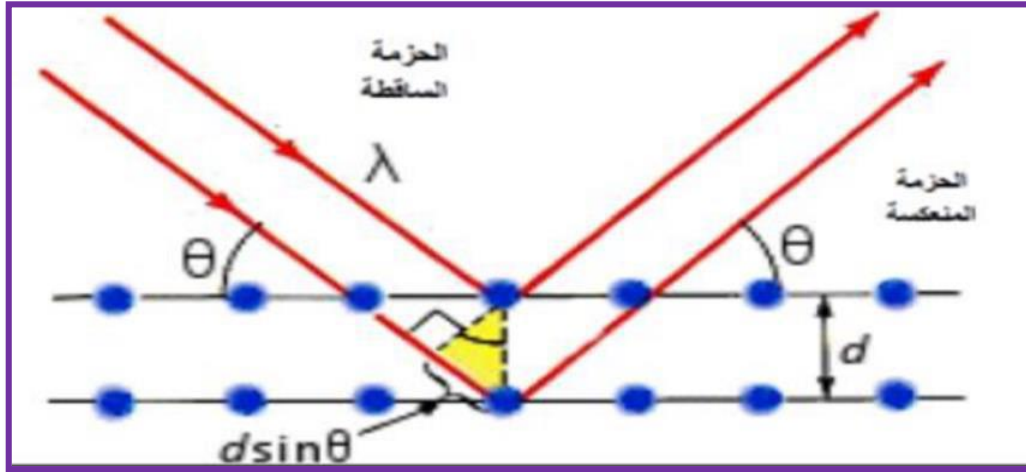
يعتمد مبدأ إنعراج الأشعة السينية على تسليط حزمة من الأشعة السينية أحادية الطول الموجي على مادة بلورية، حيث يلاحظ حدوث ظاهرة التداخل نتيجة تفاعل الأشعة المنتشرة مع الذرات المرتبة في البلورة. ونظرًا لأن البلورة تتكون من صفوف منتظمة من الذرات الموزعة على مستويات متوازية، فإن هذا الترتيب يسمح بظهور نمط حيود مميز. تُعد هذه الظاهرة أداة أساسية في دراسة التركيب البلوري، إذ تتيح تحديد مواقع الذرات داخل الشبكة البلورية بدقة. ومن العوامل الحاسمة في هذا السياق هو تحديد المسافة بين المستويات الذرية المتوازية، والتي يُعبر عنها من خلال قانون براغ (Bragg's Law).

II-4-2-1- قانون براغ

يُعد العالم ويليام براغ (William Bragg) أول من أسس لفكرة ضرورة توفر شروط هندسية محددة لحدوث انعراج الأشعة السينية في البلورات. فقد قام بتوجيه حزمة من الأشعة السينية أحادية الطول الموجي ومتطابقة الطور نحو بلورة، واقترح نموذجًا مبسطًا للبنية البلورية يسمح بتحديد اتجاه حيود هذه الأشعة بعد اصطدامها بالمستويات الذرية داخل البلورة.

في هذا النموذج، افترض براغ أن المستويات الذرية المتوازية في البلورة تعمل كسطوح عاكسة يمكن أن تُعرج الأشعة السينية. وقد شبه انعكاس الأشعة السينية بانعكاس الأشعة الضوئية عن مرآة مستوية، حيث تكون زوايا السقوط مساوية لزوايا الانعكاس. ويبيّن أن حدوث حيود واضح للأشعة السينية يتطلب توافقًا بين زاوية السقوط، وطول الموجة المستخدم، والمسافة بين المستويات الذرية، وهو ما يُعرف بشرط براغ للانعكاس البناء.

ونظرًا إلى الترتيب الدوري والمنظم للذرات ضمن البنية البلورية، فإن التداخل البناء للموجات المنعكسة يمكن أن يحدث في اتجاهات محددة، مما يؤدي إلى تكوين نمط حيود واضح. تُقاس هذه الأنماط لتوفير معلومات دقيقة حول التوزيع المكاني للذرات داخل البلورة [9، 10]، كما هو موضح في الشكل (II-5).



الشكل (II-5): انتشار الأشعة السينية بين مستويين متوازيين بمسافة فاصلة d [10].

لكي يحدث تداخل بناء بين الموجات الناتجة عن انعراج الأشعة السينية، يشترط أن يكون فرق المسار بين الأشعة المنعكسة عن المستويات الذرية المتوازية مضاعفًا صحيحًا لطول الموجة. ونظرًا لأن الأشعة الكهرومغناطيسية تكون موجة بشكل متوازٍ، فإن فرق المسار الناتج يمكن التعبير عنه بالعلاقة:

$$2d \sin \theta = n\lambda \dots \dots \dots (1 - II)$$

وهي المعادلة التي اقترحها العالمان وليام براغ (Bragg) وابنه لورانس عام 1912، وتُعرف باسم قانون براغ (Bragg's Law). حيث تمثل:

- θ : زاوية سقوط الأشعة (الانعراج).
- λ : الطول الموجي للأشعة المستخدمة.
- n : رتبة الانعراج (الحيود)
- d : المسافة الشبكية لمجموعة المستويات hkl [10,9].

ويُعد هذا القانون أساسًا لفهم كيفية تفاعل الأشعة السينية مع البلورات، مما يتيح تحليل البنية الذرية بدقة عالية.

II-2-5- الطرق التجريبية لانعراج الأشعة السينية المستخدمة

في مجال التحليل البنيوي للمواد الصلبة الجزيئية، يعتمد الباحثون على تقنيات انعراج الأشعة السينية التي أثبتت فعاليتها من خلال العديد من التجارب السابقة. ومع التقدم المستمر في هذه التقنية، اتسع نطاق تطبيقاتها ليشمل أنظمة أكثر تعقيدًا مثل البوليمرات، البروتينات، والجزيئات الكبيرة.

وتجدر الإشارة إلى أن انعراج الأشعة السينية لا يحدث إلا عندما تتحقق الشروط المحددة في قانون براغ، أي عند توافق قيم الطول الموجي λ وزاوية السقوط θ مع المعادلة (II-1).

وهذا يعني أن الأشعة السينية لا تنعكس ببساطة عند سقوطها على البلورة بزواوية عشوائية. ومن منظور عملي، يتطلب تحقيق هذا الشرط توافر مدى مستمر من القيم لكل من θ و λ ولحسن الحظ، فإن هذا الشرط متحقق في مختلف الأساليب التجريبية المستخدمة لقياس حيود الأشعة السينية. وفيما يلي، سيتم استعراض بعض الطرق الشائعة المستخدمة في هذا السياق.

(a) طريقة لاوي (Laue Method)

(b) طريقة البلورة الدوارة (Rotating Crystal Methode)

(c) طريقة المسحوق أو طريقة ديبياي وشيرار (Debye-Scherrer Method) وهذه الطريقة هي مبدأ عمل جهاز الأشعة السينية في المسحوق [1].

II-2-6- خصائص الأشعة السينية

- الأشعة السينية لا تحمل شحنة كهربائية، ولذلك فهي لا تتأثر بالمجالات الكهربائية أو المغناطيسية.
- لا تُستخدم الأشعة السينية بشكل مباشر في التصوير الضوئي التقليدي، نظرًا لتأثيرها على الألواح الفوتوغرافية الحساسة، مما يؤدي إلى تغييرات في جودة الصورة.
- تمتلك الأشعة السينية القدرة على تفريغ الأجسام المشحونة كهربائيًا، سواء كانت مشحونة بشحنة سالبة أو موجبة.
- يمكن للأشعة السينية تأيين الغازات عند مرورها خلالها، وهي خاصية تُستخدم في العديد من التطبيقات الفيزيائية.
- تُصنف الأشعة السينية كموجات كهرومغناطيسية ذات طول موجي قصير جدًا، يقع في حدود 1\AA ، مما يمنحها طاقة عالية.
- تتفاوت قدرتها على اختراق المواد (حسب العدد الذري للعنصر المكون للمادة المدروسة).
- تمتاز بأطوال موجية أقصر بكثير من أطوال موجات الضوء المرئي، مما يمنحها طاقة أعلى بشكل كبير مقارنةً بالضوء المرئي [11].
- تنتقل في خطوط مستقيمة وبسرعة مساوية لسرعة الضوء.
- تؤثر الأشعة السينية في أفلام التصوير، حيث تُستخدم في تكوين صور شعاعية بسبب قدرتها على اختراق الأنسجة وترك أثر واضح على الفيلم.
- تمتلك الأشعة السينية تأثيرًا كيمووضوئيًا، إذ يمكنها إحداث تفاعلات كيميائية عند تعرض بعض المواد لها.
- يمكن أن تسبب الأشعة السينية تلفًا أو قتلًا للخلايا الحية، كما قد تؤدي إلى تغييرات عضوية داخل الخلايا، ما يجعل استخدامها يتطلب الحذر.
- تُحدث الأشعة السينية ظاهرة الفلورة أو الفسفرة في بعض المواد، أي أنها قادرة على إثارة هذه الأجسام لتبعث ضوءًا عند تعرضها لها [12].

II-2-7- تطبيقات الأشعة السينية

للأشعة السينية استخدامات كثيرة ومهمة في حياتنا اليومية والعلمية، نذكر منها:

❖ **الطب:** تُستخدم الأشعة السينية في المجال الطبي نظراً لقدرتها على اختراق الأنسجة الرخوة مثل الجلد، في حين تعجز عن اختراق العظام بسهولة. فعند تسليطها على جسم الإنسان لفترة زمنية قصيرة ومحددة، يمكن الاستفادة من هذا التفاوت في الاختراق لتصوير العظام بوضوح. وبناءً على ذلك، تُعد الأشعة السينية وسيلة فعالة لتشخيص الكسور والإصابات التي تصيب العظام، حيث تساعد في تحديد مكان الإصابة بدقة دون الحاجة إلى تدخل جراحي.



الشكل (II-6): صور لمناطق مختلفة لجسم الإنسان بواسطة الأشعة السينية [7].

❖ **الصناعة:** تُستخدم أشعة X في المجال الصناعي لفحص المواد والتأكد من جودتها، حيث تساعد في الكشف عن العيوب الداخلية غير المرئية في المنتجات مثل الشقوق أو الفراغات أو التجايف. كما تُستخدم على نطاق واسع في أنظمة الأمن، لاسيما في المطارات، حيث تسهم في مراقبة الأمتعة وتفتيشها دون الحاجة إلى فتحها، مما يعزز من كفاءة الإجراءات الأمنية وسرعتها.

❖ **العلوم:** تُستخدم أشعة X في الأبحاث العلمية لدراسة التركيب البلوري للمواد، حيث تُمكن الباحثين من تحديد ترتيب الذرات داخل البلورات بدقة عالية. كما تُستخدم لتحليل المواد غير المعروفة من خلال الكشف عن العناصر الداخلة في تركيبها، مما يساعد في تحديد مكونات الخلائط والمواد المركبة بدقة، ويُعد ذلك أداة أساسية في مجالات مثل الكيمياء، وعلوم المواد، والفيزياء [12].

II-3- فلورة الأشعة السينية

تُعرف الفلورية (Fluorescence) بشكل عام على أنها ظاهرة إصدار ضيائي من مادة عند تعرضها لشعاع ذي طول موجي معين يتوافق مع مستويات الطاقة الخاصة بذرات أو جزيئات تلك المادة. يؤدي هذا التوافق إلى إثارة تلك المستويات، فتنتقل الذرات أو الجزيئات إلى حالة طاقة أعلى. وعند عودتها إلى حالتها الأصلية، تطلق طاقة على شكل ضوء يُعرف بالإصدار الفلوري، والذي يكون ذا لون مميز مثل الأحمر أو

الأخضر أو الأصفر أو غير ذلك، حسب طبيعة المادة. ويتوقف هذا الإصدار مباشرة عند توقف الشعاع المحفز، أي أن الفلورية ترتبط بوجود مصدر الإثارة بشكل مباشر [15].

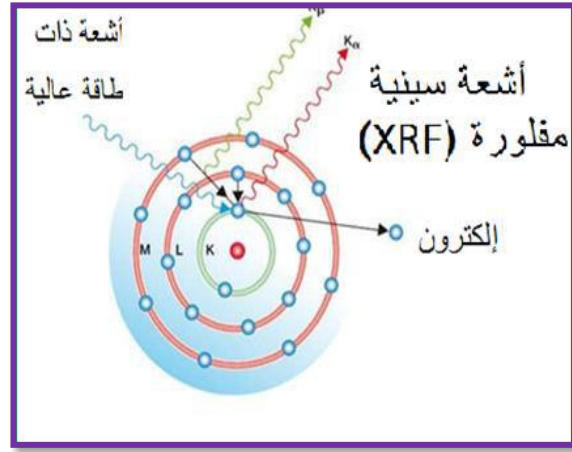
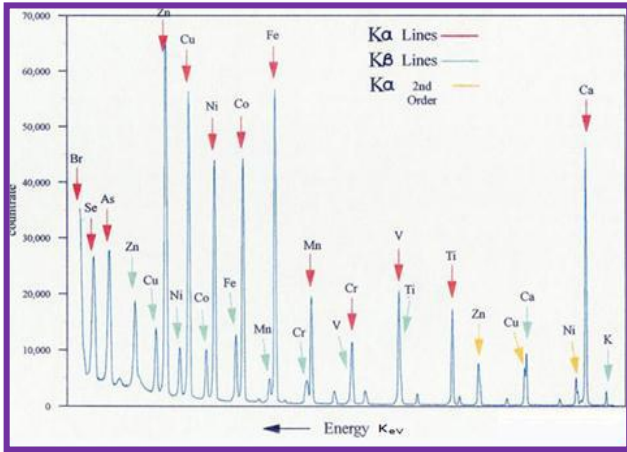
II-3-1- تقنية التحليل الطيفي باستخدام فلورية الأشعة السينية (XRF)

فلورية الأشعة السينية يرمز لها بالرمز (XRF) اختصاراً من (X-Ray-Fluorescence) وهي إصدار تلقائي ومميز للأشعة السينية (الثانوية) الفلورية من المادة التي تم تعريضها لمصدر ذي طاقة عالية الذي يؤدي إلى تهيج أو الإثارة مثل: الأشعة السينية ذات طاقة عالية أو أشعة غاما.

تعتمد تقنية فلورية الأشعة السينية (XRF) على تفاعل الأشعة السينية مع الكترونات ذرات العينة، وتعمل في تحديد العناصر الكيميائية المكونة للعينة سواء كانت ذات تركيز عالي أم ذات تركيز منخفض.

II-3-2- مبدأ عمل تقنية فلورية الأشعة السينية (XRF)

إن سقوط أشعة سينية مرتفعة الطاقة ذات أطوال موجية قصيرة، وتتراوح طاقتها بين 50 و60 KeV على المادة يؤدي إلى تأين بعض الذرات، وذلك بطرد بعض إلكتروناتها فإذا كانت طاقة الإشعاع كافية لطرد إلكترون داخلي مرتبط بشدة داخل الذرة مع النواة الذرية، ويغادر هذا الإلكترون الذرة بعد التغلب على الحاجز الطاقي الذي يربطه مع النواة، وتصبح الذرة غير مستقرة، فيهبط أحد إلكترونات الغلاف الخارجي للنواة ليحل محل الإلكترون الداخلي المفقود وملء المكان الشاغر. وهذه الظاهرة موضحة في الشكلين (II-7) و (II-8).



الشكل (II-7) المبدأ الأساسي لفلورية الأشعة السينية [9]. الشكل (II-8): ظاهرة إصدار أشعة الفلورة [13].

أثناء هذه الحركة أو الانتقال تتحرر الطاقة الزائدة (طاقة الإلكترون في مداره الجديد القريب من النواة) وتكون على شكل أشعة المكون للمادة. وتسمى هذه الأشعة بـ "الأشعة الفلورية" [13].

II-3-3- جهاز الفلورة

رغم التصميمات العديدة لأجهزة الفلورة للأشعة السينية، إلا أنها تشترك جميعاً في ثلاثة أجزاء رئيسية يمكن تفصيلها فيما يلي:

- أ- **مصادر الأشعة السينية الأولية:** توجد مجموعة متنوعة من وحدات الامداد بالأشعة الأولية التي تمنحنا طاقات كافية للكشف عن جميع العناصر الموجودة في المادة المدروسة ونذكر منها:
 - **انبوبة الأشعة السينية:** تُعد أنبوبة الأشعة السينية من أكثر المصادر شيوعاً لإنتاج طيف واسع من الأشعة السينية ذات شدة عالية، حيث تُستخدم مرشحات وأهداف معدنية مختلفة (المصعد) لتوليد وتعديل الأشعة السينية قبل تفاعلها مع المادة.
 - **الأهداف الثانوية:** تكون مدمجة داخل الأنبوبة وتُستخدم لإنتاج أشعة سينية أحادية اللون يمكن توجيهها للتفاعل مع العينة، حيث يُختار الهدف بما يتوافق مع العناصر المتوقع وجودها.
- ب- **مصادر مشعة:** تكون هذه المصادر مغلقة بإحكام تحتوي على نظائر مشعة، تطلق إشعاعات بطاقة متقطعة مناسبة لإثارة العناصر في العينة، وتتنوع هذه المصادر تبعاً لنوع الأشعة السينية المطلوبة.
- ت- **الكاشف:** يعتمد مبدأ عمل الكواشف على تفاعل الإشعاع مع مادة الكاشف، حيث يؤدي إلى تأين أو إثارة الذرات أو الجزيئات. ويُعد التأين التفاعل الأكثر شيوعاً، إذ يُنتج أزواجاً إلكترونية-أيونية في الكواشف الغازية أو إلكترونات تجويفية في كواشف أشباه الموصلات. يتم قياس الإشعاع عبر التيار الكهربائي الناتج عن هذا التأين، والذي يُسجل على شكل نبضات أو تيار مستمر باستخدام دارة كهربائية مدمجة. وتتوفر أنواع متعددة من الكواشف، تُصمم لتناسب طبيعة العينات المختلفة [14].

