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

من إعداد الطالبتين:

نصيرة فريال – بته إسراء

الموضوع

دراسة تأثير إضافة ألياف الحلفاء على الخصائص الميكانيكية والحرارية لجبس منطقة الفولية بالوادي

نوقشت يوم: 2026/06/06

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

- ميموني مراد	أستاذ محاضر - أ -	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	رئيس
- ريحية غاني	أستاذ محاضر - أ -	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	مناقش
- محبوب محمد الصادق	أستاذ تعليم عالي	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	مؤطر

الموسم الجامعي 2026/2025

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

﴿37﴾ وَأَن لَّيْسَ لِلْإِنسَٰنِ إِلَّا مَا سَعَىٰ ﴿38﴾ وَأَنَّ سَعْيَهُۥ سَوْفَ
يُرَىٰ ﴿39﴾ ثُمَّ يُجْزَىٰهُ ٱلْجَزَآءَ ٱلْأَوْفَىٰ ﴿40﴾ وَأَنَّ إِلَىٰ رَبِّكَ ٱلْمُنتَهَىٰ

الإهداء

إلى كل من أنار دربي بكلمة طيبة، ومدّ لي يد العون والتشجيع، أهدي هذا العمل المتواضع عربون تقدير ووفاء. وإلى كل من كان له أثر جميل في مسيرتي العلمية والإنسانية، أهدي ثمرة هذا الجهد بكل محبة وامتنان.

إلى **أمي** الحبيبة، نبع الحنان ومصدر القوة والدعاء

وإلى **أبي** العزيز، سندي وفخري في هذه الحياة، أهدي ثمرة جهدي المتواضعة عرفانًا بفضلكما وتقديرًا لتضحياتكما.

وإلى إخوتي الأعزاء: **التجاني**، **وسام**، **نضال**، و**ملاك**، شكرًا لدعمكم ومساندتكم الدائمة، فكنتم خير عون لي في مسيرتي.

وإلى صديقة الدرب **إسراء**، شكرًا لرفقتك الطيبة وتشجيعك المستمر.

نصيرة فريال

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل، وبلغني هذه اللحظة التي أقطف فيها ثمرة سنواتٍ من الجد والاجتهاد . أهدي ثمرة جهدي هذه ....

إلى أعز الناس على قلبي، أبي **وأمي،** أطال الله في أعمارهم، اللذين كانا ولا يزالان مصدر العطاء والدعم والسند، فمهما كتبت من كلمات فلن أوفيهما حقهما، فلهما مني كل الحب والتقدير والعرفان .

وإلى إخوتي: يوسف، سليمان، ومروان، الذين كانوا خير سندٍ وعون، أعانهم الله.

وإلى أخواتي الأستاذات الكريمات اللواتي غمرنني بالمحبة والدعاء والتشجيع، أسأل الله أن يحفظهن جميعًا ، ويوفقهن في حياتهن .

وإلى أحفاد عائلتنا المميزين: جنان، براءة، مهدي، أحمد ياسين، مريم، هداية، رائد، منقذ، وأمل، أسأل الله أن يحفظهم ويرعاهم، وأن يبارك في أعمارهم، ويجعلهم قرة عينٍ لأهلهم، ويوفقهم لما فيه الخير والنجاح.

وإلى صديقة عمري فريال، رفيقة الدرب والذكريات الجميلة، وصاحبة المواقف الصادقة، التي كان وجودها في حياتي مصدرًا للدعم والمساندة، اللهم احفظها لي، فجزاها الله عني كل خير، وأدم محبتنا .

وفي الختام، أسأل الله أن يجعل هذا العمل خالصًا لوجهه الكريم، وأن ينفع به، وأن يبارك في كل من دعمني وساعدني من قريب أو بعيد، وأن يجزيهم عني خير الجزاء.

بته إسراء

شكر وعرفان

قال تعالى " لئن شكرتم لأزيدنكم "

الحمد والشكر لله الذي أنار لنا

درب العلم والمعرفة لانجاز هذا العمل

ووفقنا وأعاننا عليه فلك الحمد ربي دائما وأبدا .

نتوجه بجزيل الشكر والاحترام والامتنان لكل من ساعدنا من قريب أو بعيد على انجاز هذا العمل وفي تذليل ما واجهنا من صعوبات

ونخص بالذكر الأستاذ المشرف الذي لم يبخل بتوجيهاته ونصائحه القيمة التي كانت عونا لنا في أتمام هذا الإنجاز المتواضع "الأستاذ **الدكتور محبوب محمد الصادق**" على تأطيره لهاته المذكرة وعلى ما بذله من جهد وإرشاد خلال مراحل هذا العمل.

كما نشكر لجنة المناقشة والمتمثلة في كل من الرئيس الدكتور **ميموني مراد** وكذلك المناقش الدكتور **ريحية غاني** على قبولهما مناقشة هاته المذكرة واثرائها.

كما نوجه شكر خاص للدكتور **خليل دغوم** أستاذ في قسم الهندسة الميكانيكية في كلية التكنولوجيا على مجهوداته الكبيرة وتقديمه المساعدة لنا فبارك الله فيه وجازاه عنا كل خير.

و لا ننسى بأن نعترف بالجميل ونعبر بالكلمات التي لا تفي بحق كل من الدكتور **غربي محمد الطاهر** بقسم الهندسة الميكانيكية، الدكتور **كعب زهير** بقسم الري والهندسة المدنية والاستاذ **مليك محمد** استاذ **بالمعهد المتخصص في التكوين المهني**، وكل من كان سندا لنا في هذا العمل ومد لنا يد العون من الاساتذة الكرام والعمال في مشوارنا الدراسي من أول الطريق إلى آخره والمخبريين الذين لم يبخلو علينا بمساعدتهم لنا.

كما لا يسعنا إلا أن نعبر عن خالص شكرنا وامتناننا لمدير مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (**LEVRES**) ، الأستاذ الدكتور "**محبوب محمد الصادق**"، على كل التسهيلات والدعم الذي قدمه لنا طوال فترة إنجاز هذا العمل. و لا يفوتنا ايضا الا أن نتقدم بالشكر الجزيل إلى مهندس المخبر السيد "**قدة عثمان**" على تعاونه ومساعدته القيمة.

وأخيرا نشكر كل من ساهم بشكل مباشر أو غير مباشر في تحقيق هذا العمل.