II-4-3- مطيافية فلورة الأشعة السينية.

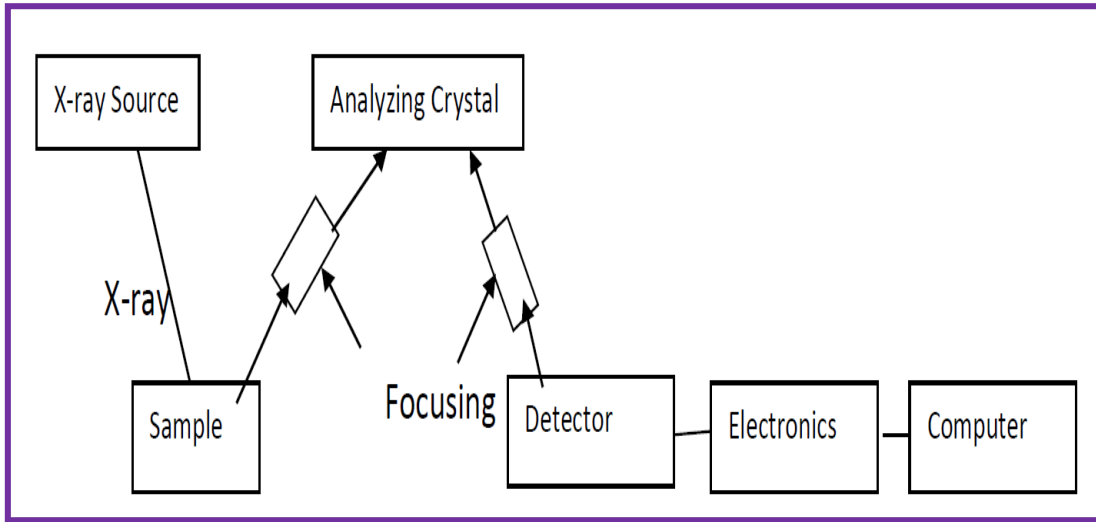
الفلورة هي إحدى ظواهر التألق وتحصل في مواد معينة عند تعرضها للأشعة السينية، حيث تمتص الذرات أو (الجزيئات) طاقة الأشعة الواردة فتنتقل إلى سوّيات طاقة عالية أو تتأين إذا كانت طاقة هذه الأشعة كافيةً لحصول ذلك، وبما أن الذرات (أو الجزيئات) المثارة غير مستقرة فإنها تعود إلى حالتها الأساسية وتصدر بذلك إشعاعاً مميزاً للعنصر المكون للمادة.

تُعد تقنية فلورة الأشعة السينية من أهم التقنيات المعتمدة في المخابر لغرض التحليل الكيفي والكمي للمواد، فهي من أبسط أساليب التحليل الطيفي وأكثرها دقة في تحديد التركيب الكيميائي لأنواع مختلفة من المواد، كما يمكننا بلوغ جده قياس لمعظم العناصر تقارب جزءاً من المليون، كما أنها تقنية تحليل غير هدامة للنماذج، ويمكنها الكشف عن معظم عناصر الجدول الدوري [14].

II-3-5- الكشف عن الأشعة السينية المتفلورة

في تحليل الأشعة السينية المتفلورة (XRF) ، يُستخدم نوعان رئيسيان من تقنيات الفصل الطيفي: تحليل الطاقة المنفصلة (EDXRF) وتحليل الطول الموجي المنفصل (WDXRF). في تقنية تحليل الطاقة (EDXRF)، تُستخدم كواشف الحالة الصلبة، مثل كاشف السيليكون الليثيوم Si(Li) أو كاشف السيليكون المنجرف (SDD) ، وهي تقيس طاقة الأشعة السينية المتفلورة مباشرة. أما في تحليل الطول الموجي (WDXRF)، فتُوجّه الأشعة السينية المتفلورة الناتجة من العينة نحو بلورة تحللها عن طريق تشتيتها وفقاً لزاوية محددة بحسب قانون براغ، ثم تُرسل الأشعة المتشتتة إلى الكاشف لقياسها.

تعمل جميع أنواع الكواشف وفق مبدأ مماثل، حيث تُسلط الأشعة السينية الأولية على العينة، مما يؤدي إلى إصدار أشعة سينية متفلورة ثانوية نتيجة لانتقال الإلكترونات بين المدارات الذرية. تُحدث هذه الأشعة الثانوية تأيئاً في ذرات الكاشف، مما يؤدي إلى تحرير إلكترونات. تُجمّع الإشارات الناتجة عن هذه الإلكترونات وتُوجّه إلى وحدة إلكترونية مرتبطة بجهاز الحاسوب، حيث تتم معالجتها وتحليل البيانات، كما هو موضح في الشكل (II-9).



الشكل (II-9): يوضح آلية التأين لمعالجة البيانات في جهاز الحاسوب [9].

II-3-6- التحليل الكمي والنوعي لنتائج تقنية الفلورة

أ- التحليل النوعي

يعتمد هذا التحليل على معرفة الأشعة السينية المميزة التي تصدر عن العينة المدروسة بعد التفلور كل ذرة تتميز بوجود مدارات طاقة مختلفة عن غيرها من الذرات، مما يؤدي إلى إنتاج أشعة سينية مميزة لها، تبعا للمدارات التي حدثت بينهما الانتقالات الإلكترونية. وترتبط شدة اصدار الأشعة السينية بتركيز العناصر في العينة كما يلي [9]:

$$I = k \cdot c \dots \dots \dots (2 - II)$$

حيث

I : شدة الاصدار

k : معامل التناسب

c : تركيز العنصر في العينة

ب- التحليل الكمي

يعتمد التحليل الكمي على وجود عينة مرجعية ذات شدة اصدار تركيز عنصرى معلومين، ويمكننا حساب التركيز انطلاقاً من العينة المرجع، ومن خلالها نستنتج تركيز العينة المدروسة انطلاقاً من العبارة التالية [9]:

$$C_{ech} = \frac{C_{st.lech}}{I_{st}} \dots \dots \dots (2 - II).$$

II-3-7- الية فحص العينات باستخدام (XRF)

يمكن أن تتنوع عينات المواد التي يتم تحليلها باستخدام جهاز الأشعة السينية المتطورة (XRF) ، حيث تشمل المواد الصلبة مثل الزجاج، السيراميك، المعادن، الفحم، الصخور، البلاستيك، الجبس، والرمل، بالإضافة إلى المواد السائلة مثل البنزين، الزيوت، الطلاء، والدم. ويتميز هذا الجهاز بقدرته على تحليل العناصر ذات التركيزات المنخفضة جداً، وكذلك العناصر ذات التركيزات العالية التي قد تصل إلى 100%، وذلك بشكل مباشر دون الحاجة إلى إجراءات تحفيزية إضافية. والعينة المعدة مثاليا تحقق الشروط التالية :

- ينبغي أن تكون العينة متجانسة من أجل الحصول على دقة نتائج التحليل
- يجب أن تتكوّن من جزيئات ذات حجم صغير بما يكفي ليتناسب مع الطول الموجي المستخدم في القياس
- يُشترط أن يكون سطح العينة خالياً من المخلفات أو التشوهات لضمان عدم تداخل الأشعة وتحقيق نتائج دقيقة [9].

II-4- مطيافية امتصاص الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)

يُعد التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (IR) من التقنيات التحليلية الفعّالة المستخدمة في دراسة الأنماط الاهتزازية للجزيئات، حيث يُنتج طيفاً يُمثّل "بصمة" مميزة لكل مادة، مما يتيح إمكانية التعرف عليها، وتحليل بنيتها الجزيئية، وإجراء قياسات كمية دقيقة. وتندرج تحت هذا المجال ثلاث تقنيات رئيسية، هي: التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتقنية تحويل فورييه (FTIR) ، التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء التقليدية (Mid-IR) ، والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) . وعلى الرغم من أن هذه الطرق تعتمد جميعها على تفاعل الأشعة تحت الحمراء مع المادة، فإنها تختلف اختلافاً جوهرياً من حيث تكوين الأجهزة المستخدمة، تنوع التطبيقات، وطبيعة المعلومات التحليلية التي توفرها.

II-4-1- الأشعة تحت الحمراء

تُعد الأشعة تحت الحمراء (Infrared Radiation) أحد أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسي، الذي يحتل نطاقاً ترددياً بين الطيف المرئي وموجات الميكروويف ضمن الطيف الكهرومغناطيسي، وتتميز هذه الأشعة بعدم قدرة العين البشرية على رصدها. يُصنف الطيف تحت الأحمر إلى ثلاث نطاقات رئيسية بناءً على طول الموجة، وهي كالتالي [2]:

- أ- **الأشعة تحت الحمراء القريبة (Near Infrared – NIR):** تقع هذه الأشعة في المنطقة المجاورة مباشرة للطيف المرئي، وتحديدًا بجوار اللون الأحمر، حيث يتراوح طولها الموجي بين $0.75\mu\text{m}$ و $1.4\mu\text{m}$.
- ب- **الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (Mid Infrared – MIR):** تحتل هذه الأشعة المنطقة الوسطى بين النطاقين الآخرين، ويتراوح طولها الموجي بين $3\mu\text{m}$ و 1mm .
- ت- **الأشعة تحت الحمراء البعيدة (Far Infrared – FIR):** تقع هذه الأشعة في النطاق الأقرب إلى إشعاع الميكروويف، ويتراوح طولها الموجي بين $1.4\mu\text{m}$ و $3\mu\text{m}$ [16].

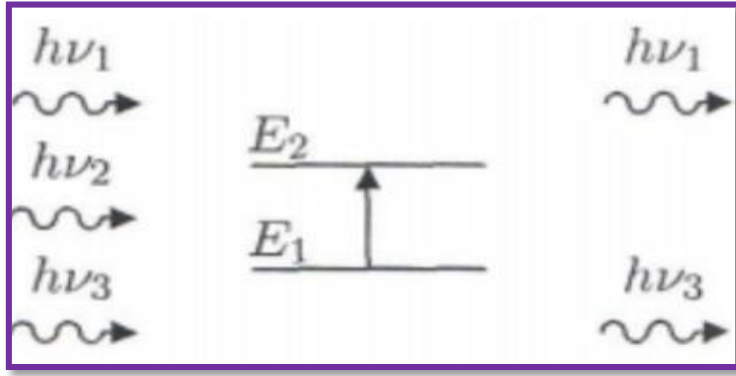
II-4-2- مصادر الأشعة تحت الحمراء

الأشعة تحت الحمراء هي أحد أشكال الإشعاع الحراري، حيث تصدر عن جميع الأجسام من حولنا، بما في ذلك الأفران، والمصابيح الحرارية، وعمليات الاحتكاك، وتسخين المواد المختلفة، بل وحتى الأجسام البشرية. كما تُعد الأشعة تحت الحمراء جزءاً من الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض، ويشعر الإنسان بتأثيرها الحراري عند التعرض لأشعة الشمس، إذ تسهم في إحساس الجلد بالدفء. ولهذا تُستخدم الأشعة تحت الحمراء في تطبيقات متنوعة، من أبرزها تسخين الطعام أو المحافظة على درجة حرارته [17].

II-4-3- مبدأ مطيافية الأشعة تحت الحمراء

تُعد مطيافية الأشعة تحت الحمراء من الأساليب الفعالة في تحليل وتحديد التركيب الكيميائي للمركبات، إذ تعتمد على مبدأ امتصاص الإشعاع الكهرومغناطيسي ضمن نطاق الأشعة تحت الحمراء، والذي يتراوح طوله الموجي ما بين $0.78\mu\text{m}$ و $1000\mu\text{m}$.

وترتبط الذرات داخل الجزيئات بواسطة روابط كيميائية يمكن أن تمتلك عزمًا ثنائيًا كهربائيًا. وعند تعرض هذه الروابط لإشعاع تحت أحمر يتوافق تردده مع تردد اهتزاز الرابطة، يحدث تفاعل بين المجال الكهربائي للإشعاع والمجال الكهربائي الناتج عن العزم الثنائي للرابطة. يؤدي هذا التفاعل إلى امتصاص الإشعاع وتحفيز الرابطة على الاهتزاز، مما يكسبها طاقة كافية للانتقال إلى مستوى اهتزازي أعلى، ثم تعود لاحقاً إلى حالتها المستقرة، مصحوبة بانبعثات إشعاع كما هو موضح في الشكل (II-10). وتعتمد الطاقة الممتصة خلال هذه الاهتزازات على طبيعة الذرات، ونوع الروابط الكيميائية، بالإضافة إلى الشكل الهندسي للذرات للجزيء [17].



الشكل (II-10): امتصاص الأشعة تحت الحمراء [17].

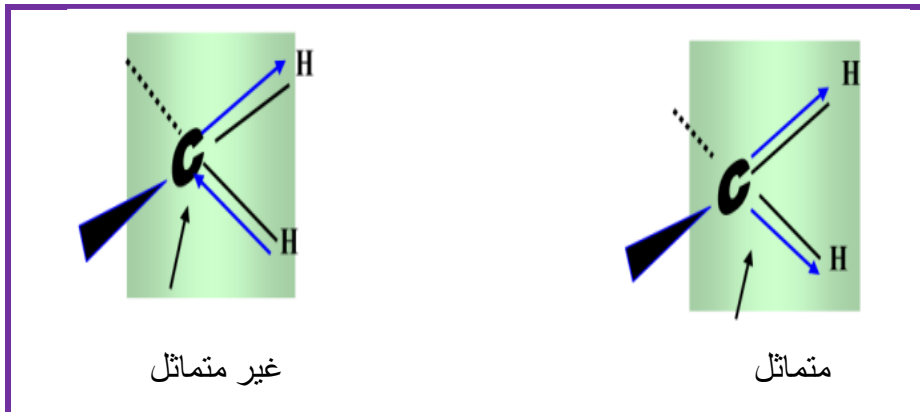
II-4-4-4- أنواع الحركات الاهتزازية

في الجزيئات، يمكن أن تتعرض الذرات لحركات اهتزازية ضمن الروابط الكيميائية التي تربطها، وهذه الحركات تُصنف إلى نوعين رئيسيين:

II-4-4-1- الاهتزازات التمديدية (Stretching Vibrations)

وتتمثل في تغيير طول الرابطة بين ذرتين دون تغيير الزاوية بين الروابط، وتنقسم إلى:

- أ- **تمدد متماثل (Symmetric Stretch):** تتحرك الذرات في اتجاهات متعاكسة بنفس المقدار على طول محور الرابطة.
- ب- **تمدد غير متماثل (Asymmetric Stretch):** تتحرك إحدى الذرات أكثر من الأخرى أو في اتجاه مختلف، مما يؤدي إلى توزيع غير متماثل للطاقة.

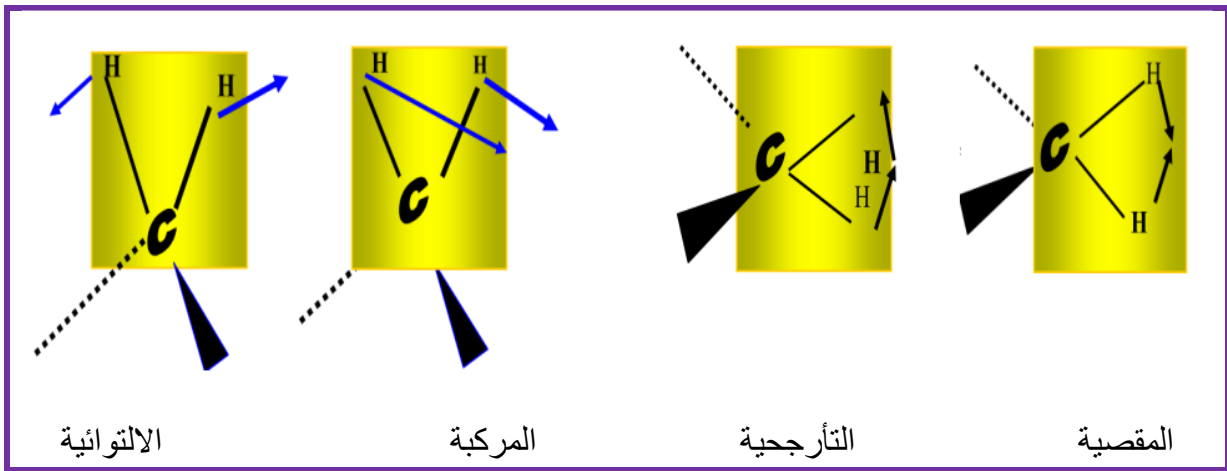


الشكل (II-11): اهتزازات التمدد [16].

2-4-4-II الاهتزازات الانحنائية (Bending Vibrations)

تحدث نتيجة لتغير الزاوية بين ذرتين أو أكثر ضمن الجزيء، وتنقسم إلى أربعة أنواع فرعية:

- اهتزاز المقصي (Scissoring): تتحرك الذرتان نحو بعضهما البعض أو بعيداً عن بعضهما في مستوى الجزيء.
- الاهتزاز التآرجحي (Rocking): تتحرك الذرتان بنفس الاتجاه وكأنهما "تهتزتان" حول مركز واحد.
- الاهتزاز التوائي (Twisting): تتحرك الذرتان في اتجاهين متعاكسين حول المحور الرابط.
- الاهتزاز إرتجاعي (Wagging): تتحرك الذرتان معاً إلى أعلى وأسفل خارج مستوى الجزيء.



الشكل (12-II): يوضح أنماط الانحناء [16].

5-II-5- جهاز قياس الموصلية الحرارية

هناك طرق مختلفة لتحديد الموصلية الحرارية والانتشار الحراري والسعة الحرارية النوعية، اعتماداً على نوع المادة المراد تحليلها ونطاق درجة الحرارة المطلوبة والدقة المطلوبة.

5-II-1- تعريف جهاز قياس الموصلية الحرارية

هو جهاز يُستخدم لقياس قدرة مادة على توصيل الحرارة، ويُعبّر عنها بما يُعرف بـ الموصلية الحرارية (Thermal Conductivity). وتقاس الموصلية الحرارية بوحدة واط/متر.كلفن (w/m .k).

5-II-2- أمثلة على أجهزة القياس

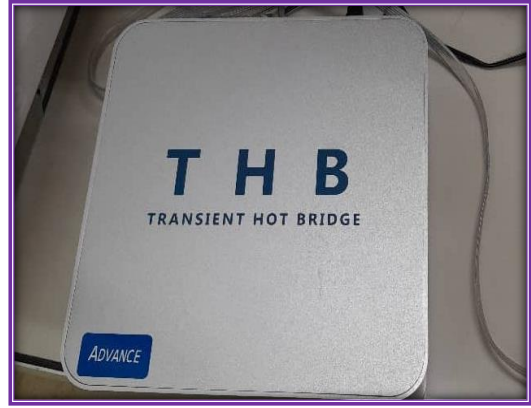
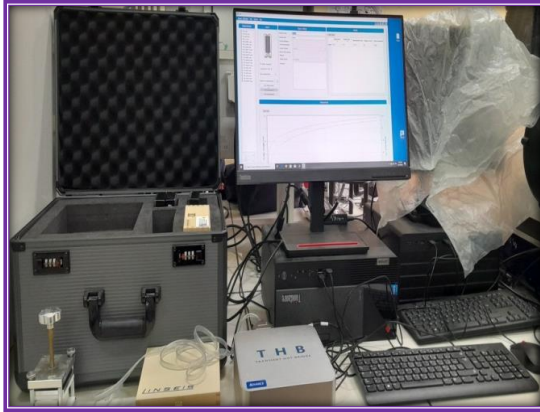
- قرص (Lee's Disk): يُستخدم غالباً في التجارب المدرسية لقياس الموصلية الحرارية للمواد الصلبة (مثل المعادن)
- جهاز الفحص بالأسلاك الساخنة (Hot Wire Method): يُستخدم للسوائل والغازات، حيث تسخن سلكة رفيعة داخل المادة وتُحسب الموصلية من تغير درجة الحرارة مع الزمن.

- **جهاز اللوحة الساخنة (Guarded Hot Plate):** يُستعمل لقياس موصلية المواد العازلة الحرارية، مثل البلاستيك أو الصوف الصخري.

II-5-3- الجهاز المستعمل في التجربة

يستخدم الجهاز المستخدم طريقة الجسر الساخن العابر (THB) وهي طريقة سلك تسخين مُحسّنة من قبل المعهد الاتحادي للفيزياء التقنية (PTB)، حيث يُمكن تحديد الموصلية الحرارية، والانتشار الحراري، والسعة الحرارية النوعية في أقل من دقيقة. ويمتد نطاق قياس الموصلية الحرارية من مواد العزل إلى السيراميك والمعادن [19].

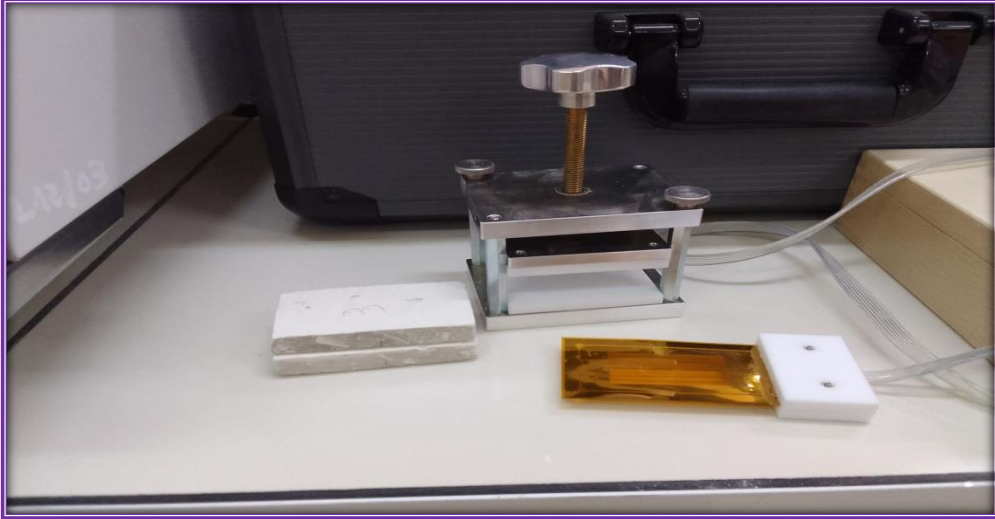
يمثل هذا الجهاز أحد مكونات نظام قياس التوصيلية الحرارية (Measuring System for Thermal Conductivity)، والمطور من قبل شركة LINSEIS الألمانية، كما هو موضح في الشكل (II-13) والذي يستخدم لقياس: الموصلية الحرارية (Thermal Conductivity)، السعة الحرارية (Specific Heat)، الانتشارية الحرارية (Thermal Diffusivity).



الشكل (II-13): الجهاز الموصلية الحرارية المستعمل في التجربة [19].

II-5-4- مبدأ عمل الجهاز

توضع العينة في حامل خاص بها، ويُثبت الحساس المرن (Flexible Sensor) بين العينتين في وضع معين (انظر الشكل II-14) يسمح بتوصيل الحرارة وقياسها، يمر تيار كهربائي صغير عبر عنصر تسخين مدمج في الحساس، ما يؤدي إلى توليد حرارة تنتقل الحرارة من مصدر التسخين إلى داخل المادة، الحساس يحتوي على مستشعرات تقيس تغير درجة الحرارة مع الزمن، والجهاز مرتبط ببرنامج أو نظام إلكتروني يحل البيانات ويستخدم معادلات حرارية (مثل قانون فورييه للانتقال الحراري).



الشكل(II-14): صورة توضح حامل عينة والعينة والحساس المرن [19].

II-5-5- أهمية القياس

- ✓ تصميم العوازل الحرارية.
- ✓ دراسة الهندسة الحرارية.
- ✓ تصنيع مكونات إلكترونية أو معمارية تتطلب كفاءة حرارية [19] .

II-6- جهاز الشد والضغط

يُعد جهاز الشد والضغط من أهم الأجهزة المستخدمة في ميكانيكا المواد والهندسة الميكانيكية، حيث يُستخدم لتحديد الخواص الميكانيكية للمواد مثل مقاومة الشد، مقاومة الانضغاط، حد الخضوع، ومعامل المرونة. يعمل هذا الجهاز من خلال تطبيق قوة محورية على العينة المدروسة، سواء كانت في اتجاه الشد أو الضغط، ومن ثم يتم تسجيل الاستجابة الميكانيكية للمادة مثل الانفعال والإجهاد [18].

II-6-1 - تعريف جهاز الشد والضغط

هو جهاز يُستخدم لاختبار قوة المواد (مثل الحديد، البلاستيك، الخشب، الاسمنت، الجبس.. إلخ) لمعرفة كيف تتصرف تحت تأثير الشد أو الضغط. الشكل (II-15)



الشكل (II-15): صورة جهاز الشد والضغط [18].

II-6-2- مبدأ العمل

1. **تركيب العينة:** توضع عينة المادة (مثلاً قضيب حديد)، ويجب إن تكون العينة في المنتصف داخل الجهاز.
2. **تطبيق القوة:** يقوم الجهاز بتطبيق قوة تدريجية على العينة، سواء عن طريق الشد أو الضغط ، وذلك باستخدام نظام تشغيل يعتمد على محرك كهربائي أو هيدروليكي .
3. **الاستشعار والقراءة:** الجهاز يحتوي على حساسات دقيقة تقيس:

- مقدار القوة المطبقة.
- مقدار التغير في الطول أو الشكل.

II-6-3- الاستخدامات

- ✓ اختبارات البناء والهندسة.
- ✓ تطوير المنتجات الجديدة.
- ✓ الأبحاث والجامعات.
- ✓ الشركات الصناعية تستخدمه لتأكيد جودة منتجاتها [18].

II-7- الخلاصة

في ختام هذا الفصل، يمكن التأكيد أن تقنيات التحليل المتقدمة مثل **XRF** و **XRD** و **FTIR** تمثل أدوات محورية في دراسة المواد وفهم خصائصها الكيميائية والفيزيائية بدقة عالية. تتميز هذه التقنيات بأنها غير تدميرية للعينة، مما يسمح بالحفاظ على العينة الأصلية وإمكانية إعادة استخدامها أو تحليلها بطرق إضافية لاحقة.

توفر تقنية الأشعة السينية الفلورية (**XRF**) تحليلاً كمياً ونوعياً للعناصر دون المساس ببنية العينة، بينما تكشف تقنية حيود الأشعة السينية (**XRD**) عن الترتيب البلوري للمواد بدقة دون إحداث أي تغيير مادي فيها، كما تتيح تقنية التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (**FTIR**) تحديد الروابط والمجموعات الوظيفية بطريقة آمنة وغير تدميرية. بفضل هذه الخصائص، تعد هذه التقنيات خيارات مثالية في العديد من المجالات البحثية والصناعية.

أما جهاز الشد والضغط، فيسمح بتقييم الخواص الميكانيكية، ويُستخدم جهاز قياس الموصلية الحرارية لتحديد كفاءة العزل الحراري للمواد. جميع هذه الوسائل تسمح بفهم دقيق وشامل للبنية وخصائص المواد المدروسة.

قائمة مراجع الفصل الثاني

❖ المراجع باللغة العربية

- [1] الدكتور محمد الصادق محبوب، " الفصل الثاني الأشعة السينية " محاضرة لسنة أولى ماستر كلية العلوم الدقيقة، جامعة حماة لخضر الوادي 2024 – 2025 .
- [2] غريب عبد الحميد، " دراسة عامة لمادة الجبس منطقة الفولية بالوادي "، مذكرة ماستر، جامعة الوادي، 2022
- [3] الأستاذ الدكتور محمود نصر الدين " الأشعة السينية وبعض تطبيقاتها " الهيئة العربية للطاقة الذرية تونس 2008.
- [5] د. إسكندر منيف، "بنية المادة الكثيفة : البلورات"، الهيئة الوطنية للأولمبياد العلمي السوري، دمشق، 2006
- [6] محمد خضير، "دراسة القنوات المحتملة للنقل الأيوني لألنوينات"، مذكرة ماستر، جامعة الوادي، 2018
- [8] ضيف يزيد، " دراسة تطور الخصائص البنيوية لمركبات ABBX4 بطريقة ريتفلد "، مذكرة الماستر، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، 2021.
- [9] منصور زينب، قروط شريفة، " المساهمة في دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية لرمال ووردة الرمال منطقة الراشدي بالحجيرة " ، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح – ورقلة، 2020.
- [10] محادي نوية، " تحديد تركيب الأصناف اللونية الرئيسية لرمال كثنان منطقة ورقلة، وتحديد سبب تلونها باستخدام الطرق الطيفية "، أطروحة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، 2017.
- [11] بن عليّة زهرة، مولاي نصيرة، " مساهمة في دراسة فيزيوكيميائية لرمال منطقة تيفرين (إليزي) "، مذكرة ماستر، جامعة الوادي، 2020.
- [12] محمود نصر الدين، الأشعة السينية وبعض تطبيقاتها، الهيئة العربية للطاقة الذرية، تونس. 2008 ص 169، 160، 136
- [13] م. مختاري، " الفصل الثاني في طرق التحليل والخصائص مطيافية الأشعة السينية "، كلية العلوم .
- [17] كتاب طرق التحليل الطيفي تقنية مختبرات كيميائية، المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني المملكة العربية السعودية، ص 61 .
- [19] الدكتور مطانس شحادة زلما، كتاب " علم المواد 2 "، مديرية الكتب والمطبوعات، 2005-حلب-سوريا، ص 174.

❖ المراجع باللغة الاجنبية

[4] Pierre Gravereau, "Introduction à la pratique de la diffraction des rayons X par les poudres", ICMCB-CNRS, Université Bordeaux 1, France, 2012

[14]; Encyclopedia of Analytical Chemistry; Copyright John Wiley & Sonc Ltd Meyers R. A (2010)

[15] Multilayers quantitative X-ray fluorescence analysis applied to easel paintings, Anal Bioanal Chem. 2009 Dec

[16] Analyse chimique Methodes et techniques instrumentales modernes (Cours et exercices corrigés) Francis Rouessac, Annick Rouessac avec la collaboration de Daniel Cruché 6e edition, DUNOD, 2004

❖ مواقع انترنت

[7] <https://www.bing.com/rp/sjRKqL7Qebb3rUAoLZkYF0PHd6Y.svg> 17-04-2025

[18] <https://www.linseis.com/en/instruments/thermal-conductivity> 15-05-2025

الجزء الثماني

الفصل الثالث

العسل السحري ومحلبيد

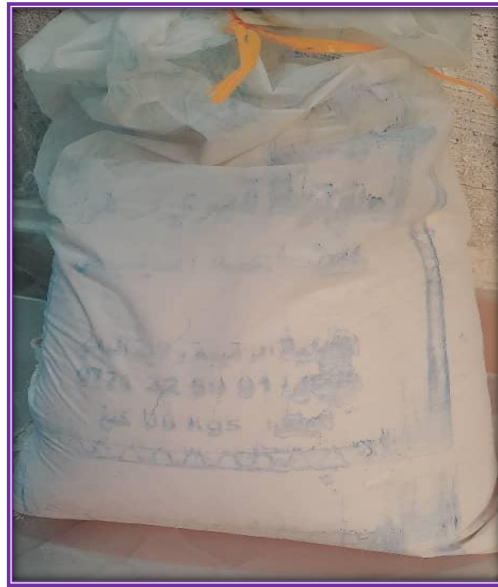
النتائج

III-1- مقدمة

يُعتبر الجبس من المواد الطبيعية المتوفرة بكثرة في عدة مناطق ، ويستخدم بشكل واسع في مجالات البناء والصناعة . غير أن أداءه الفيزيائي والميكانيكي في حالته الطبيعية قد لا يكون كافيًا لبعض التطبيقات الحديثة مما يدفع إلى دراسة خصائصه التركيبية وتعديله بإضافة مواد محسنة. قبل الشروع في تحضير الخلطات المعدلة ، تم إجراء تحليلات بنيوية وكيميائية على الجبس الخام لفهم طبيعته البلورية والوظيفية، وذلك باستخدام تقنيتي انعراج الأشعة السينية (XRD) ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) ومطيافية فلورية الأشعة السينية (XRF) .