نصيرة & بته

فهرس المحتويات

الإهداء..... I
شكر وعرفان..... III
فهرس المحتويات..... IV
فهرس الأشكال..... VIII
قائمة الاختصارات والرموز..... XII
مقدمة عامة..... 3

الجزء النظري

الفصل الأول: عموميات حول مادة الجبس

I-1- تمهيد..... 8
I-2- تعريف الجبس..... 8
I-3- نبذة تاريخية..... 9
I-3-1- الجبس في الحضارات القديمة..... 9
I-3-2- الجبس عبر العصور..... 11
I-3-3- التطبيقات الأولى للجبس..... 12
I-4- أنواع الجبس..... 14
I-4-1- الجبس الطبيعي..... 14
I-4-2- الجبس الصناعي..... 16
I-4-3- الجبس المقاوم للرطوبة والماء..... 16
I-4-4- جبس باريس:..... 17
I-5- استخراج الجبس ومراحل تحضيره..... 18
I-5-1- الطريقة التقليدية..... 18
I-5-2- الطريقة الحديثة..... 21
I-6- الجبس في منطقة الفولية..... 22
I-6-1- الوصف الجيولوجي لمنطقة الفولية..... 22
I-6-2- الموقع الجغرافي لمنطقة الفولية..... 23
I-7- الخصائص الحرارية للجبس..... 23
I-7-1- الناقلية الحرارية المنخفضة..... 23
I-7-2- مقاومة الحريق..... 24
I-7-3- غياب الشقوق الانكماشية..... 24
I-7-4- الحد من انتقال الحرارة الشديدة..... 24

I-8- الخصائص الميكانيكية للجبس.....24

I-9- تأثير الرطوبة والظروف البيئية على الجبس.....25

I-10-المواد الطبيعية المستعملة في تحسين خصائص الجبس.....25

I-10-1- نبتة الحلفاء..... 25
I-10-1-1- تعريف نبات الحلفاء..... 25
I-10-1-2- خصائص ألياف الحلفاء..... 26
I-10-1-3- التطبيقات الحالية والواعدة..... 27
I-10-2- وردة الصحراء..... 27
I-10-2-1- تعريف وردة الصحراء..... 27
I-10-2-2- الخصائص الجيولوجية لوردة الصحراء..... 28

I-11- خلاصة الفصل.....28

قائمة مراجع الفصل الأول.....29

الفصل الثاني: التقنيات والوسائل العلمية المستعملة

II-1- تمهيـــد 33

II-2- انعراج الأشعة السينية (X-RAY DIFFRACTION).....33

II-2-1- مبدأ انعراج الأشعة السينية XRD..... 33
II-2-2- قانون براغ..... 34
II-2-3- الطرق التجريبية لانعراج الأشعة السينية..... 36
II-2-3-1- طريقة فون لاوي..... 36
II-2-3-2- طريقة بلورة الدوارة..... 36
II-2-3-3- طريقة المسحوق..... 37
II-2-4- طريقة التحسين لريتفالد..... 38
II-2-4-1- مقدمة..... 38
II-2-4-2- مبدأ عملها..... 38
II-2-4-3- دالة التحسين..... 39
II-2-4-4- معاملات الجودة..... 39
II-2-4-5- أهمية طريقة ريتفالد..... 40

II-3- تقنية فلورية الأشعة السينية (XRF).....40

II-3-1- تعريف..... 40
II-3-2- مبدأ عمل تقنية فلورية الأشعة السينية (XRF)..... 41
II-3-3- جهاز الفلورة..... 41
II-3-3-1- مصادر الأشعة السينية (الأولية والثانوية)..... 42
II-3-3-2- المصادر المشعة..... 42
II-3-3-3- الكاشف..... 42
II-3-3-4- مزايا تحليل (XRF) تقنية الفلورة..... 42

II-4- تعريف الناقلية الحرارية 43

II-4-1- مقدمة..... 43

II-4-3- جهاز الناقلية الحرارية المستعمل في التجربة..... 43

II-4-2- مبدأ عمل الجهاز قياس الناقلية الحرارية..... 44

II-5- جهاز الضغط والانحناء..... 45

II-5-1- التعريف بالجهاز 45

II-5-2- مبدأ عمل جهاز الضغط والانحناء..... 45

II-5-3- أهمية الاختبارات..... 47

II-6- خلاصة الفصل..... 47

قائمة مراجع الفصل الثاني 48

****الجزء التجريبي****

الفصل الثالث: العمل التجريبي، عرض النتائج ومناقشتها

III-1- تمهيد..... 52

III-2- الدراسة البنيوية..... 52

III-2-1- تحضير عينات 52

III-2-2- تحليل انعراج الأشعة السينية (XRD)..... 53

III-2-2-1- نتائج انعراج الأشعة السينية (XRD) 54

III-2-2-2- تحسين نتائج الانعراج بطريقة ريتفالد..... 55

III-2-3- نتائج التحليل الطيفي للعينة بتقنية XRF 57

III-3- تحضير العينات..... 57

III-3-1- تحضير العينات في المرحلة الأولى..... 57

III-3-2- تحضير العينات في المرحلة الثانية..... 59

III-3-2-1- القسم الأول..... 59

III-3-2-2- القسم الثاني..... 60

III-4- اختبار خواص العينات الميكانيكية (الانحناء والضغط)..... 61

III-4-1- اختبار إجهاد الانحناء 61

III-4-2- اختبار الضغط..... 62

III-4-3- مناقشة نتائج تجربتي الانحناء والضغط..... 64

III-4-3-1- مناقشة نتائج تجربة الانحناء..... 64

III-4-3-2- مناقشة نتائج تجربة الضغط 64

III-5- تجربة قياس التوصيل الحراري (قياس الناقلية الحرارية)..... 65

III-5-1- مناقشة نتائج تجربة قياس التوصيل الحراري 66

III-6- دراسة تغير الكتلة إثر التعرض للرطوبة 67
III-6-1- نتائج تجربة الرطوبة 67
III-6-2- مناقشة تجربة الرطوبة 68
III-7- خلاصة الفصل 69
قائمة مراجع الفصل الثالث 71
خاتمة عامة 73
قائمة الملاحق 76
الملخص 77