III-2- تحضير عينات الدراسة البنيوية :

- تم جلب جبس الفولية الصناعي (أنظر الشكل III-1) :



الشكل (III-1): جبس الفولية الصناعي

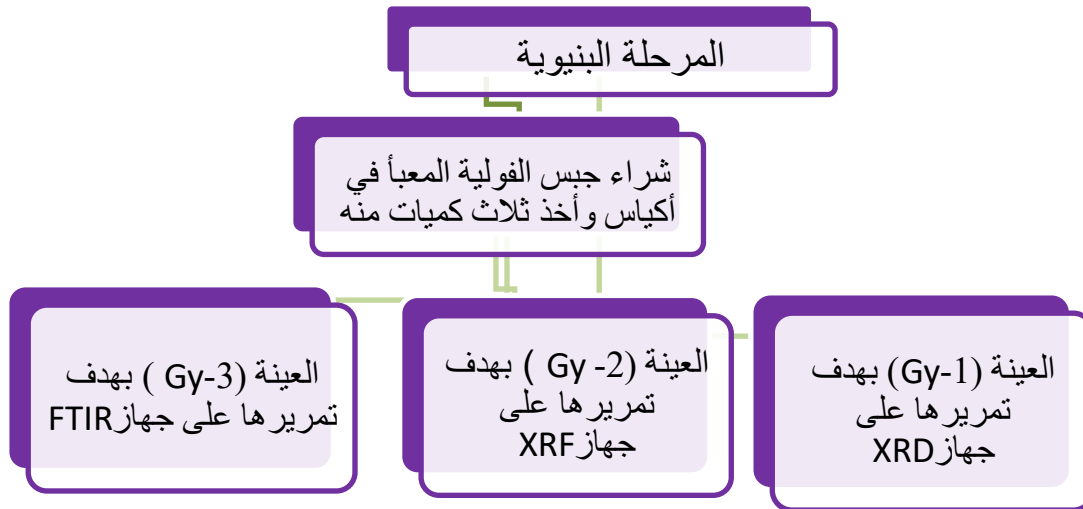
تم أخذ ثلاث كميات حسب الحاجة من الجبس الصناعي (الشكل III-2) وذلك بهدف إجراء التجارب التالية :

- ✓ تجربة إنعراج الأشعة السينية (XRD) بهدف تحديد الأطوار المتواجدة في العينة (Gy₁)
- ✓ تجربة فلورية الأشعة السينية (XRF) بهدف معرفة نسب العناصر الكيميائية في العينة (Gy₂)
- ✓ تجربة مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) بهدف معرفة الروابط الكيميائية الموجودة في العينة (Gy₃)



الشكل (III-2): تحضير عينات المرحلة البنيوية.

ولحوصلة جميع خطوات هذه المرحلة قمنا بإنجاز المخطط أدناه (III-3)



الشكل (III-3): مخطط يوضح المرحلة البنيوية.

III-3 - تحليل إنعراج الأشعة السينية (XRD)

تم استخدام جهاز PROTO AXRD Benchtop powder diffraction لتحليل انعراج الأشعة السينية (XRD) باستخدام التركيبة $(\theta-2\theta)$ كما هو موضح في (الشكل-III-4)

تم وضع العينة على شكل مسحوق في حامل خاصة داخل الجهاز، ثم تعرّضت لأشعة سينية ذات طول موجي: $\lambda_{k\alpha} = 1.54251 \text{ \AA}$ للنحاس Cu في مجال الزوايا $2\theta \in [10^\circ-80^\circ]$ ، الجهاز متصل بجهاز

كمبيوتر يحتوي على برنامج يقوم تلقائيًا بتسجيل و عرض النتائج في شكل مخطط انعراج (XRD Pattern)، والذي يُستخدم لتحليل البنية البلورية للمواد.



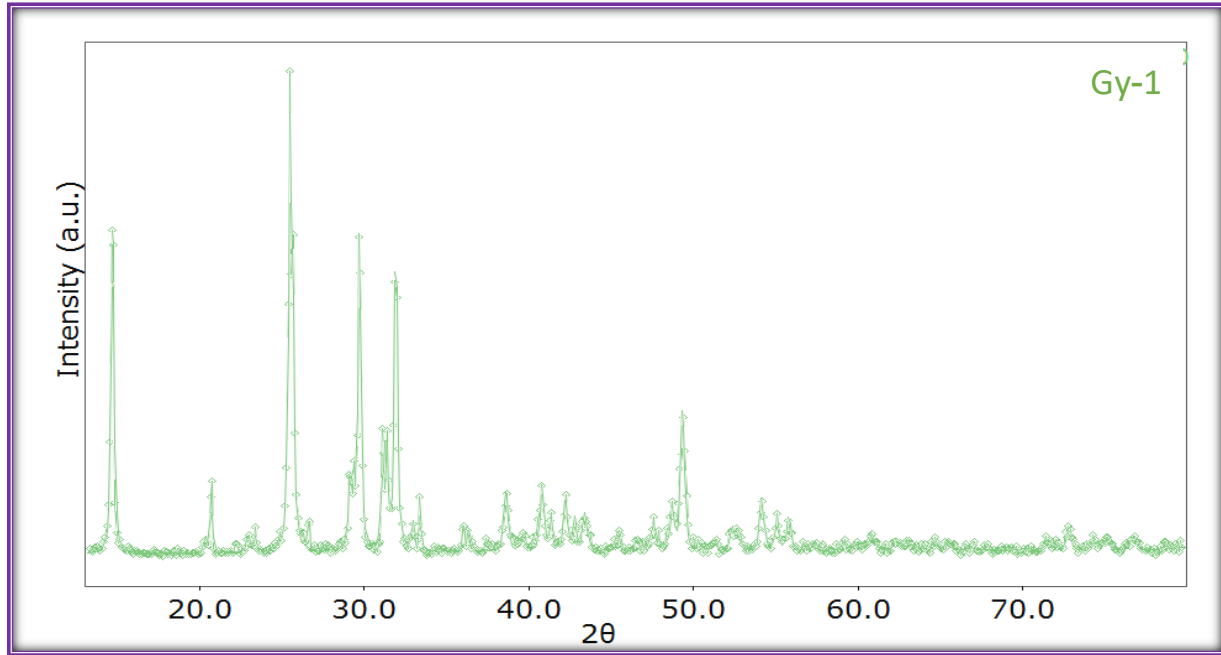
الشكل (III-4): جهاز الانعراج الآلي للأشعة السينية من نوع (PROTO AXRD Benchtop powder diffraction).



الشكل (III-5): حامل العينة داخل الجهاز.



الشكل (III-6): الحاسوب المتصل بجهاز (XRD).



الشكل (7-III): مخطط إنعراج الأشعة السينية لعينة من جبس الفولية.

4-III- نتائج إنعراج الأشعة السينية XRD

بعد تعريض العينة للأشعة السينية، تم الحصول على مخطط الانعراج الذي يظهر تغير شدة الإشعاع (I) بدلالة الزاوية (2θ) يتم عرض هذه النتائج في الشكل (7-III) الذي يوضح مخطط الانعراج الخاص بالعينة. نلاحظ أن قمة الانعراج لزاوية براغ الأكثر شدة هي القمتين المميزتين لطوري الأنهدريت $Ca [SO_4]$ والجبس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) عند الزوايا 29.71° و 31° على الترتيب.

1-4-III- تحسين نتائج الانعراج بطريقة " Rietveld "

1-1-4-III- طريقة ريتفالد (Rietveld)

طريقة ريتفالد للتحسين هي تقنية تُستخدم لمعالجة وتحليل البيانات الناتجة عن تجارب انعراج الأشعة السينية، أو النيوترونات، أو الانعراج باستخدام المسرع الدوراني التزامني (Synchrotron) على العينات المسحوقة. تم تطوير هذه الطريقة من قبل عالم البلورات الهولندي هوغوريتفالد، حيث طُبقت لأول مرة سنة 1967، وأُعلن عنها بشكل رسمي في عام 1969 في دراسات انعراج النيوترونات. تعتمد هذه الطريقة على محاكاة نمط الانعراج باستخدام نموذج بلوري للعينة، ويُعد هذا النموذج دقيقاً عندما يقترب نمط الانعراج النظري (المحسوب) من النمط التجريبي (المقاس). يتم تحقيق ذلك باستخدام خوارزميات حاسوبية تعتمد على تقنيات تحسين المربعات الصغرى (Least Squares) لتقليل الفرق بين النمطين ولكي يكون هناك تطابق مثالي بين النتائج النظرية والتجريبية، يجب أن يقترب معامل الجودة X^2 أو GoF من القيمة 1، حيث يتم حساب هذا المعامل باستخدام العلاقة الرياضية التالية [1]:

$$GoF = \frac{R_{wp}}{R_{exp}} \dots \dots \dots (1-III)$$

R_{wp}: هو عامل موثوقية الشكل الجانبي الموزون (Weighted Profile Reliability) ويعطى بالعلاقة التالية:

$$R_{wp} = \sqrt{\frac{\sum_i W_i (Y_i^{obs} - Y_i^{calc})^2}{\sum_i W_i (Y_i^{obs})^2}} \dots\dots\dots(2- III)$$

R_{exp}: هو عامل الموثوقية المتوقع وهو اختصار لـ R- expected pattern (يعبر عن جودة البيانات) وتكون قيمته مثالية عندما يقترب من العامل R_{wp} و بالتالي يؤول معامل التوافق GoF إلى الواحد ويعطى عامل الموثوقية بالعلاقة التالية:

$$R_{exp} = \sqrt{\frac{N-P}{\sum_i^N W_i (Y_i^{obs})^2}} \dots\dots\dots(3- III)$$

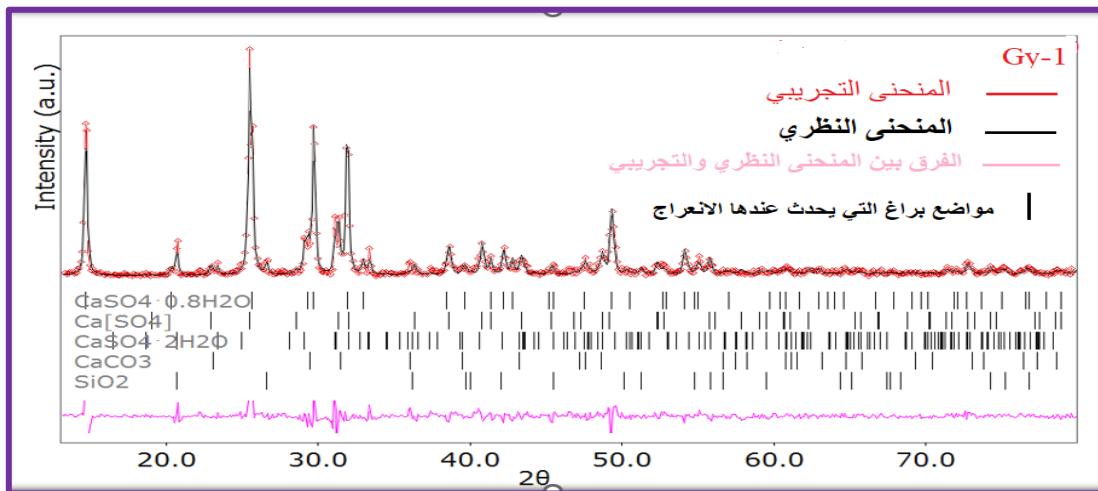
حيث: **N** : عدد النقاط في طيف انعراج المسحوق المشاهد.

P : عدد الوسائط المحسنة.

III-4-1-2- معالجة البيانات باستعمال برنامج Rex – Powder Diffraction

في عملية التحسين يتم استعمال برنامج من ضمن البرامج العديدة التي تعالج معطيات ملفات انعراج الأشعة السينية بطريقة ريتفيلد (Rietveld) ومن بينها برنامج " Rex Powder diffraction " إذ يمكن الحصول على دقة أكبر من خلال ملائمة نمط الانعراج بالكامل بما هو متوقع لمزيج من المكونات يعتمد هذا البرنامج كغيره من البرامج التي تستعمل في معالجة مخططات انعراج الأشعة السينية على المسحوق، على قواعد البيانات لأنماط الانعراج للعينات المدروسة أثناء تحضير عملية تحسين النتائج بطريقة ريتفيلد استعنا بملفات (Cif) الخاصة بالأطوار الموجودة، وهي مودعة لدى قاعدة البيانات المفتوحة في علم البلورات (Crystallography Open Database) والتي تأسست سنة 2003 [2].

الشكل الأخير يمثل المخطط المتحصل عليه بعد عملية التحسين، نلاحظ تطابق كبير بين المنحنى النظري وتجريبي:



الشكل (8-III): النتيجة النهائية لتحسين ريتفيلد لمخطط إنعراج العينة Gy-1 .

III-5- نتائج التحليل الطيفي للعينة بتقنية XRF

الجدول (III-1): نتيجة التحليل الطيفي باستعمال تقنية XRF لعينة من الجبس.

العنصر الكيميائي أو الأكسيد	نسبة التواجد (%)	العنصر الكيميائي أو الأكسيد	نسبة التواجد (%)
Na ₂ O	0.09	CuO	0.0061
MgO	0.27	ZnO	0.0022
Al ₂ O ₃	0.06	Rb ₂ O	<0,001
SiO ₂	1.20	SrO	0.1291
P ₂ O ₅	0,01<	ZrO ₂	0.0516
SO ₃	56.85	MoO ₃	0.0037
K ₂ O	0.03	BaO	<0,001
CaO	41.90	PbO	<0,001
TiO ₂	<0,01	Nb ₂ O ₅	<0,001
MnO	<0,01	CoO	<0,001
Fe ₂ O ₃	0.05	WO ₃	<0,001
V ₂ O ₅	<0,001	Br	0.0019
Cr ₂ O ₃	<0,001	Cl	0.0646
NiO	0.0027		

ملاحظات:

- ✓ تشير النسبة العالية من أكسيد الكبريت (SO₃) التي بلغت 56.85% إلى وفرة مركب كبريتات الكالسيوم (CaSO₄)، والذي يُعد المكوّن الأساسي في الجبس.
- ✓ تؤكد النسبة المرتفعة من أكسيد الكالسيوم (CaO) والتي بلغت 41.90% كذلك على تركيبة الجبس، حيث يُشكّل الكالسيوم جزءاً أساسياً من بنيته الكيميائية.
- ✓ وجود ثاني أكسيد السيلكون (SiO₂) بنسبة 1.20% يُعزى إلى شوائب معدنية طبيعية، غالباً على شكل رمال .
- ✓ أظهرت النتائج وجود أكاسيد معدنية مثل MgO، Al₂O₃، Fe₂O₃ بنسب ضئيلة (<0.3%)، مما يدل على وجود شوائب غير مؤثرة بشكل كبير على التركيب البنيوي للجبس.
- ✓ بعض المركبات الانتقالية مثل CuO، ZnO، Cr₂O₃، V₂O₅، MoO₃ ظهرت بتراكيز أقل من 0.01%، وهي غالباً عناصر نادرة أو ناتجة عن تداخلات جيولوجية أو أثرية.
- ✓ لوحظ أيضاً وجود عناصر مثل Cl و Br، ما قد يدل على احتمالية تعرض العينة لبيئة بحرية أو لأملح طبيعية خلال تشكّلها.

✓ بشكل عام، تعكس النتائج أن العينة المدروسة تمثل جبساً طبيعياً عالي النقاء، مع وجود طفيف لشوائب غير معدنية ومعدنية لا تؤثر على خواصه الأساسية.

تم تحديد التركيب الكيميائي للمكونات الأساسية لعينة من جبس منطقة الفولية المعبأ في أكياس باستخدام تقنية مطيافية فلورية الأشعة السينية (XRF)، كما هو موضح في الجدول (I-III). وقد بينت نتائج التحليل الكيميائي أن أكسيد الكالسيوم (CaO) وثلاثي أكسيد الكبريت (SO₃) يشكلان المركبات السائدة في العينة، يليهما بنسبة أقل أكسيد السيلكون (SiO₂) وتشير هذه النتائج إلى أن المكونات المعدنية الرئيسية في العينة تشمل كبريتات الكالسيوم (CaSO₄)، كربونات الكالسيوم (CaCO₃)، وثاني أكسيد السيلكون (SiO₂)، وإن كانت بنسب متفاوتة.

III-6- تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR)

أجري التحليل باستخدام تقنية FTIR للتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بواسطة جهاز Agilent Technologies Cary 630 FTIR ضمن مجال العدد الموجي cm^{-1} [4000-400]، (أنظر الشكل III-9).