فهرس الأشكال

ترتيب الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
	الفصل الأول	
(1.I)	ضريح إيمدغاسن الملكي بولاية باتنة	8
(2.I)	أهرامات الجيزة في مصر	9
(3.I)	تمثال نفرتيتي الشهير المصنوع من الحجر الجيري	9
(4.I)	تشاتال هيوك تطل على سهل قونية جنوب شرق مدينة قونية الحالية بتركيا (الصحافة التركية) مأخوذة من قناة الجزيرة	11
(5.I)	دير وستمنستر	12
(6.I)	قلعة توتنغهام	12
(7.I)	تزيين الكنائس بالطراز الباروكي	12
(8.I)	حجرمن الجبس نوع سيلينيت	13
(9.I)	حجر وردة الصحراء	13
(10.I)	جرة مصنوعة من جبس المرمر الشفاف الجميل	14
(11.I)	حجر الجبس من نوع الجبسيت	14
(12.I)	محطة الطاقة Drax التي تعمل بالفحم في المملكة المتحدة والمزودة بأنظمة إزالة الكبريت، والتي تم تركيبها عامي 1993و1996	15
(13.I)	ألواح الجبس المقاوم للرطوبة والمستعملة في الأسقف والجدران	15
(14.I)	براءة اختراع لطريقة صنع مادة تعتمد على الجبس المقاوم للماء	16
(15.I)	جبس باريس (ما يسمى بجص باريس)	17
(16.I)	مسجد سيدي مسعود الشابي بالوادي	17
(17.I)	غيطان النخيل تظهر فيها صخور (التافزة) وقد تم قطعها لغرس النخيل والمزروعات بالقرب المياه الجوفية	18
(18.I)	حجارة الجبس (التافزة) الجبس بمنطقة الفولية	18
(19.I)	أفران قديمة تقليدية بحي المنظر الجميل (قارة)	19
(20.I)	صورة قديمة لجبس مكلس تقليديا بالحطب	19

(21.I)	صورة لجبس الفولية المكلس بالمازوت	19
(22.I)	رسم تخطيطي لمحطة انتاج الجبس	21
(23.I)	خريطة ولاية الوادي تظهر فيها أماكن تواجد الجبس وكذلك منطقة الفولية بولاية الرقيبة وهي شمال ولاية الوادي	22
(24.I)	صورة توضح نبتة الحلفاء	25
(25.I)	صورة توضح وردة الصحراء	26
الفصل الثاني		
(1.II)	تمثيل تخطيطي لظاهرة التداخل بين الموجات الضوئية، موضحًا (a) التداخل البنّاء (توافق في الطور) و(b) التداخل الهدّام (اختلاف الطور)	33
(2.II)	تتداخل الموجتان 1 و2 بشكل بناء إذا كان فرق المسير بينهما $\delta = n\lambda$	33
(3.II)	آلية انعراج الأشعة السينية بين مستويين بينية قدرها d	34
(4.II)	التركيب التجريبي للانعراج الأشعة السينية طبقا لطريقة لاوي	35
(5.II)	طريقة الانعراج داخل البلورة الدوارة	35
(6.II)	مخطط يوضح كاميرا (ديباي – شيرر) ونموذج الانعراج	36
(7.II)	مخطط يوضح مخاريط الأشعة المتشتتة بزوايا مختلفة والانعراجات داخل فيلم التصوير	37
(8.II)	ظاهرة إصدار أشعة الفلورة	39
(9.II)	الجهاز المستعمل لقياس الناقلية	41
(10.II)	جهاز قياس الناقلية الحرارية	42
(11.II)	صورة جهاز الضغط والانحناء	43
(12.II)	العينة أثناء اختبار الانحناء	44
(13.II)	العينة أثناء اختبار الضغط	44
الفصل الثالث		
(1.III)	جبس اصناعي من منطقة الفولية	50
(2.III)	تحضير عينات لدراسة المرحلة البنيوية	51
(3.III)	جهاز انعراج الأشعة السينية	51
(4.III)	حامل العينة داخل الجهاز	51

(5.III)	الحاسوب المتصل بجهاز (XRD)	52
(6.III)	مخطط انعراج الأشعة السينية لعينة من جبس الفولية	52
(7.III)	النتيجة النهائية لتحسين ريتفالد لمخطط انعراج العينة Gyp 4	53
(8.III)	ألياف الحلفاء بطول 2 cm	56
(9.III)	مراحل تحضير عينات الجبس بـ ثلاث نسب مختلفة	57
(10.III)	مراحل تحضير العينات الجبسية المدعمة بألياف الحلفاء والمستعملة في الاختبارات الحرارية	58
(11.III)	مراحل تحضير وتجفيف العينات الجبسية المدعمة بوردة الصحراء والمستعملة في الدراسة الحرارية	59
(12.III)	آلة اختبار الانحناء	60
(13.III)	آلة اختبار الضغط	61
(14.III)	تجربة قياس الناقلية الحرارية باستخدام جهاز THB	64
(15.III)	مراحل إجراء تجربة الرطوبة	66

فهرس الأشكال

ترتيب الجدول	عنوان الجدول	الصفحة
	الفصل الثالث	
(1.III)	نتائج تحسين ريتفالد لمخطط (XRD) تتضمن عوامل الثقة ونسبة تواجد الأطوار لعينة الجبس المدروسة	53
(2.III)	نتيجة التحليل الطيفي باستعمال تقنية XRF لعينة من الجبس	55
(3.III)	المقادير الوزنية لمكونات الخلطات الجبسية بمختلف نسب إضافة ألياف الحلفاء ذات الأبعاد (16×4×4) cm	56
(4.III)	المقادير الوزنية لمكونات عينات ذات الأبعاد (7×5×1) cm	57
(5.III)	نتائج اختبار الانحناء	61
(6.III)	نتائج اختبار الضغط	62
(7.III)	قيم الناقلية الحرارية لجبس الفولية (بدون وبوجود إضافات)	65
(8.III)	قيم كتل العينات قبل وبعد التعرّض للرطوبة مع بيان الفرق والنسبة المئوية للتغيّر في الكتلة	67

قائمة الاختصارات والرموز

❖ 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 الإصدار.
- K معامل التناسب.
- C تركيز العنصر في العينة.
- GoF معامل التوافق.
- 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.
- σ الانحراف المعياري للعينة.
- RH الرطوبة النسبية.
- R_p احد عوامل الثقة او الجودة ويستعمل لتقييم مدى توافق النمط المحسوب مع النمط التجريبي.
- S دالة التحسين.
- ΔT التغير في درجة الحرارة.

❖ الاختصارات

- X-ray الأشعة السينية.
- XRD انعراج الأشعة السينية.
- XRF الأشعة السينية الفلورية.
- Characteristic X-rays الأشعة السينية المميزة.

مقدمة عامة

مقدمة عامة

يشهد قطاع البناء والتشييد المعاصر تحولًا جذريًا نحو تبني مبادئ الاستدامة البيئية والبحث عن مواد بنائية مبتكرة تجمع بين الكفاءة الاقتصادية والحد من الأثر البيئي. ومن أبرز التحديات في هذا السياق تحسين أداء المواد التقليدية وتوظيف الموارد المحلية بكفاءة لتقليل الاعتماد على المواد المستوردة عالية التكلفة [1]. ويبرز الجبس التقليدي المستخرج من مصادر محلية كخيار واعد يسهم في تقليل البصمة الكربونية المرتبطة بعمليات النقل والاستيراد، فضلًا عن تكلفته المنخفضة وانتشاره الواسع في الطبيعة [2].