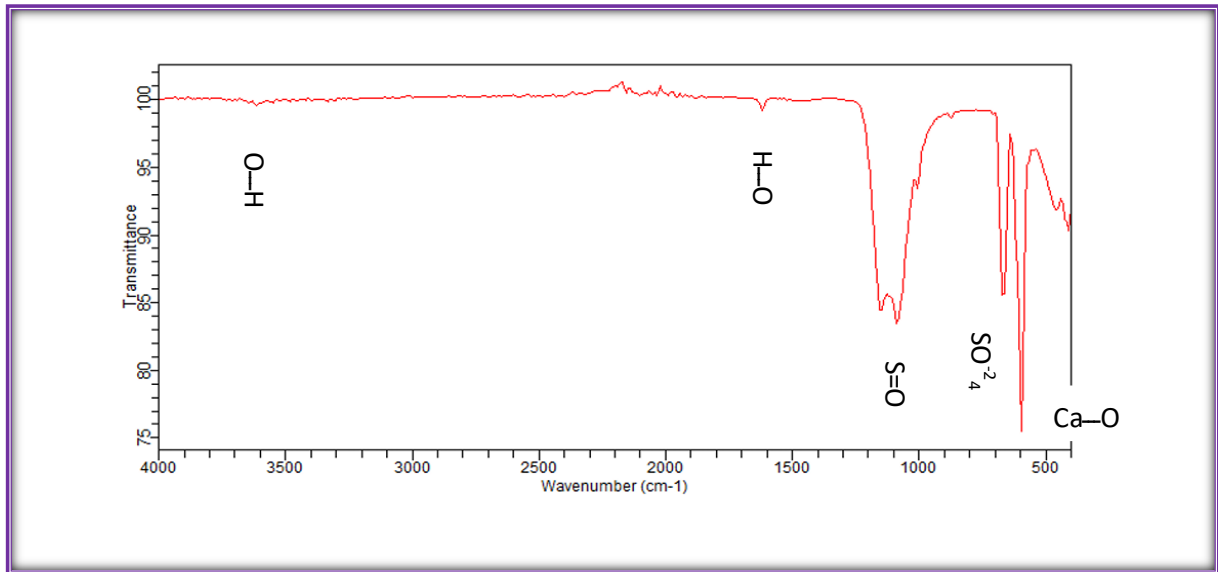


الشكل (III-9): جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR).

جدول (III-2): نطاقات الامتصاص المميزة في طيف FTIR لعينة من الجبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [4,3]

المجموعة الوظيفية	ملاحظات	نطاق الامتصاص (cm^{-1})
H—O	دليل على وجود الماء	1620-1680
O—H	نطاق عريض بسبب روابط الهيدروجين	3400-3550
S=O	قمم قوية ومميزة لمجموعة الكبريتات	1100-1140
SO_4^{2-}	قمم حادة مرتبطة بحركة الكبريتات	600-680
Ca—O	قمة ضعيفة نسبياً من روابط الكالسيوم	500-600

لدراسة الخصائص الكيميائية للعينة (Gy-3). تهدف هذه التقنية لتحديد المجموعات الوظيفية والروابط الكيميائية الموجودة في العينة، من خلال قياس الامتصاص الطيفي للأشعة تحت الحمراء ضمن مدى معين من الأطوال الموجية. يُعتبر FTIR أداة فعالة وغير مدمرة تُستخدم بشكل واسع في تحليل المواد العضوية وغير عضوية، للكشف عن مكوناته وتأكيد هويته الكيميائية.



الشكل (III-10): طيف الأشعة تحت الحمراء للعينة Gy-3.

III-7- مناقشة النتائج

III-7-1- مناقشة نتائج الأشعة السينية

بعد إتمام عملية تحسين المخطط الناتج من جهاز الانعراج الآلي للعينة المدروسة، تم استخراج النتائج النهائية من هذا المخطط المحسّن. وقد تم تلخيص هذه النتائج في الجدول (III-3) الذي يحتوي على الأطوار البلورية المكتشفة بالإضافة إلى نسب عوامل الثقة المرتبطة بعملية التحسين.

الجدول (3-III): نتائج تحسين ريتفالد لمخطط (XRD) تتضمن عوامل الثقة ونسبة تواجد الأطوار للعينة Gy.

عوامل الثقة %			نسبة التواجد %					العينة
R _{exp}	R _{WP}	R _P	SiO ₂	CaCO ₃	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Ca[SO ₄]	CaSO ₄ ·0.8H ₂ O	
18.81	29.24	20.58	1.56	0.38	13.81	28.7	55.50	Gy-1

ومن خلال هذه النتائج المتحصل عليها يمكننا أن نلاحظ ما يلي :

- تشكل كبريتات الكالسيوم شبه المائية (CaSO₄·0.8H₂O) الطور السائد في العينة بنسبة 55.50%، مما يشير إلى أن العينة خضعت لعمليات تسخين جزئية أدت إلى إزالة معظم ماء التبلور
- يظهر الطور كبريتات الكالسيوم ثنائية التبلور (CaSO₄·2H₂O) بنسبة 28.7%، وهو الطور الطبيعي للجبس ما يدل على بقاء جزء من الجبس دون تحلل حراري كامل.
- تمثل كربونات الكالسيوم (CaCO₄) نسبة 13.81% من التركيب، مما يعكس وجود شوائب كلسية أو احتمال إضافة الحجر الجيري كمادة خام مساعدة.
- تواجد ثاني أكسيد السيليكون (SiO₂) بنسبة منخفضة جداً تبلغ 0.38%، وهي تشير إلى وجود آثار من السيليكا، والتي قد تعود إلى شوائب طبيعية مثل الرمل أو الطين.

ومن خلال هذه الملاحظات يمكننا أن نستنتج أن:

- تُعد العينة Gy.1 غنية بطور الجبس نصف المائي (CaSO₄·0.8H₂O)، مما يدل على خضوعها لمعالجة حرارية جزئية.
- وجود نسبة معتدلة من طور الجبس الطبيعي (CaSO₄·2H₂O) يشير إلى أن عملية التحول إلى الطور نصف المائي لم تكن كاملة.
- تشير نسبة CaCO₃ إلى شوائب محتملة أو إضافات معدنية مقصودة ضمن عملية التحضير.
- تدني نسبة SiO₂ يعكس درجة النقاوة المرتفعة للعينة.

III-7-2- مناقشة نتائج المتحصل عليه للأشعة تحت الحمراء (FTIR)

من خلال الشكل (III-10) يمكننا أن نلاحظ وجود:

- ✓ نطاق cm^{-1} [3200–3400]: يظهر هذا الامتصاص الواسع بسبب اهتزازات O–H التمددية للماء الموجود في الجبس (الماء البلوري). يشير إلى وجود روابط هيدروجينية قوية.
- ✓ نطاق حوالي cm^{-1} [1600-1680]: يشير إلى اهتزازات انثناء جزيئات الماء H–O bending داخل البنية البلورية للجبس.

- ✓ نطاق $1100-1150 \text{ cm}^{-1}$: يدل على وجود روابط مزدوجة بين الكبريت والأكسجين ($\text{S}=\text{O}$) الموجودة في مجموعة الكبريتات.
 - ✓ نطاق $600-1100 \text{ cm}^{-1}$: امتصاص ناتج عن اهتزازات التماثل والانتشاء لمجموعة الكبريتات (SO_4^{2-})، وهو مميز في جميع مركبات الكبريتات.
 - ✓ نطاق $400-600 \text{ cm}^{-1}$: هذه الذروة تدل على وجود الكالسيوم المرتبط بالأكسجين، $\text{Ca}-\text{O}$ مما يعزز من تأكيد وجود كبريتات الكالسيوم.
- وهذا يعكس التركيب الكيميائي المعروف للجبس، ويؤكد أن العينة تحتوي على الجبس النقي نسبيًا.

III-8- تحضير العينات

تم تقسيم العمل إلى ثلاثة مراحل نذكرها بإيجاز:

بعد الدراسة الكيميائية الفيزيائية لعينات من جبس منطقة الفولية الصناعي بواسطة تقنيات (XRD, XRF, FTIR)

- ❖ **المرحلة الأولى:** تم صب عينات من جبس منطقة الفولية بالوادي المعبأ في الأكياس بأبعاد $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}$ سم من الأنواع الأربعة (جبس نقي، وجبس مضاف إليه الصبار، السعف، الحلفاء) بهدف دراسة فعاليتها الميكانيكية
- ❖ **المرحلة الثانية:** تم صب عينات أخرى من جبس منطقة الفولية بالوادي المعبأ في الأكياس بأبعاد $7 \times 5 \times 1 \text{ cm}$ فيها نفس الإضافات بهدف دراسة الناقلية (الموصلية) الحرارية
- ❖ **المرحلة الثالثة:** تم تشييد أربع بيوت صغيرة من جبس منطقة الفولية بالوادي المعبأ في الأكياس على حسب الأنواع الأربعة المذكورة سابقا بهدف دراسة تأثير الإضافات على درجات الحرارة داخل هذه البيوت .

III-8-1- تحضير العينات في المرحلة الأولى

قمنا بصب عينات من جبس منطقة الفولية الصناعي بأبعاد $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}$ وقد تم اختيار ألياف الصبار، وسعف النخيل، والحلفاء نظرًا لتوفرها المحلي في البيئة الصحراوية، وانخفاض تكلفتها، وكونها مواد طبيعية ومتجددة وصديقة للبيئة، مما يجعلها خيارًا مناسبًا ومستدامًا لتحسين خصائص الجبس. " بهدف دراسة فعاليته الميكانيكية والحرارية والجدول أدناه يوضح الكميات المتناسبة لجميع القوالب:

جدول (III-4): المقادير الوزنية الدقيقة لتحضير خلطة قالب صغير

كمية الجبس (g)	كمية الماء (g)	كمية الإضافة (g)
387	232.2	1.8

- تحضير الإضافات بعد قصها كما توضحه الأشكال الآتية



الصبار



السعف



الحلفاء

الشكل (III-11): تحضير الإضافات.

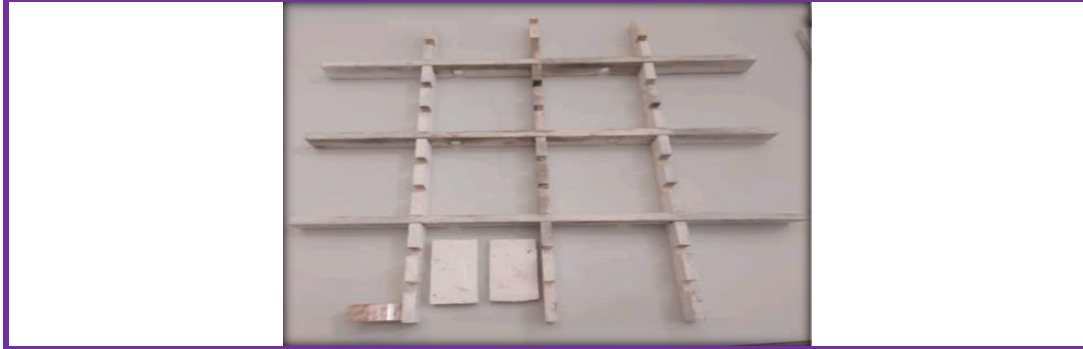
وبحيث يوضح الشكل (III-12) أدناه مخطط تحضير العينات حيث صنعت 3 قوالب لكل عينة، (جبس +ماء, جبس +صبار +ماء, جبس +سعف +ماء, جبس +حلفاء +ماء).



الشكل (III-12): طرق تحضير العينات في المرحلة الثانية.

III-8-2- تحضير العينات في المرحلة الثانية

تم بناء عينات من جبس منطقة الفولية بالوادي الصناعي بأبعاد $7 \times 5 \times 1$ cm مضاف إليها (الصبار، السعف، الحلفاء) كل عينة صنعت منها 10 عينات، بهدف دراسة فعاليته الحرارية مع الحفاظ على نفس القيمة الوزنية أي (كمية الماء، كمية الجبس وكمية الإضافة). ويمثل الشكل (III-13) صور تحضير هذه العينات :



- قوالب صناعة العينات -

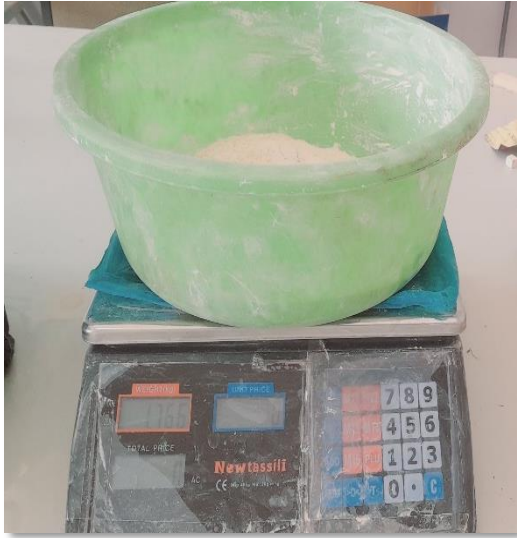


- العينات بعد التجفيف -

الشكل (III-13): طرق تحضير عينات في المرحلة الثالثة.

III-8-3- تحضير النماذج في المرحلة الثالثة

تم بناء أربعة غرف $3 \text{ cm} (15 \times 30 \times 45)$ ، وسمك الجدار 1.5 cm بحيث صممت انطلاقاً من نموذج كبير (حقيقي) بمقياس $\frac{1}{10}$ ، وهو يحتوي على باب ذو أبعاد $2 \text{ cm} (5 \times 10)$ ونافذة ذات أبعاد 3×5 cm والشكل (III-14) يوضح مراحل تحضير النماذج المصغرة انطلاقاً من صنع القوالب إلى بناء النماذج :



(b) وزن الجبس



(a) القوالب الخشبية المستعملة



(d) العينات بعد التجفيف



(c) صب الخلطة في القوالب الخشبية



(e) بداية البناء



(f) تركيب السقف



(g) استكمال تحضير أحد النماذج

الشكل (III-14): طرق تحضير عينات في المرحلة الرابعة.

III-9- الخلاصة

في هذا الفصل، تم الانتقال من الإطار النظري إلى الجانب التطبيقي من خلال تنفيذ مجموعة من التجارب المخبرية الهادفة إلى دراسة الخواص الفيزيائية والبنوية للمادة قيد الدراسة. وقد تم الاستعانة بتقنيات تحليلية متقدمة، أبرزها جهاز حيود الأشعة السينية (XRD) ومطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)، لدراسة التركيب البنوي والبلوري للمادة، وتحديد الروابط الجزيئية المميزة للأطوار المكونة لمادة الجبس. ساهمت هذه التحاليل في معالجة البيانات بشكل علمي واستخلاص معلومات دقيقة وقيمة تتعلق بالبنية البلورية والتكوين الجزيئي للعينات.

عقب هذه التجارب، تم الشروع في تحضير العينات بطريقة منهجية ومدروسة، بما يضمن تمثيلاً دقيقاً لخصائصها.

قائمة مراجع الفصل الثالث

- [1] بالهادف أسماء, الطويل سهيلة ، " دراسة تجريبية حول تحسين خواص جبس منطقة الفولية بالوادي"، مذكرة ماستر، جامعة الوادي, 2023.
- [2] غريب عبد الحميد ، " دراسة عامة لمادة الجبس منطقة الفولية بالوادي "، مذكرة ماستر، جامعة الوادي، 2022.

[3] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451912X17300703#bib66>

- [4] Sara Palacio and others, "Gypsophile Chemistry Unveiled: Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy Provides New Insight into Plant Adaptations to Gypsum Soils", Article in PLoS ONE, Volume 9, Issue 9, Spain 2014.

الفصل الرابع

تقييم الخصائص الفيزيائية

والميكانيكية للخطاط

IV -1- المقدمة

تهدف هذه الدراسة الى تحسين الخصائص الميكانيكية والحرارية للجبس الخام من خلال ادخال مواد طبيعية ذات ألياف نباتية مثل الصبار، السعف، والحلفاء. تتوفر هذه المواد محلياً وتعد صديقة للبيئة، ونحن ندرس هنا قدرتها على تحسين مقاومة الجبس للرطوبة والضغط وتقليل الموصلية الحرارية، مما يعزز من إمكانية استخدامه في تطبيقات البناء المستدام. تم تحضير أربع خلطات رئيسية هي:

❖ العينة 1 : جبس صناعي.

❖ العينة 2: جبس + ألياف الصبار.

❖ العينة 3 : جبس+ألياف السعف.

❖ العينة 4: جبس + ألياف الحلفاء، بالإضافة الى جبس أولاد جلال النقي جداً كمرجع [1]، وقمنا بدراسة مجموعة من الخواص لكل منها على غرار التجارب التالية:

1- تجارب ميكانيكية

- تجربة الانحناء (الشد).

- تجربة الضغط.

2- تجارب حرارية

- تجربة التوصيل الحراري.

- تجربة قياس درجة الحرارة.

- تجربة الرطوبة.

IV -2- اختبار خواص العينات الميكانيكية (مقاومة الانحناء والضغط)

تم إجراء التجارب الميكانيكية بعد فترة تجفيف كافية استمرت لمدة 21 يوماً لضمان استقرار العينات وتحقيق نتائج دقيقة. استُخدمت آلة اختبار الضغط والشد (Compression Testing Machine) وفقاً للمعايير المعتمدة. ولكل خلطة، أُجريت تجربتان لتحديد خواصها الميكانيكية بدقة، شملت اختبار مقاومة الانحناء واختبار مقاومة الضغط.

تهدف تجربة مقاومة الانحناء (الشد غير المباشر) إلى قياس قدرة العينات على تحمل قوى الانحناء، حيث تم تثبيت كل عينة على الجهاز وتطبيق القوة F ، ثم سُجلت القيم المتعلقة بالقوة والضغط لكل حالة.

ولحساب مقاومة الانحناء (R_f) تم أولاً حساب المتوسطات لكل من القوة والضغط، ثم قمنا باستعمال القانون التالي لحساب مقاومة الانحناء :

$$R_f = \frac{1.5FL}{bh^2} \dots \dots \dots (1 - IV)$$

R_f - مقاومة الانحناء بـ MPa.