الجبس (كبريتات الكالسيوم ثنائية الهيدرات) مادة طبيعية رافقت الحضارات الإنسانية منذ العصور القديمة، حيث استُخدم في تشييد الأهرامات والمعابد والقصور [3]، وصولًا إلى زخارف عصر النهضة في أوروبا [4]. وقد أثبت عبر التاريخ مرونة وتكيفًا كبيرين في العمارة والفنون، مما جعله مادة أساسية في أعمال البناء والتشطيب والزخرفة. وفي العصر الحديث، يواصل الجبس دوره الاستراتيجي في صناعة ألواح الجدران الجافة والديكورات المعمارية [5]، بفضل سهولة تحضيره وتشكيله، وخصائصه الصديقة للبيئة، وبصمته الكربونية المنخفضة مقارنة بالمواد التقليدية الأخرى.

من هنا برزت الحاجة إلى تحسين خصائص الجبس عبر إدخال إضافات طبيعية أو صناعية تعزز من مقاومته وتزيد من فعاليته في التطبيقات الإنشائية الحديثة. ويُعد نبات الحلفاءمن أبرز الموارد الطبيعية المتوفرة محليًا، حيث أثبتت أليافه فعاليتها في تحسين أداء العديد من المواد المركبة بفضل خفة وزنها، متانتها، وقدرتها على تعزيز البنية الداخلية للمواد [6]. هذه الخصائص تجعلها خيارًا واعدًا لتطوير منتجات الجبس، إذ تسهم في رفع كفاءته، الحد من التشققات، وتحسين سلوكه الحراري والميكانيكي.

ورغم أن الجبس التقليدي معروف منذ قرون كمادة بنائية أساسية، إلا أن استخدامه في حالته النقية يواجه تحديات تقنية وميكانيكية جوهرية، أبرزها ضعف مقاومته الميكانيكية وسهولة امتصاصه للماء، مما يحد من قدرته على تحمل إجهادات الضغط والانحناء ويؤثر على استدامة خواصه على المدى الطويل [2]. لذلك، فإن تدعيم المصفوفة الجبسية بألياف طبيعية مثل الحلفاء يمثل خطوة مبتكرة وأساسية نحو تعزيز دوره كبديل مستدام وفعّال في قطاع البناء الحديث.

وعلى الرغم من الانتشار الواسع للجبس في قطاع البناء، فإن محدودية بعض خصائصه الميكانيكية والحرارية ما تزال تشكل عائقًا أمام توسيع مجالات استعماله. ومن هذا المنطلق تتمحور إشكالية هذه الدراسة حول معرفة مدى تأثير إضافة ألياف الحلفاء بنسب مختلفة على الخصائص الحرارية والميكانيكية لجبس منطقة الفولية، وتحديد النسبة المثلى القادرة على تحسين أداء المادة وتحقيق أفضل توازن بين العزل الحراري والمتانة الميكانيكية.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير إضافة ألياف الحلفاء على الخصائص الحرارية والميكانيكية لجبس منطقة الفولية بالوادي،حيث اشتهرت هذه المنطقة بجودة الجبس الطبيعي [7]، وذلك من خلال تحليل التغيرات التي تطرأ على مقاومة الضغط والانحناء ، إضافةً إلى سلوك الجبس تحت تأثير الحرارة والرطوبة. كما تسعى إلى إبراز إمكانية توظيف هذه الإضافات الطبيعية في تطوير مواد بناء أكثر استدامة، تجمع بين الكفاءة الاقتصادية والبيئية، وتدعم التوجه نحو استعمال الموارد المحلية في مشاريع التنمية.

وعليه، تندرج هذه الدراسة ضمن الجهود الرامية إلى تثمين الموارد المحلية وتطوير مواد بناء أكثر كفاءة واستدامة، من خلال الاستفادة من الخصائص المميزة لألياف الحلفاء كإضافة طبيعية صديقة للبيئة. ومن المنتظر أن تساهم النتائج المتحصل عليها في إثراء المعارف المتعلقة بسلوك الجبس المدعم بالألياف

الطبيعية، وتقييم مدى إمكانية توظيفه في تطبيقات البناء والعزل الحراري، بما يتماشى مع متطلبات التنمية المستدامة وترشيد استغلال الموارد المتاحة محليا.

ومن أجل تحقيق الأهداف المسطرة في هذه الدراسة، تم تقسيم هذا العمل إلى ثلاثة فصول:

❖ **الفصل الأول: عموميات حول مادة الجبس.**

يخصص للجانب النظري، حيث يستعرض مادة الجبس (تعريفها، تاريخها، أنواعها، ومراحل تحضيرها تقليدياً وحديثاً) مع التركيز الجيولوجي على منطقة الفولية بالوادي، ثم التطرق إلى نبات الحلفاء باعتباره المادة الطبيعية الرئيسية المستعملة في تدعيم الجبس، مع تقديم نبذة مختصرة عن وردة الصحراء باعتبارها مادة طبيعية استُخدمت لأغراض المقارنة.

❖ **الفصل الثاني: التقنيات والوسائل العلمية المستعملة.**

يتم فيه عرض التقنيات والوسائل العلمية والأجهزة التحليلية والميكانيكية المستعملة لتوصيف المادة.

❖ **الفصل الثالث: العمل التجريبي.**

يتناول العمل التجريبي التطبيقي، بدءاً من بروتوكول تحضير الخلطات وصب العينات، وصولاً إلى عرض ومناقشة نتائج الاختبارات الحرارية، الميكانيكية والفيزيائية للعينات الجبسية المحضرة ومقارنتها بالعينة المرجعية.

مراجع المقدمة العامة

❖ المراجع العربية

[2] م. عبعـوب، ح. بزيـو، "مسـاهمة فـي دراسـة تـأثير الألياف النباتيـة المعالجـة علـى الجـبس التقليدي(تيمشمت)"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر (2023).

[7] ع. رحومة، ش. رحومة، "تحسين الخصائص الحرارية والميكانيكية لجبس الفولية بالوادي المستعمل في البناء"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2025).

❖ المراجع الأجنبية

[1] A.Ghaffar, J. Burman, and M. Brauers, "Circular economy in construction: Current trends and future outlook,"Journal of CleanerProduction, vol. 293, pp. 126–135, (2021).