F - القوة المطبقة على العينة KN.

L - المسافة بين نقطتي الارتكاز بـ cm .

b - عرض العينة بـ cm.

h - ارتفاع العينة بـ [2] cm .

بما أن تجربة الانحناء أدت إلى تقسيم كل عينة إلى جزئين، فقد تم الاحتفاظ بأحد هذين الجزئين لإجراء اختبار مقاومة الضغط، وذلك بهدف الاستفادة من نفس العينة في تقييم الخصائص الميكانيكية. بعد الانتهاء من اختبار الانحناء، وُضعت الأجزاء المتبقية من العينات في جهاز الضغط، حيث طُبقت عليها قوى تدريجية متزايدة إلى غاية لحظة الانهيار. وقد سُجّلت القوة القصوى التي تسببت في كسر العينة، والتي تُمثل معيارًا لمقاومتها للضغط". الشكل (1- IV).

والجدولين (1- IV) و (2- IV) يلخصان نتائج تجربتي الانحناء والضغط على الترتيب.

الجدول (1- IV): نتائج تجربة الانحناء.

اسم العينة	ترميز العينة	القوة KN	الضغط المتوسط Mpa	مقاومة الانحناء R_f (Mpa)
الجبس والماء	GY ₁	0.7	1.655	0.1640
الجبس والماء والصبان	GY ₂	0.7	1.58	0.1640
الجبس والماء والسعف	GY ₃	1.15	2.66	0.2695
الجبس والماء والحلفاء	GY ₄	1.05	2.455	0.2461

الجدول (2- IV): نتائج تجربة الضغط.

اسم العينة	ترميز العينة	القوة KN	الضغط المتوسط Mpa	مقاومة الانحناء R_f (Mpa)
الجبس والماء	GY ₁	7.2	4.495	1.6875
الجبس والماء والصبان	GY ₂	5.3	3.32	1.2422
الجبس والماء والسعف	GY ₃	6.4	3.975	1.5
الجبس والماء والحلفاء	GY ₄	7.35	4.59	1.7227

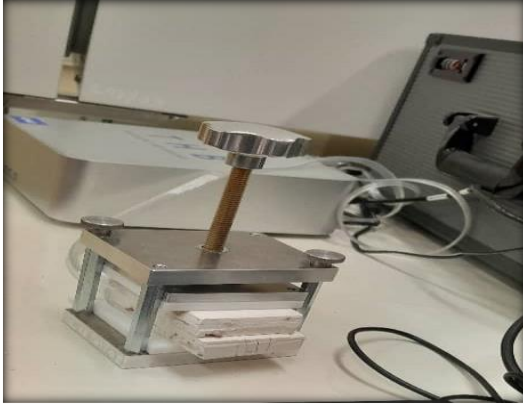


الشكل (1-IV): آلة اختبار الانحناء والضغط.

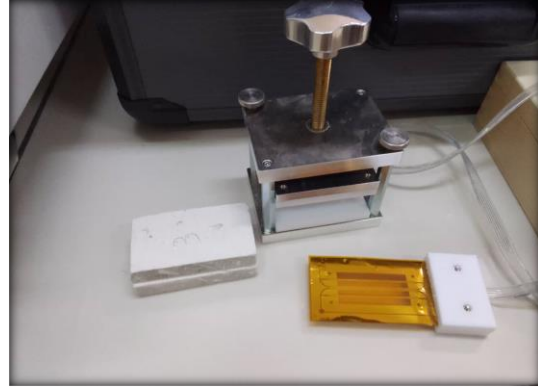
3-IV- تجربة التوصيل الحراري (قياس الناقلية الحرارية)

تم قياس الموصلية الحرارية للعينات الأربعة المحضرة بالإضافة الى عينة خامسة تمثل جبس أولاد جلال النقي جداً، بهدف مقارنة تأثير الإضافات النباتية على الخاصية الحرارية للجبس. استُخدم جهاز قياس الموصلية الحرارية [Transient Hot Bridge] THB، والذي يعتمد على التدفق الحراري الثابت أو غير المباشر حسب الظروف.

تم تثبيت العينات في الجهاز بعد التأكد من تجانس أبعادها وكتلتها $(1/5/7)$ cm، وأجري القياس عند درجة حرارة الغرفة (حوالي 25°C) كما يمثل الشكل الآتي تجربة قياس الناقلية الحرارية. تم تكرار القياس 5 مرات لكل عينة لضمان الموثوقية.



(b) وضع المسبار الحراري بين سطحين مستويين من العينة.



(a) تنظيف المسبار بعد كل استخدام لضمان دقة القياس وتحضير العينة.



(c) ظهور النتائج على برنامج الحاسوب المتصل بالجهاز.

الشكل (2-IV): تجربة الموصلية الحرارية باستخدام جهاز THB.

- GF: جيس الفولية فقط .
- GFS: جيس +ألياف الصبار.
- GFF : جيس+ألياف السعف.
- GFH : جيس +ألياف الحلفاء.
- GO : جيس أولاد جلال فقط.

الجدول (3-IV): قيم الموصلية الحرارية لجبس الفولية (بدون وبوجود الإضافات) وجبس أولاد جلال النقي

اسم العينة	الموصلية الحرارية Watt/m.k
GF ₁	0.3316
GF ₂	0.4679
GF ₃	0.4103
GF ₄	0.4728
GF ₅	0.4606
GFS ₁	0.4905
GFS ₂	0.2036
GFS ₃	0.4314
GFS ₄	0.483
GFS ₅	0.5048
GFF ₁	0.355
GFF ₂	0.3767

اسم العينة	الموصلية الحرارية Watt/m.k
GFF ₃	0.3017
GFF ₄	0.4865
GFF ₅	0.5289
GFH ₁	0.369714
GFH ₂	0.3533
GFH ₃	0.3594
GFH ₄	0.4405
GFH ₅	0.4718
GO ₅	0.548
GO ₂	0.5463
GO ₃	0.5023
GO ₄	0.5485
GO ₅	0.5091

بعد القيام بحساب القيمة المتوسطة للموصلية الحرارية لكل عينة تحصلنا على النتائج المدرجة في الجدول التالي :

الجدول (4-IV): قيم الموصلية الحرارية المتوسطة لعينات من جبس الفولية بدون وبوجود الإضافات وجبس أولاد جلال النقي.

العينة	تركيبية العينة	الموصلية الحرارية (W/m·K)
عينة 1	GF 01	0.4286
عينة 2	GFS 02	0.4227
عينة 3	GFF 03	0.4098
عينة 4	GFH 04	0.3989
عينة 5	GO 05	0.5308

4-IV- قياس درجة الحرارة T

ولقياس وتسجيل درجة الحرارة في هذه التجربة التي نقوم بها ، تم استعمال جهاز من النوع-PCE T1200, الذي يسمح بأخذ 12 قياساً متزامناً الشكل (4-IV) ضمن إطار تجربة العزل الحراري لنماذج القوالب الجبسية (العرف)، وتتضمن هذه النماذج إضافاتٍ وهي (الصبار،السعف،الحلفاء) بحيث يتطلب قياس أدائها الحراري في فترات زمنية محددة لضمان دقة البيانات المُسجلة، والتي تعكس بدورها كفاءة المواد العازلة المُستخدمة. ولتحقيق ذلك، يتم أخذ القراءات الحرارية من داخل وخارج القوالب على فترات منتظمة.

لتقييم فعالية العزل الحراري للمواد تحت هذا الاختبار. قسمنا التجربة الى جزئين، ففي الجزء الأول تم أخذ القياسات داخل المخبر كحيز مغلق بعيد عن التأثيرات الخارجية، ثم أخذ القياسات في الهواء الطلق في الجزء الثاني (الشكلين (4-IV) و (5-IV)) كما أختبرنا بعد القياس أخذ نتائج كل ساعة لكل قالب.



الشكل (4-IV): أخذ القياسات داخل المخبر.

الشكل (3-IV): الجهاز الخاص بتسجيل درجات الحرارة في تجربة العزل الحراري.



الشكل (5-IV): أخذ القياسات في الهواء الطلق.

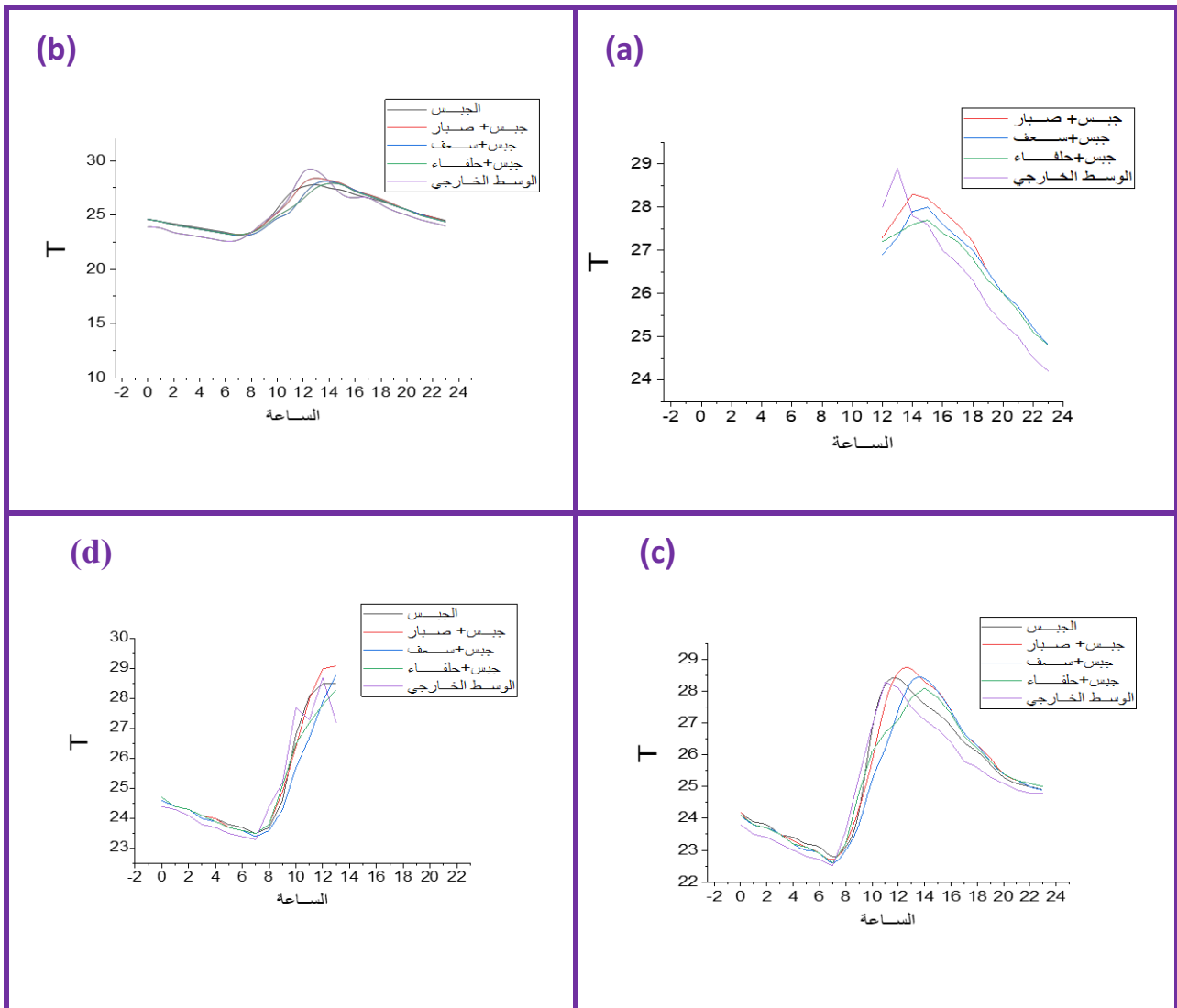
تمت المعالجة الإحصائية لبيانات كل غرفة من خلال التركيز على القيم الإحصائية الأساسية بدلاً من عرض جميع القيم اليومية المفردة، وقد تم تلخيص بيانات كل غرفة باستخدام المتوسط الحسابي والانحراف المعياري، بهدف استخراج مؤشرات إحصائية تُبين السلوك الحراري العام لكل نموذج، بناءً على ذلك، تم اعتماد القيم اليومية الدنيا والعليا لدرجات الحرارة ومن ثم حساب المتوسط العام والانحراف المعياري لكل نموذج وفق المعادلتين (3-IV) و (4-IV) على الترتيب:

$$\bar{x} = x_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \dots \dots \dots (3-IV)$$

$$\sigma = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} \dots \dots \dots (4 - IV)$$

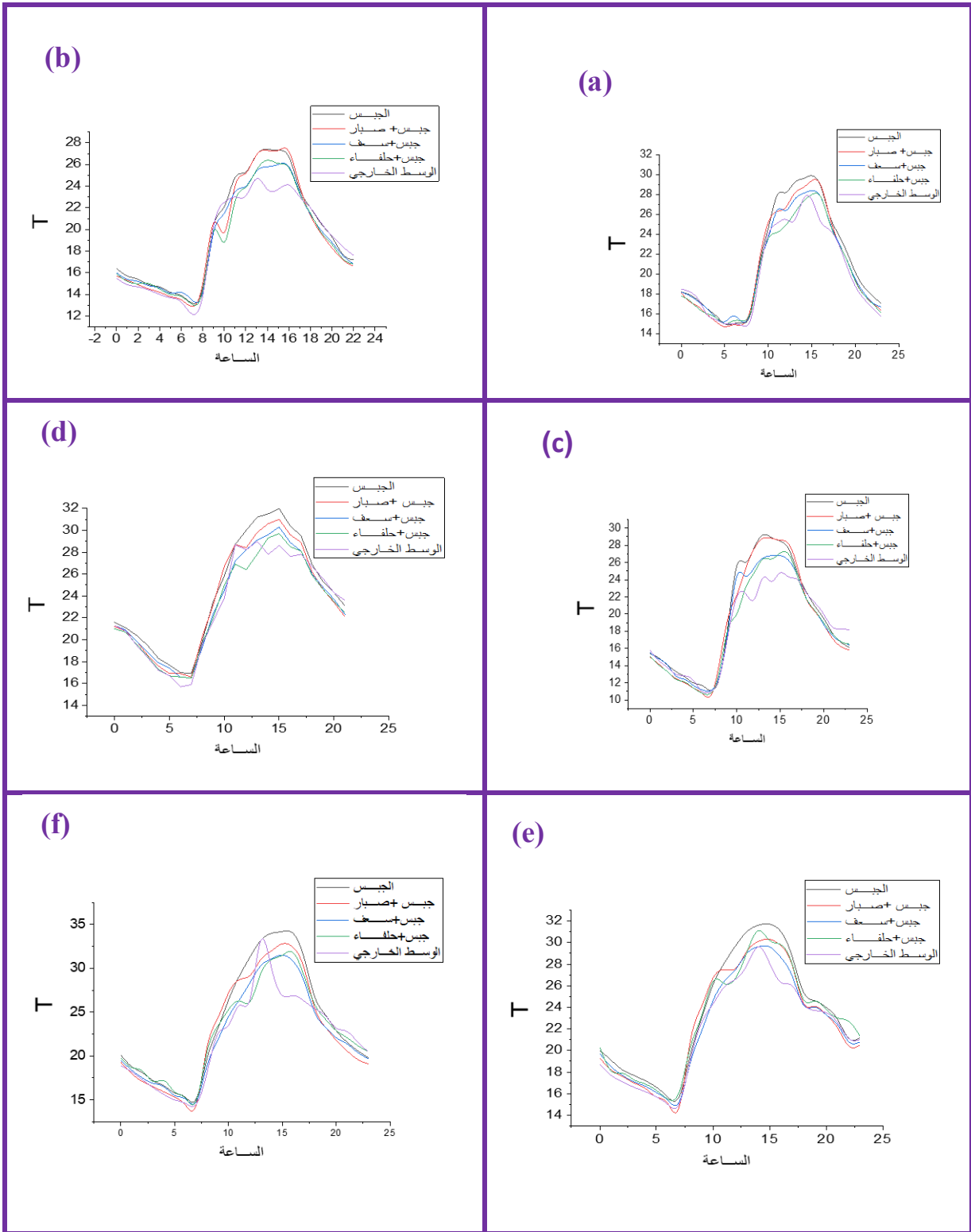
- σ : الانحراف المعياري للعينة.
- n : عدد القيم في العينة.
- x_i : كل قيمة في العينة.
- \bar{x} : المتوسط الحسابي للعينة.