[3] P. T. Nicholson and I. Shaw (Eds.), Ancient Egyptian Materialsand Technology, Cambridge University Press, (2000).

[4] P. Murray, The Architecture of the Italian Renaissance, Thames and Hudson, (1986).

[5] A. M. Neville, Properties of Concrete, 5th ed., Pearson Education, (2011).

[6] S. Helaili, M. Chafra, and Y. Chevalier, "Natural fiber alfa/epoxy randomly reinforced composite mechanical properties identification," Structures, vol. 34, pp. 542–549, (2021).

الجزء النظري

الفصل الأول

عموميات حول مادة الجبس

I-1- تمهيد

يعدّ الجبس معدنًا طبيعيًا واسع الانتشار يُعرف كيميائيًا بكبريتات الكالسيوم ثنائية الهيدرات، ويتميّز بتنوّع خصائصه وسهولة تشكيله، مما جعله مادة مستخدمة منذ القدم في مجالات عديدة. ويُستعمل بشكل أساسي في قطاع البناء، مثل صناعة الأسمنت البورتلاندي، وألواح الجدران الجافة، وأعمال الزخرفة والتهيئة.

كما يتميّز الجبس بكونه مادة منخفضة التكلفة وصديقة نسبيًا للبيئة [1]، إذ يمتلك بصمة كربونية منخفضة مقارنة بغيره من مواد البناء. ويوجد في الطبيعة بكميات كبيرة، ويُستخرج من السطح أو من أعماق الأرض، ويتحوّل عند خلطه بالماء إلى عجينة قابلة للتشكيل ثم يتصلّب.

إلى جانب البناء، يُستخدم الجبس في مجالات أخرى مثل الطب (تثبيت الكسور)، والصناعة، والفنون. لذلك يُعدّ من المواد المهمة التي تجمع بين الفعالية الاقتصادية والبيئية، وتساهم في دعم التنمية المستدامة [2].

في هذا الفصل ستتم دراسة مادة الجبس بصفة عامة وسنتعرف عليه عبر العصور التاريخية ومن ثم التطرق إلى مختلف أنواعه ومراحل تحضيره مع التركيز على منطقة الفولية من حيث تقديم الوصف الجيولوجي والموقع الجغرافي لها. بالإضافة إلى كل ما سبق، سنتطرق إلى خصائصه الحرارية والميكانيكية، وأخيرا تأثير الرطوبة والظروف البيئية عليه.

I-2- تعريف الجبس

يُشتق مصطلح الجبس (Gypsum) من أصل يوناني كان يُستخدم للدلالة على المعادن المتكلسة. ويعد الجبس معدنًا رسوبيًا يتكون كيميائيًا من كبريتات الكالسيوم المائية ($CaSO_4.2H_2O$)، وهو من المعادن الشائعة الانتشار عالميًا، حيث يوجد بأشكال جيولوجية متعددة، وغالبًا ما يظهر بلون أبيض مائل إلى الرمادي [3].

يتشكل الجبس أساسًا نتيجة تبخر المياه المالحة، مما يؤدي إلى ترسيبه في طبقات سميكة، كما يمكن أن يتكون من تحول معدن الأنهيدريت ($CaSO_4$) إلى جبس بفعل امتصاص الماء. وقد تتشكل هذه الترسبات في البيئات البحرية أو القارية، خاصة في قيعان البحار الضحلة. وعند تعرض الجبس للماء، يتمدد نسبيًا ويأخذ بنية طبقية أو ليفية، مع نسيج دقيق الحبيبات.

وعند تسخين الجبس وتجفيفه، يتحول إلى مسحوق يُستخدم على نطاق واسع في صناعة مواد البناء، خاصة فيما يُعرف بجبس باريس (Plaster of Paris) [3]، كما يدخل في تركيب العديد من أنواع الإسمنت. ومن الناحية الفيزيائية، يُعد الجبس صخرًا ناعمًا متبلورًا بالكامل، تتراوح كثافته النوعية بين 2.2 و2.4 تبعًا لنسبة الشوائب.

وتتميز بلورات الجبس، عند فحصها مجهريًا، بأشكال وألوان متعددة، حيث تكون شفافة إلى نصف شفافة، بينما تتراوح ألوانه الظاهرية بين الأبيض والرمادي والأصفر والوردي، ويرجع ذلك أساسًا إلى اختلاف طبيعة ونسبة الشوائب المصاحبة له [4].

I-3- نبذة تاريخية

يُعتبر توظيف مادة الجبس في تقنيات البناء ممارسة قديمة تعود جذورها إلى الحضارات الكبرى في مصر القديمة، وروما، واليونان. وتشير الشواهد الأثرية إلى أن استخدام الجبس بدأ منذ ما يزيد عن 6000 سنة قبل الميلاد، حيث مثّل عنصراً أساسياً في عمليات التشييد. وتُعد الأهرامات المصرية من أبرز الأمثلة التاريخية التي تجسّد مدى التطور الذي بلغته تقنيات البناء باستخدام هذه المادة في تلك الحقبة، بما يعكس أهميتها في دعم البنية المعمارية وتطوير أساليب الإنشاء عبر العصور[5].

كما استُخدم الجبس في تشييد بعض المعالم التاريخية بالجزائر، ومن أبرز الأمثلة على ذلك الضريح الأمازيغي "إيمدغاسن" أو "وماد غيس"، الذي يعود تاريخه إلى القرن الثالث قبل الميلاد. يقع هذا الضريح في بلدية بوميا بولاية باتنة، ويُعد أقدم ضريح ملكي أثري محفوظ في شمال إفريقيا، كما هو موضح في الشكل **(1-I)** وتشير المصادر التاريخية في القرون الوسطى إلى أن تسمية هذا المعلم ارتبطت بأحد ملوك نوميديا، مما يعكس البعد الحضاري والرمزي لاستخدام الجبس في تقنيات البناء لدى المجتمعات الأمازيغية القديمة [6].

الشكل(I-1): ضريح إيمدغاسن الملكي بولاية باتنة [6].

I-3-1- الجبس في الحضارات القديمة

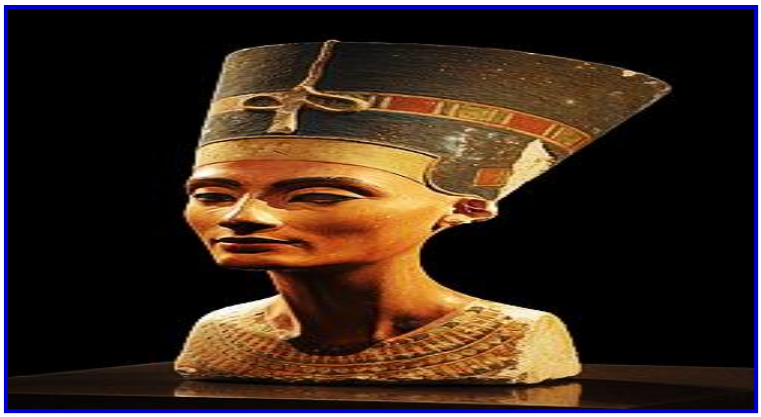
يُعد الجبس من أهم المواد الطبيعية التي رافقت الإنسان منذ العصور القديمة، حيث استُخدم في البناء والزخرفة وأثبت عبر التاريخ مرونة كبيرة في التكيف مع مختلف الاحتياجات المعمارية والفنية. إن دراسة تطور استخدام الجبس عبر الحضارات لا تقتصر على الجانب التاريخي فحسب، بل تُبرز أيضاً البعد الثقافي والفني لهذه المادة، ودورها في تشكيل هوية العمارة والفنون عبر الأزمنة.

أ- الحضارة المصرية

يُعد المصريون القدماء من بين الحضارات الأولى التي وظفت الجبس في فنون العمارة والبناء. فقد استخدموا نوعاً مميزاً يُعرف بالمرمر الجبسي (الالباستر-Alabaster) في تشطيب واجهات الأهرامات والمقابر، مما أتاح الحصول على أسطح ملساء مثالية للنقوش والزخارف الدقيقة. اعتمد المصريون في تصنيع مادة الربط هذه على خليط من الجبس والجير، وما زالت آثار هذه المادة باقية حتى اليوم، كما في أهرامات الجيزة (الشكل I-2) التي تضم أهرام خوفو، خفرع، ومنقرع [7].

الشكل(I-2): أهرامات الجيزة في مصر[8].

تُعد مصر منبعًا أصيلًا للفنون الجدارية والزخارف الغنية التي تزخر بها الحضارة المصرية القديمة، والتي ما تزال قائمة حتى اليوم شاهدةً على عظمة هذا الإرث الفني. ومن أبرز الشواهد الأثرية التي تجسد هذا الإبداع تمثال نفرتيتي المصنوع من الجبس الشكل **(I-3)**، والذي يُعتبر من أشهر القطع الفنية المصرية، ويرجع تاريخه إلى أكثر من 3300 عام. ويعكس هذا التمثال تطورًا نوعيًا في مجال النحت باستخدام خامة الجبس، حيث يُظهر مدى التقدم والابتكار الذي حققه الفن المصري القديم في توظيف هذه المادة كوسيط تعبيري، بما يعكس قدرة الفنان المصري على المزج بين التقنية والجمال الفني في آن واحد.



الشكل(I-3): تمثال نفرتيتي الشهير المصنوع من الحجر الجيري [9].

يُلاحظ أن جودة الجبس المصري القديم فائقة في العديد من الحالات، متجاوزة أحياناً جودة المنتجات التجارية الحديثة. وهذا يدل على تطور تجريبي مستمر في صناعة الجبس عبر عصور طويلة، مما يعكس الخبرات التقنية المتقدمة للحرفيين القدماء [1].

ب- الحضارتان الرومانية واليونانية

استخدم الرومان الجبس على نطاق واسع في البناء، مدركين قيمته العملية، خصوصاً في حماية المباني من الحرائق. تشير مخطوطات تاريخية من العصر الروماني إلى تعليمات تلزم أصحاب المباني بتغطية الجدران بطبقات من الجبس لهذا الغرض [1،7].

وقد تأثر الإغريق بهذه الممارسات، فاستعاروا مفهوم "الجص" كالمزيج من الرمل والجير وهو مصطلح مشتق من كلمة يونانية قديمة تعني "التطبيق"، واستُخدم هذا المزيج على نطاق واسع في تزيين المعابد داخلياً وخارجياً [3].

I-2-3- الجبس عبر العصور

أ- العصور الوسطى وعصر النهضة

استمر استخدام الجبس في أوروبا خلال العصور الوسطى وما بعدها، ليصبح مادة أساسية في الديكورات الداخلية المزخرفة، خاصة في الكنائس والقصور. وأدرك الفنانون أهمية الجبس كوسيط مناسب للرسم الجداري، مما ساهم في إبراز التفاصيل الفنية الدقيقة، وكان جزءاً لا يتجزأ من النهضة الفنية والمعمارية في إيطاليا [7].

ب- العصر الحديث

لقد شهد إنتاج الجبس الصناعي ازدياداً ملحوظاً في القرنين التاسع عشر والعشرين، مدفوعاً بتقدم تقنيات التعدين والمعالجة، مما سهل استخراجه وتوفيره بأسعار مناسبة. من أبرز نتائج هذا التطور ظهور تقنية الحوائط الجافة (Drywall) التي تتكون من لب الجبس، والتي أحدثت ثورة في البناء خلال القرن العشرين بفضل سرعة وكفاءة التنفيذ مقارنة بالطرق التقليدية [7].

تُعد مدينة تشاتال هيوك، التي يرجع تاريخها إلى نحو 7500 ق.م والواقعة في منطقة الأناضول جنوب تركيا الحالية، من أبرز الشواهد الأثرية التي تجمع بين مظاهر الاستقرار الحضاري والاستخدام المبكر للجص. فقد شكّلت هذه المدينة نموذجًا فريدًا لبلدة ذات كثافة سكانية مرتفعة [10]، تميزت بمبانيها المشيدة من الطوب الطيني اللين، إضافة إلى أرضياتها المطلية بطين المارل المحلي، الذي مثّل آنذاك مادة فعّالة للجص. وما زالت معالم هذه الحضارة القديمة قائمة من خلال الجداريات الجيرية التي زُينت بها جدران المباني، حيث جسدت تلك اللوحات مشاهد متنوعة من الحياة اليومية مثل أنشطة الصيد، إلى جانب تصوير البراكين وأنماط زخرفية هندسية، وهو ما يعكس الحس الفني المتقدم لسكان تلك الحقبة [1].

الشكل(I-4): تشاتال هيوك تطل على سهل قونية جنوب شرق مدينة قونية الحالية بتركيا (الصحافة التركية) مأخوذة من قناة الجزيرة [10].

I-3-3- التطبيقات الأولى للجبس

في بدايات استخدامه، استُعمل الجبس كمادة لاصقة لتثبيت ألواح الحجارة المتداخلة أثناء بناء الأهرامات، مما عزز استقرار هذه المنشآت الضخمة. كما استُخدمت أنواعه المصقولة (كالمرمر) في صناعة عناصر معمارية ودقيقة، من أبرزها توابيت أفراد العائلة الملكية، مثل تابوت الملك خوف) الشكل(I-3) [8].