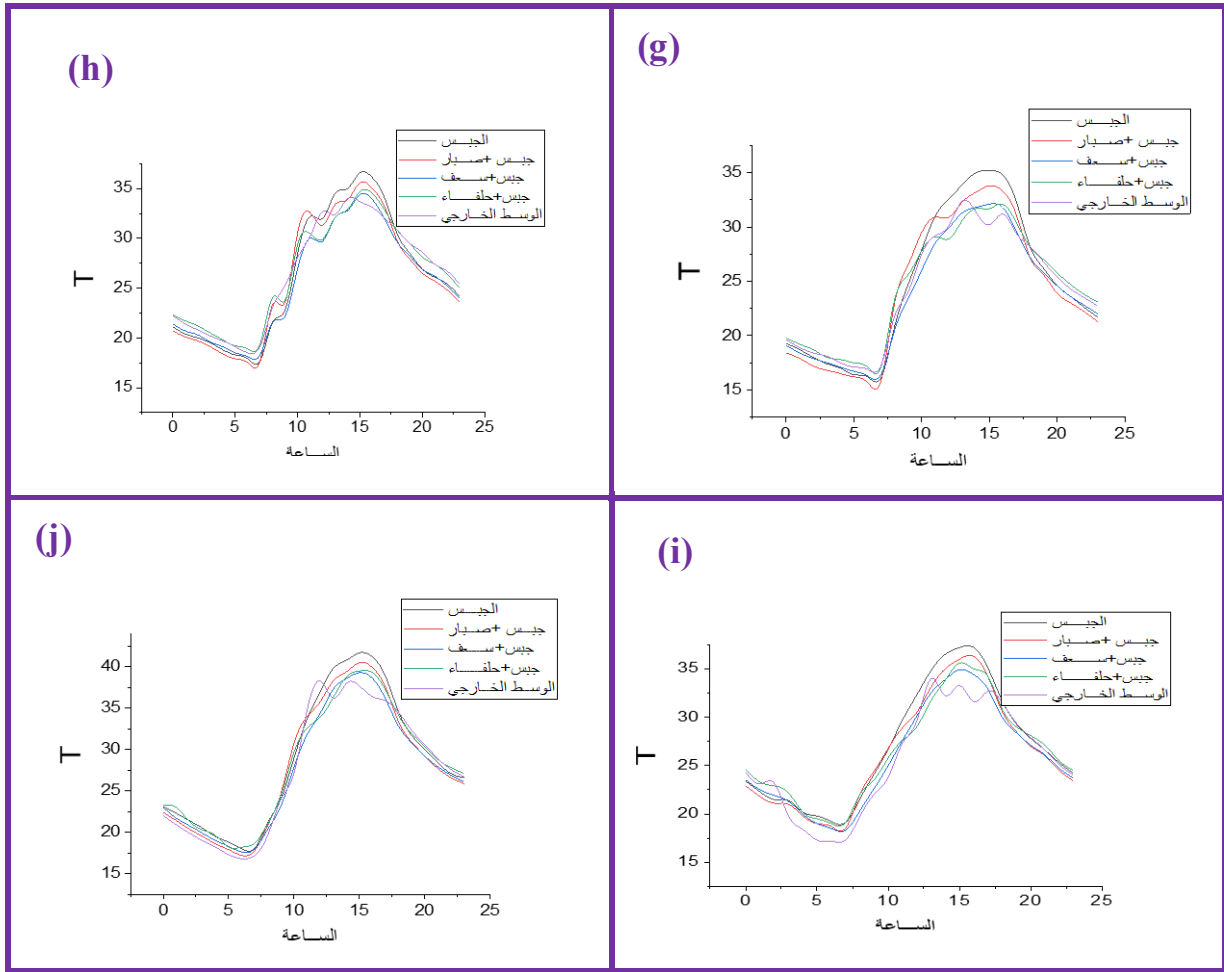
والشكلين (6 -IV) و(7 -IV) يمثلان منحنيات تغير درجة الحرارة للنماذج في داخل المخبر وخارجه (الهواء الطلق) على الترتيب.



الشكل (6 -IV): منحنيات تغير درجة الحرارة T بدلالة الزمن للنماذج داخل المخبر للأيام

2025-03-19 (a) , 2025-03-20 (b) , 2025-03-21 (c) , 2025-03-22 (d)





الشكل (IV-7): منحنيات تغير درجة الحرارة T بدلالة الزمن للنماذج في الهواء الطلق

2025-04-06 (d), 2025-03-28 (c), 2025-03-27 (b), 2025-03-26 (a)

2025-04-10 (h), 2025-04-09 (g), 2025-04-08 (f), 2025-04-07 (e)

. 2025-04-12 (j), 2025-04-11 (i)

5-IV- دراسة تغير الكتلة بعد التعرض للرطوبة

تم تنفيذ تجربة بهدف تقييم قدرة العينات على امتصاص الرطوبة، وهو عامل مهم في تحديد مدى مقاومة المادة للظروف البيئية والرطوبة، وقد تم اتباع الخطوات التالية:

(1) تجفيف العينات: وضعت جميع العينات في الهواء الطلق لمدة 45 يوم لضمان التخلص من أي رطوبة أولية.

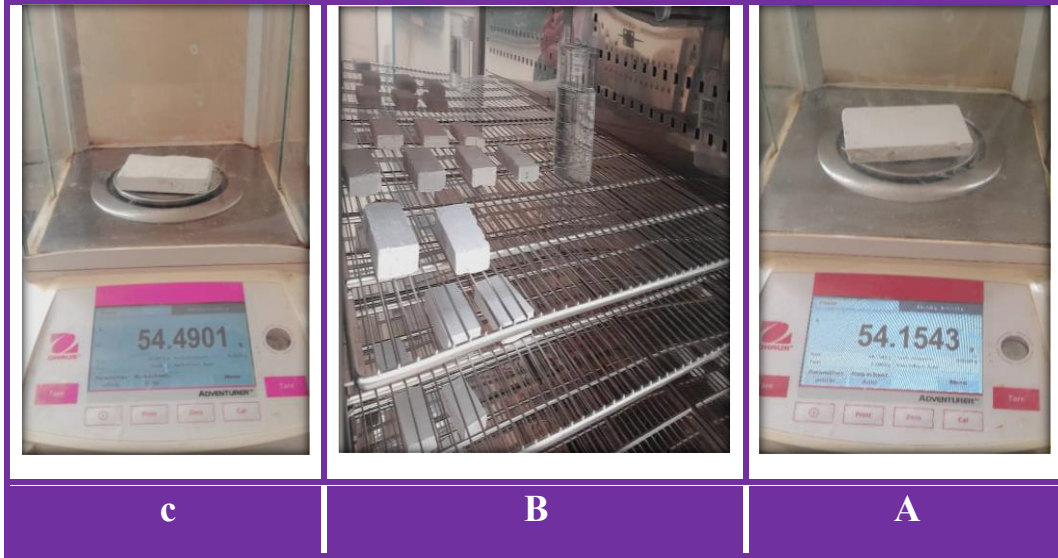
(2) الوزن قبل التعرض للرطوبة: تم وزن كل عينة مباشرة وتسجيل الكتلة m لكل منها (الشكل A).

(3) تعريض العينات للرطوبة: وضعت العينات في غرفة ذات رطوبة نسبية عالية ($RH > 90\%$) لمدة 24 ساعة (الشكل B).

(4) الوزن بعد التعرض للرطوبة: إعادة وزن العينات وتسجيل الكتلة m' (الشكل C).

وبناءً على ما سبق تم حساب النسبة المئوية لامتصاص الرطوبة وفق العلاقة:

$$M(\%) = \frac{(m - m')}{m} \times 100 \dots\dots\dots (4 - IV)$$



الشكل (8-IV): تجربة الرطوبة (a) وزن العينة قبل التعرض للرطوبة ، (b) العينات في غرفة رطوبة، (c) وزن العينة بعد التعرض للرطوبة

ويتضمن الجدول (5-IV) متوسط القيم الخاصة بالعينات المدروسة، حيث يعرض كتل قبل وبعد تعرضها للرطوبة، بالإضافة الى النسب المئوية للتغير في الكتلة .

الجدول (5-IV): جدول يحتوي على المتوسط الحسابي لكتل العينات قبل وبعد التعرض للرطوبة، النسب المئوية للتغير في الكتلة.

اسم العينة	m (g)	m'(g)	نسبة المئوية %
GO	44.6279	44.9160	0.7
GF	41.1415	41.1550	0.03
GFS	44.8066	44.8450	0.09
GFF	46.4366	46.4691	0.07
GFH	44.0594	44.0794	0.05

IV-6- مناقشة النتائج

IV-6-1- تجربة الانحناء

- ان عينة من الجبس مع الماء تبرز مقاومة إنحناء صغيرة مما يشير أن قوة تحمل الجبس للكسر ضعيفة.
 - إن إضافة الصبار الى الجبس مع الماء لم يحسن من مقاومة الضغط مقارنة بالخلطة الأساسية أي لم يحدث أي تغير لخصائص الجبس الميكانيكية.
 - إن إضافة السعف تظهر كأفضل المواد من حيث مقاومة الضغط (أي بنسبة 64%) مقارنة بالخلطة الأساسية مما يعمل على تحسين قدرة الجبس على تحمل الكسر مقارنة بالصبار أي مما يعزز الترابط بين جزيئات الجبس.
 - إن إضافة الحلفاء حسنت من مقاومة الضغط ولكن بدرجة أقل من السعف.
- ومنه فإنه يمكننا أن نستنتج أن:

- 1- إضافة الصبار لم يحدث أي تغير ملحوظ على القوة الميكانيكية للجبس.
- 2- إضافة السعف تُعطي أفضل أداء في مقاومة الجبس للضغط والانحناء بين جميع الإضافات ومن الناحية الميكانيكية يعطينا مادة مركبة أكثر قوة وتحملًا.
- 3- إضافة الحلفاء تحسن من مقاومة الجبس للضغط قليلاً مقارنة بالصبار.

IV-6-2- تجربة الضغط

- تظهر عينة الجبس مع الماء قوة جيدة مقارنة ببعض العينات الأخرى. حيث أن الماء يساعد على تحسين الترابط البلوري في الجبس، مما يعزز من قدرته على تحمل الضغط.
 - إن إضافة الصبار إلى الجبس مع الماء تقلل من قوة التحمل مقارنة بالعينة السابقة. وقد يكون هذا بسبب تأثير الصبار في تغيير الخصائص الميكانيكية للجبس، مثل زيادة المسامية أو تقليل الترابط بين البلورات.
 - إن إضافة السعف تعمل على تحسين قدرة الجبس على التحمل مقارنة بالصبار، رغم أنها أقل من الجبس والماء فقط. قد يوفر السعف بعض الدعم الهيكلي ولكنه ليس بفعالية الماء فقط.
 - تبرز العينة التي تحتوي الحلفاء كأفضل المواد من حيث المقاومة للضغط بين العينات التي تحتوي على إضافات. حيث أن الحلفاء تساهم في تعزيز الترابط بين جزيئات الجبس وتحسين مقاومتها للضغط.
- وفي هذه التجربة نستنتج أن:

- 1- الجبس المخلوط بالماء يظهر أداءً جيدًا في مقاومة الضغط مقارنة ببقية الإضافات.
- 2- إضافة الصبار تقلل من القوة الميكانيكية للجبس، مما قد يشير إلى تأثير سلبي في هذا السياق.
- 3- إضافة السعف تحسن من مقاومة الجبس للضغط قليلاً مقارنة بالصبار.

4- إضافة الحلفاء تعطي أفضل أداء في مقاومة الضغط بين جميع الإضافات، مما يشير إلى فعاليتها في تحسين خواص الجبس.

IV -3-6- اختبار العزل الحراري

1- قياس الموصلية الحرارية

استعمل جبس أولاد جلال في هذه التجربة كمرجع:

- **جبس أولاد جلال:** أعلى قيمة للموصلية الحرارية، أقل عزلاً حراريًا.
 - **جبس الفولية:** قيمة الموصلية أقل من جبس أولاد جلال، مما يعني أنه يعزل حرارة أفضل نسبيًا.
- ملاحظة: كلما كانت قيمة الموصلية الحرارية أقل، كان العزل الحراري أفضل.

1. جبس الفولية أفضل في العزل الحراري من جبس أولاد جلال بنسبة كبيرة

0.5308 → 0.4286 أي انخفاض بنسبة %19 ≈

2. كل الإضافات الطبيعية حسنت من أداء العزل مقارنة بالجبس الفولية الخالص.

3. الحلفاء كانت المادة الأكثر فعالية في تحسين العزل الحراري.

في هذه الحالة نستنتج أن:

إضافة الحلفاء للجبس يُعد الخيار الأفضل لعزل الحرارة. ما يجعلها واعدة في تطبيقات البناء المستدام.

2- قياس درجة الحرارة T

❖ المرحلة الأولى: داخل المخبر

أظهرت الحلفاء أداءً متميزًا في الحفاظ على استقرار درجات الحرارة الداخلية خلال الأيام الأربعة الأولى من التجربة، حيث سجلت:

- أقل انحراف معياري (Standard Deviation) .
- أقل فرق بين أعلى وأدنى درجة حرارة ($T_{max} - T_{min}$) .
- درجة حرارة متوسطة (T_{moy}) مقبولة .

ومن ثم يمكن القول إن الحلفاء كانت الخيار الأمثل للعزل الحراري تحت الظروف المخبرية، وذلك لثباتها الكبير وتقليلها للتغيرات الحرارية اليومية .

❖ المرحلة الثانية: في الهواء الطلق

تم إجراء التجربة في بيئة خارجية على مدى 10 أيام، وتم تقييم أداء الإضافات الثلاث (الجبس، الحلفاء، السعف) بناءً على:

- متوسط درجة الحرارة الداخلية (T_{moy}) .
- الانحراف المعياري (σ) كقياس للثبات.
- فرق $T_{max} - T_{min}$ كمؤشر لتقلبات الحرارة.

الحلفاء كانت الأفضل أداءً في 6 من أصل 10 أيام، من حيث الثبات الحراري وتقليل التذبذب، مع أداء متقارب جدًا مع السعف في بقية الأيام. تفوقها في الحفاظ على توازن حراري جيد يجعلها خيارًا فعالًا للعزل الحراري في الظروف البيئية الخارجية.

وفي هذه التجربة نستنتج أن:

إضافة الحلفاء إلى الجبس تحسّن بوضوح من خواصه العازلة للحرارة، وتجعله أكثر ملاءمة للاستخدام في الظروف المختلفة، الداخلية والخارجية، وذلك بفضل تميزها في :

- التوازن بين الثبات والتقلب الحراري.
- القدرة العالية على تقليل التذبذبات الحرارية.

تقدم السعف أداءً جيدًا أيضًا، خاصة من حيث خفض درجة الحرارة المتوسطة، لكنه أقل استقرارًا من الحلفاء في معظم الأيام .

كان الجبس الخالص الأقل فعالية في العزل مقارنة بالمواد الأخرى، واحتل المرتبة الأخيرة في معظم الأيام .

IV-6-4- تجربة الرطوبة

ومن خلال نتائج المدرجة في الجدول (5-IV) يمكننا أن نلاحظ:

- سجل جبس أولاد جلال سجل أعلى نسبة امتصاص للرطوبة.
- سجل جبس الفولية انخفاضًا بنسبة كبيرة مقارنة بجبس أولاد جلال.
- (جبس الفولية + الحلفاء) كان أقل امتصاص للرطوبة من بين جميع الإضافات، مما يدل على أن الحلفاء لها خصائص مانعة لتسرب الماء.

وفي هذه التجربة نستنتج أن:

المواد النباتية المضافة للجبس تؤثر بشكل فعال في تقليل امتصاص الرطوبة، بنسب متفاوتة، حيث كانت الحلفاء هي الأكثر فعالية يليها السعف ثم الصبار، بينما كانت عينة جبس أولاد جلال الأكثر امتصاصًا للرطوبة مقارنة بجبس الفولية بدون إضافة.

IV -6-5- الاستنتاج العام

من خلال تحليل النتائج المستخلصة من التجارب المختلفة (مقاومة الانحناء، مقاومة الضغط، والعزل الحراري)، يمكن استخلاص نمط واضح حول تأثير الإضافات الطبيعية (الصبان، الحلفاء، السعف) على خواص الجبس :

1. **الحلفاء** أظهرت أفضل الأداء بشكل عام، حيث :

❖ حسنت مقاومة الجبس للضغط.

❖ عززت خصائص العزل الحراري.

❖ قدّمت استقرارًا حراريًا أعلى وقادرًا على تقليل التذبذبات الحرارية.

2. **السهف** أظهرت أداءً مميزًا من ناحية المقاومة الميكانيكية (خاصة الانحناء)، لكنها جاءت في المرتبة الثانية بعد الحلفاء من حيث العزل الحراري واستقرار درجات الحرارة .

3. **الصبان** كانت أقل فعالية بين الإضافات، حيث:

❖ لم تُحسن القوة الميكانيكية، بل ساهمت في تقليلها في بعض الحالات.

❖ لم تقدم أي تحسن ملحوظ في خصائص العزل الحراري.

4. **الجبس الخالص** (بدون إضافات) كان الأقل كفاءة من حيث العزل الحراري، رغم أنه أظهر مقاومة ضغط جيدة مقارنة ببعض الإضافات.