- **القرن الثالث عشر**

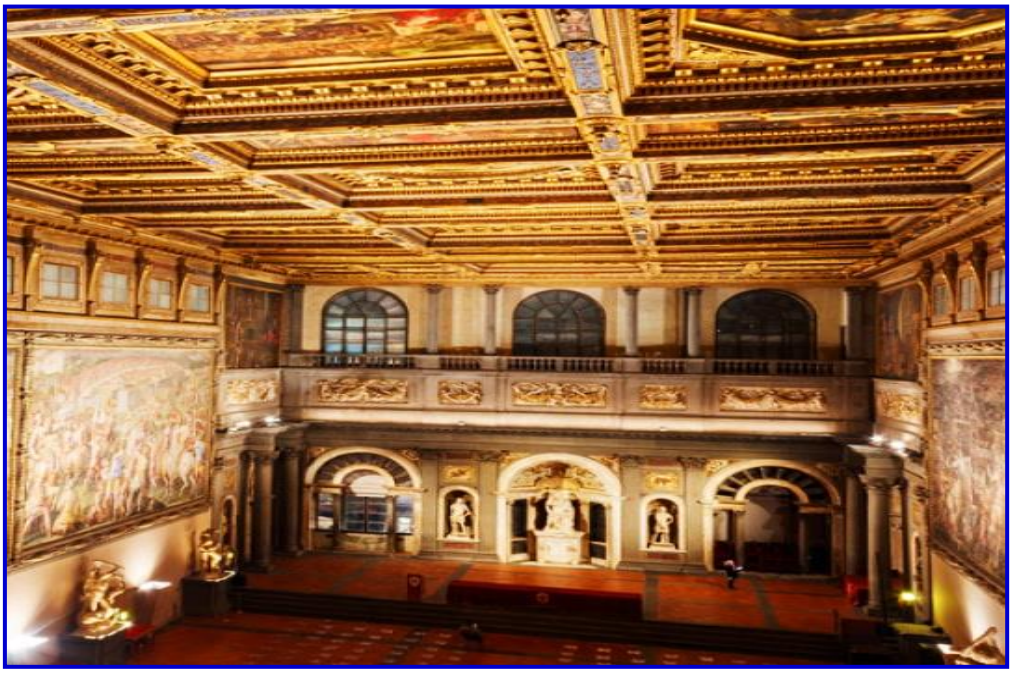
أصبح الجبس مادة زخرفية أساسية في القصور الأوروبية، ومع تطور الحضارة الغربية ترسخ استخدامه كعنصر معياري في تصميم المباني. وقد أبدى الملك هنري الثاني ملك إنجلترا إعجابه الشديد بجودة الجبس المنتج في باريس، الذي عُرف لاحقاً باسم "جص باريس" [8].

الشكل(I-5): دير وستمنستر [8].

الشكل(I-6): قلعة توتنغهام [11].

- **القرن السادس عشر**

شهد الجبس ازدهارًا ملحوظًا مع بروز أسلوبي الباروك والروكوكو(Baroque – Rococo) اللذين لا يزال تأثيرهما حاضرًا في تاريخ العمارة. وقد نشأ هذا التوجه الفني في مدينة فلورنسا بإيطاليا خلال عصر النهضة، قبل أن ينتشر سريعًا في مختلف أنحاء أوروبا الغربية. وقد احتل الجبس مكانة مركزية في هذا السياق، حيث أصبح عنصرًا أساسيًا في تشكيل الديكور الداخلي، واستُخدم على نطاق واسع في تزيين كنائس الطراز الباروكي ومنشآت الروكوكو الفاخرة، بالإضافة إلى القلاع والقصور الملكية [2].



الشكل(I-7): تزيين الكنائس بالطراز الباروكي[8].

- **القرن السابع عشر**

ظهر مسحوق الجبس، المعروف اليوم بـألواح الجبس أو (الجبس بورد Board Gypsum) رسمياً في أمريكا الشمالية بالتزامن مع الاستيطان الأوروبي. اعتمدت المباني الأولى على الخشب للجدران الخارجية، بينما غُطيت الجدران الداخلية بطبقات سميكة من الجبس المقاوم للحريق. مع تزايد الطلب على المساكن، برزت الحاجة إلى مواد بناء أكثر كفاءة، مما جعل الجبس مورداً اقتصادياً مهماً وأدى إلى تسارع تطويره، ليصبح اليوم من الحلول المستدامة والمفضلة في البناء الداخلي[8].

I-4- أنواع الجبس

يقسم الجبس إلى نوعين رئيسيين وفقًا لمصدر إنتاجه، هما الجبس الطبيعي والجبس الصناعي.

I-4-1- الجبس الطبيعي

يتم الحصول عليه عن طريق عمليات التعدين المنتشرة في مختلف أنحاء العالم، حيث يتواجد أحيانًا مرتبطًا بالصخور المحلية في هيئة طبقات مسطحة، أو في شكل كتل ليفية مترافقة مع الطين أو الأحجار الرملية. ومن أبرز أشكال الجبس الطبيعي:

أ - السيلينيت

وهو أحد الأشكال المعدنية للجبس، يعرف كيميائيًا باسم كبريتات الكالسيوم المائية ذات الصيغة ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). يُطلق هذا الاسم أيضًا على الأشكال البلورية المختلفة للجبس الشكل **(I-8)**، ويُعرف بعدة مسميات أخرى مثل "وردة الصحراء" أو "زهرة الصحراء". يتميز السيلينيت بكونه صفائح بلورية شفافة ذات لون بني غالبًا، متراكبة فوق بعضها البعض، ويسهل فصلها [12].

وفي المناطق القاحلة قد يتشكل الجبس في هيئة بلورات تشبه الزهور، غالبًا ما تكون مصحوبة بحبيبات رملية تُعرف بـ "وردة الصحراء" الشكل **(I-9)**، كما يُعد السيلينيت من أكبر البلورات الطبيعية المعروفة، حيث يمكن أن يصل طول بعض بلوراته إلى نحو 12 مترًا (39 قدمًا) [12].

الشكل(I-8): حجرمن الجبس نوع سيلينيت [13].

الشكل(I-9):حجر وردة الصحراء [14].