يمكن إذا القول إن إضافة الحلفاء إلى الجبس تمثل الخيار الأمثل لتحسين كل من الخصائص الميكانيكية والحرارية، مما يجعلها مادة واعدة للاستخدام في البناء المستدام. بينما يُفضّل استخدام السعف عند التركيز على التحمل الميكانيكي، ويُنصح بتجنب الصبان في حال الرغبة في تحسين الخصائص الهيكلية أو العازلة للجبس.

IV -7- الخلاصة

في هذا الفصل، تم تنفيذ سلسلة من التجارب العلمية المخبرية على عينات من الجبس المحضّر مسبقًا، وذلك بهدف دراسة وتحليل تأثير بعض الإضافات الطبيعية المحلية على الخصائص الميكانيكية، الحرارية والفيزيائية لهذه المادة. وقد استُخدمت في هذه الدراسة عينات من جبس منطقة "الفولية"، نظرًا لتسويقه الواسع في عدة مناطق محلية، بالإضافة إلى خصائصه الأولية التي تؤهله للتطوير والتحسين.

شملت الإضافات المختارة للدراسة ثلاث مواد نباتية طبيعية متوفرة في البيئة المحلية، وهي: الصبان، السعف، والحلفاء. وقد تم اختيار هذه المواد لوفرتها في المنطقة، وكونها مواد طبيعية متجددة، غير سامة، قابلة للتحلل الحيوي، وصديقة للبيئة. إن استخدام هذه الإضافات في تحسين مواد البناء يسهم في تقليل الأثر

البيئي، ويدعم توجهات البناء الأخضر والاستدامة. كما قد تساهم في تحسين سلوك الجبس عند التعرض لعوامل ميكانيكية وبيئية مختلفة، مثل الضغط، الانحناء، الحرارة، والرطوبة.

وتهدف هذه الدراسة إلى استكشاف مدى فعالية هذه الإضافات في تحسين أداء الجبس مقارنة بالعينة المرجعية (الجبس مع الماء فقط)، بالإضافة إلى دراسة الفروقات بين المواد المضافة من حيث تأثيرها على الخصائص الميكانيكية والحرارية للجبس.

وقد أظهرت النتائج أن لكل مادة مضافة تأثيراً نوعياً مميزاً، حيث تم التوصل إلى نتائج مهمة تُبرز فعالية الإضافات النباتية المستخدمة في تحسين الخصائص المختلفة لمادة الجبس. وقد تبين أن إضافة الحلفاء إلى الجبس تؤدي إلى تحسن معتبر في الخصائص الميكانيكية والحرارية، كما أن استخدامها كعازل طبيعي يساعد على تقليل التذبذب الحراري بين الوسط الخارجي والداخلي، مما يدعم الحفاظ على درجة حرارة مستقرة داخل المبنى.

قائمة مراجع الفصل الرابع

[1] غريب عبد الحميد، دراسة عامة لمادة جبس منطقة الفولية بالوادي، مذكرة ماستر، جامعة حمة لخضر بالوادي، 2022.

[2] زغيب شيماء ، عنقور مفيدة ،تأثير بقايا الحجر الجيري ونشارة الخشب عل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية على الطوب المصمت ، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرياح ،ورقلة .

الجامعة العامة

خاتمة عامة

ينقسم هذا العمل إلى شقين رئيسيين: جانب نظري وآخر تجريبي. في الجزء النظري، تم التطرق إلى معلومات عامة حول مادة الجبس، مع تقديم وصف جيولوجي لمنطقة الفولية في ولاية الوادي، التي تمثل مصدر العينة محل الدراسة. كما تناولنا الخصائص المميزة للجبس المحلي مقارنة بأنواع الجبس من مناطق أخرى، إلى جانب توضيح المفاهيم الأساسية المتعلقة بالجبس وخصائصه الفيزيائية والكيميائية، فضلاً عن تأثير الرطوبة والعوامل المناخية على أدائه في تطبيقات البناء.

أما في الفصل الثاني من الجزء النظري، فقد تم عرض التقنيات والأدوات المعتمدة في الدراسة، وتشمل: تقنية انعراج الأشعة السينية (XRD)، وتقنية التحليل الطيفي باستخدام فلورية الأشعة السينية (XRF)، بالإضافة إلى مطيافية امتصاص الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)، بهدف دراسة البنية والتركيب الكيميائي للجبس. كذلك، تم استخدام جهاز الشد والضغط لتحليل استجابة الجبس تحت تأثير القوى الميكانيكية، إلى جانب قياس الموصلية الحرارية، لتقييم الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخلطات الجديدة.

في الجانب التجريبي، تم تحضير عينات الجبس مع إضافة بعض المواد الطبيعية بهدف تحسين خصائصه الميكانيكية والحرارية. وشملت هذه الإضافات كلاً من ألياف الصبّار، وسعف النخيل، ونبات الحلفاء. وقد تم تجفيف هذه الألياف بشكل جيد قبل استخدامها، لضمان جفافها التام وتفاذي تأثير الرطوبة على خصائص العينات. كما تم تحضير عينة مرجعية من الجبس دون أية إضافات، لغرض المقارنة. أظهرت النتائج أن خلط الجبس مع ألياف الحلفاء أدى إلى تحسين ملحوظ في خواصه الميكانيكية، حيث ازدادت مقاومته للانضغاط. بالإضافة إلى ذلك، ساهمت إضافة الحلفاء في تقليل الموصلية الحرارية للجبس، مما يجعله مناسباً للتطبيقات التي تتطلب عزلاً حرارياً عالي الكفاءة. كما تبين أن الجبس المستخرج من منطقة الفولية يمتاز بانخفاض قدرته على امتصاص الرطوبة مقارنةً بجبس منطقة أولاد جلال، مما يمنحه ميزة إضافية في الاستخدامات التي تتطلب مقاومة للرطوبة.

الأفاق المستقبلية

- في ضوء النتائج المتوصل إليها، تبرز عدة اتجاهات واعدة يمكن استكشافها مستقبلاً لتعزيز الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمواد قيد الدراسة. من أبرز هذه التوجهات:
- **زيادة نسب المواد المضافة** تمثل خطوة مهمة نحو تحسين أداء الخلطات، حيث يمكن أن تسهم هذه الزيادة في تعزيز التماسك والمقاومة، خاصة في البيئات ذات الظروف القاسية.
- تُعد مادة "الحلفاء" من **الإضافات الواعدة**، وقد أظهرت فعالية ملحوظة، مما يشير إلى إمكانية توسيع استخدامها ودراسة تأثير نسب مختلفة منها على خواص المواد في تطبيقات متنوعة.
- من التوجهات المستقبلية المثيرة للاهتمام أيضاً **تعديل شكل الإضافات الفيزيائي**، كتحويلها إلى صورة بودرية (مسحوق ناعم)، وهو ما يُتوقع أن يُحسن من معدل التفاعل الداخلي ويُعزز التجانس البنيوي داخل الخليط.

- وبما أن امتصاص الرطوبة يُعد من أبرز التحديات عند استخدام الجبس، فإن استخدام مواد عازلة أو تأسيس طبقات أولية من الأسمنت يُعتبر حلاً تقنيًا واعدًا، يستدعي المزيد من البحث لتحديد المواد المثلى وطرق التطبيق الأكثر فاعلية.

الملاحق

الملاحق

الملحق 1

1- نتائج قياس درجة الحرارة للنماذج داخل المخبر

اليوم الأول 2025-03-19

النموذج	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	σ (°C)
الجبس	24.9	27.6	26.55	0.91
الجبس+الصبان	24.8	28.3	26.87	1.20
الجبس+السعف	24.8	28	26.68	1.05
الجبس+الحلفاء	24.8	27.7	26.59	1.01
الوسط الخارجي	24.2	28.9	26.41	1.5

اليوم الثاني 2025-03-20

النموذج	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	σ (°C)
الجبس	23.2	27.8	25.3	1.51
الجبس+الصبان	23.2	28.4	25.37	1.6942
الجبس+السعف	23.1	28.1	25.18	1.59
الجبس+الحلفاء	23.2	27.9	25.175	1.50
الوسط الخارجي	22.6	29.1	25.03	1.95

اليوم الثالث 2025-03-21

النموذج	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	σ (°C)
الجبس	22.8	28.4	25.2875	1.81
الجبس+الصبان	22.7	28.7	25.354	1.9587
الجبس+السعف	22.6	28.4	25.15	1.84
الجبس+الحلفاء	22.6	28.1	25.21	1.73
الوسط الخارجي	22.5	28.3	25.05	1.78

اليوم الرابع 2025-03-22

النموذج	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	σ (°C)
الجبس	23.5	28.5	25.18	1.89
الجبس+الصبان	23.5	29.1	25.25	2.019
الجبس+السعف	23.4	28.8	24.92	1.71
الجبس+الحلفاء	23.5	28.3	25.06	1.66
الوسط الخارجي	23.3	28.7	25.07	1.83

الملحق 2

2- نتائج قياس درجة الحرارة للنماذج في الهواء الطلق

اليوم الاول 2025-03-26

النموذج	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	σ (°C)
الجبس	15	29.9	21.35	5.39
الجبس+الصبان	14.7	29.4	20.858	5.2615
الجبس+السعف	15.2	28.4	20.77	4.77
الجبس+الحلفاء	15	28	20.33	4.56
الوسط الخارجي	14.8	27.5	20.1375	4.46

اليوم الثاني 2025-03-27

النموذج	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	σ (°C)
الجبس	13.2	27.4	19.74	4.95
الجبس+الصبان	12.9	27.3	19.348	5.0743
الجبس+السعف	13.5	26	19.2	4.47
الجبس+الحلفاء	13.1	26.4	19	4.51
الوسط الخارجي	12.2	24.7	18.81	4.29

اليوم الثالث 2025-03-28

النموذج	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	σ (°C)
الجبس	11.1	29.2	19.51	6.33
الجبس+الصبان	10.5	28.8	19.1	6.4058
الجبس+السعف	11.1	26.8	18.79	5.64
الجبس+الحلفاء	10.8	27.1	18.45	5.59
الوسط الخارجي	11	24.8	18.35	4.76

اليوم الرابع 2025-04-06

النموذج	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	σ (°C)
الجبس	16.9	32	24.04	4.97
الجبس+الصبان	16.6	31	23.43	4.83
الجبس+السعف	16.5	30.3	23.11	4.45
الجبس+الحلفاء	16.5	29.7	22.83	4.30
الوسط الخارجي	15.7	29	22.97	4.44

اليوم الخامس 2025-04-07

النموذج	$T_{min}(^{\circ}C)$	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{moy}(^{\circ}C)$	$\sigma(^{\circ}C)$
الجبس	15.7	31.7	23.33	5.41
الجبس+الصبان	14.7	30.3	22.62	5.17
الجبس+السعف	15.2	29.6	22.28	4.77
الجبس+الحلفاء	15.5	31.1	22.90	4.90
الوسط الخارجي	15	29.6	21.86	4.57

اليوم السادس 2025-04-08

النموذج	$T_{min}(^{\circ}C)$	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{moy}(^{\circ}C)$	$\sigma(^{\circ}C)$
الجبس	15.1	34.2	23.73	6.55
الجبس+الصبان	14.4	32.8	22.90	6.21
الجبس+السعف	14.8	31.5	22.43	5.48
الجبس+الحلفاء	14.9	31.8	22.85	5.28
الوسط الخارجي	14.5	33.2	22.01	5.15

اليوم السابع 2025-04-09

النموذج	$T_{min}(^{\circ}C)$	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{moy}(^{\circ}C)$	$\sigma(^{\circ}C)$
الجبس	16.1	35.2	24.76	6.77
الجبس+الصبان	15.7	33.8	24.26	6.46
الجبس+السعف	16.3	32.1	23.76	5.57
الجبس+الحلفاء	17.1	32.1	24.54	5.28
الوسط الخارجي	16.9	32.4	24.24	5.33

اليوم الثامن 2025-04-10

النموذج	$T_{min}(^{\circ}C)$	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{moy}(^{\circ}C)$	$\sigma(^{\circ}C)$
الجبس	17.7	36.6	26.19	6.43
الجبس+الصبان	17.5	35.6	25.91	6.20
الجبس+السعف	18.1	34.4	25.49	5.44
الجبس+الحلفاء	18.9	34.7	26.45	5.26
الوسط الخارجي	18.5	34	26.42	5.33

اليوم التاسع 2025-04-11

النموذج	$T_{min}(^{\circ}C)$	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{moy}(^{\circ}C)$	$\sigma (^{\circ}C)$
الجبس	19.1	37.2	28.32	6.01
الجبس+الصبان	18.5	36.3	27.55	5.755
الجبس+السعف	18.3	34.9	26.84	5.33
الجبس+الحلفاء	19	35.6	27.41	5.15
الوسط الخارجي	17.2	34	26.45	5.50

اليوم العاشر 2025-04-12

النموذج	$T_{min}(^{\circ}C)$	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{moy}(^{\circ}C)$	$\sigma (^{\circ}C)$
الجبس	18	41.7	28.64	8.13
الجبس+الصبان	17.2	40.5	27.94	7.94
الجبس+السعف	17.6	39.3	27.48	7.33
الجبس+الحلفاء	18.2	39.5	28.15	7.25
الوسط الخارجي	16.8	38	27.5	7.75

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الخصائص الميكانيكية والحرارية للجبس المستخرج من منطقة الفولية بالوادي، نظرًا لانخفاض جودته نوعًا ما مقارنة بأنواع الجبس الأخرى، وضعف مقاومته للضغط. وقد شمل الجزء التجريبي تحليل العينات باستخدام تقنيات متقدمة، من بينها انعراج الأشعة السينية (XRD)، فلورية الأشعة السينية (XRF)، ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR). بينت نتائج XRD أن الطور السائد هو كبريتات الكالسيوم شبه المائية ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.8\text{H}_2\text{O}$) بنسبة 55.50%، وقد أكدت FTIR هذه النتيجة، مما يدل على نقاوة نسبية للجبس المدروس. تمت إضافة 3 مواد طبيعية للجبس هي: الصبار، سعف النخيل، والحلفاء، وذلك لدراسة تأثيرها على خصائص الجبس. وقد بينت النتائج أن إضافة سعف النخيل كانت الأكثر فعالية في تحسين مقاومة الضغط، حيث بلغت قيمة المقاومة 0.2695 Mpa، بنسبة تحسن تُقدَّر بـ 64% مقارنة بالعيننة المرجعية (0.1640 Mpa). كما ساهمت إضافة الحلفاء في تعزيز الخصائص الميكانيكية، حيث ارتفعت قيمة مقاومة الضغط إلى 1.7227 Mpa مقارنة بـ 1.6875 Mpa للجبس غير المعدل. وبالإضافة إلى ذلك، ساهمت الحلفاء في تقليل معامل التوصيل الحراري إلى أدنى قيمة مسجلة، وهي 0.3989 W/m.k، مقارنة بـ 0.4286 W/m.k للجبس بدون إضافات (العيننة المرجعية). وتشير هذه النتائج إلى أن الحلفاء تُعد فعالة في الحد من التذبذبات الحرارية بين الوسطين الداخلي والخارجي. من جهة أخرى، أظهرت الدراسة أن الجبس يتميز بقدرته العالية على امتصاص الرطوبة، مما يستلزم استخدام طبقات عزل مائي وملحي قبل إدراجه في عمليات البناء، وذلك لضمان استقراره واستدامته.

الكلمات المفتاحية: الإضافات الطبيعية (سعف النخيل، الحلفاء، الصبار)، امتصاص الرطوبة، تحسين الخصائص الميكانيكية، جبس الفولية، العزل الحراري .

Abstract

This study aims to improve the mechanical and thermal properties of gypsum extracted from the El-Fouliya region in El Oued, due to its relatively lower quality compared to other types of gypsum and its weak compressive strength. The experimental part of the study included the analysis of samples using advanced techniques, namely X-ray Diffraction (XRD), X-ray Fluorescence (XRF), and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). XRD results showed that the dominant phase in the sample is semi-hydrated calcium sulfate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.8\text{H}_2\text{O}$), at a proportion of 55.50%. This finding was confirmed by FTIR results, indicating a relatively high purity of the studied gypsum. Three natural additives -aloe vera, palm fronds, and esparto grass- were added to the gypsum to study their effects on its properties. The results showed that palm fronds were the most effective in improving compressive strength, which reached 0.2695 MPa, representing a 64% improvement compared to the reference sample (0.1640 MPa). Esparto grass also contributed to enhancing mechanical properties, with compressive strength increasing to 1.7227 MPa compared to 1.6875 MPa for the unmodified gypsum. Additionally, esparto grass reduced the thermal conductivity to the lowest recorded value of 0.3989 W/m·K, compared to 0.4286 W/m·K for the reference sample, indicating its effectiveness in reducing thermal fluctuations between interior and exterior environments. Furthermore, the study revealed that gypsum has a high capacity for moisture absorption, which necessitates the use of water- and salt-resistant barriers before its application in construction to ensure its long-term stability and durability.

Keywords: Al-Fuliah gypsum, Improvement of mechanical properties, Moisture absorption, Natural additives (Palm fronds, Esparto grass, Aloe vera), Thermal insulation .