ب - المرمر أو الألباستر

يُعد الألباستر أحد أنواع المعادن الخام ذات اللون الأبيض، كما تتوافر منه أصناف ذات لون برتقالي. يتكون أساسًا من الجبس، بصيغة كيميائية هي كبريتات الكالسيوم المائية $CaSO_4 \cdot 2H_2O$، ويتميز بصلابته ودرجة بياضه العالية عند وجوده طبيعيًا. وقد استُخدم منذ العصور القديمة في نحت التماثيل وصناعة أدوات الزينة (الشكلI-10)، نظرًا لملمسه الناعم وسهولة تشكيله. وكانت المنحوتات المصنوعة منه حكرًا على الطبقات الثرية قبل انتشار استخدام الرخام .وتُعد مدن مثل برلين في ألمانيا، وميلانو وفلورنسا وليفورنو في إيطاليا من أبرز المراكز العالمية التي يتوافر فيها هذا المعدن. تجدر الإشارة إلى أن كلمة "الألباستر" ذات أصل مصري قديم، وتعني الوعاء أو المزهرية الخاصة بالإلهة باستيت [2].

الشكل(I-10): جرة مصنوعة من جبس المرمر الشفاف الجميل [15].

ج - الجبسيت

هو راسب أرضي غير نقي، دقيق الحبيبات، يتكون من خليط من الرمل والطين والمواد العضوية. يتميز بوجود ألياف متوازية، ويظهر في شكل كتل جبسية كثيرة التشقق ذات لمعان لؤلؤي (الشكلI-11) [16].

الشكل(I-11): حجر الجبس من نوع الجبسيت [17].

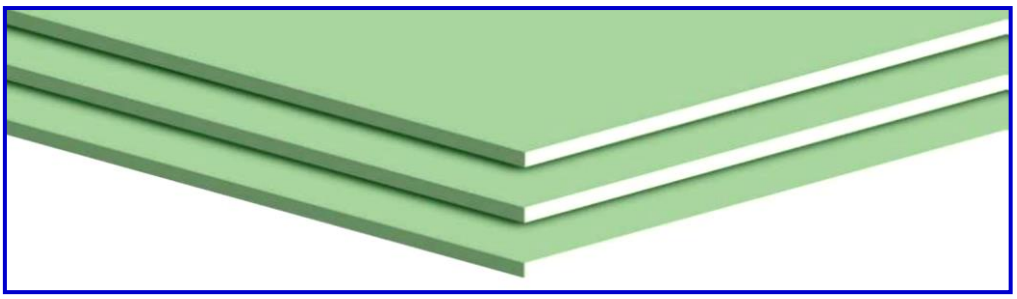
I-4-2- الجبس الصناعي

يُنتج الجبس الصناعي من خلال عمليات إزالة الكبريت من غازات المداخن (الشكلI-12) وقد ازدادت أهميته في المساهمة بالإنتاج العالمي للجبس نظرًا لانخفاض تكلفة إنتاجه مقارنة بالجبس الطبيعي. فعلى سبيل المثال، شكّل الجبس الصناعي نحو 31٪ من إجمالي الاستهلاك في الولايات المتحدة سنة 2008.

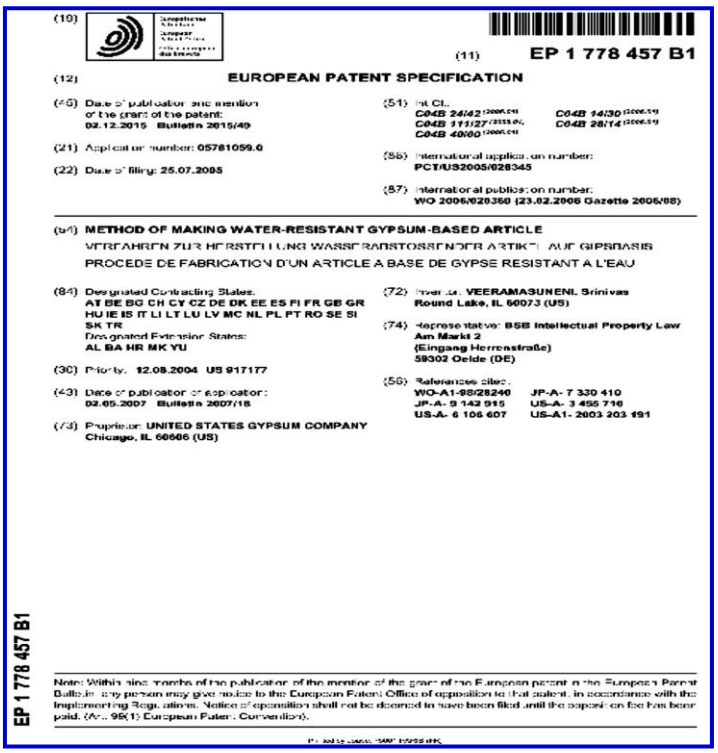
الشكل(I-12): محطة الطاقة Drax التي تعمل بالفحم في المملكة المتحدة والمزودة بأنظمة إزالة الكبريت، والتي تم تركيبها عامي 1993و1996 [18].

I-4-3- الجبس المقاوم للرطوبة والماء

يتم تصنيع منتجات مقاومة للرطوبة قائمة على الجبس، مثل ألواح الجبس الشكل **(I-13)**، من خلال إدخال كمية محدودة من السيلوكسان (Siloxane) إلى الملاط المائي المستخدم في عملية التشكيل. ويُضاف كذلك مقدار صغير من أكسيد المغنيسيوم (MgO) المحترق ليعمل كمحفّز يساهم في تعزيز تصلب السيلوكسان داخل البنية. وفي النموذج الأمثل، يُحضَّر السيلوكسان على شكل مستحلب مائي في الموقع ذاته، دون الحاجة إلى استعمال أي مواد مستحلبة كيميائية إضافية [19].



الشكل(I-13): ألواح الجبس المقاوم للرطوبة والمستعملة في الأسقف والجدران [2].



(19)

(11) EP 1 778 457 B1

(12) EUROPEAN PATENT SPECIFICATION

(45) Date of publication and mention of the grant of the patent: 02.12.2015 Bulletin 2015/49

(21) Application number: 05781059.0

(22) Date of filing: 25.07.2005

(51) Int Cl.: C04B 24/42 (2006.01) C04B 14/30 (2006.01) C04B 111/27 (2006.01) C04B 28/14 (2006.01) C04B 40/00 (2006.01)

(86) International application number: PCT/US2005/026345

(87) International publication number: WO 2006/020360 (23.02.2006 Gazette 2006/08)

(54) METHOD OF MAKING WATER-RESISTANT GYPSUM-BASED ARTICLE

VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG WASSERBESTÄNDIGER ARTIKEL AUS GIPSBASIS

PROCEDE DE FABRICATION D'UN ARTICLE A BASE DE GYPSE RESISTANT A L'EAU

(84) Designated Contracting States: AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR
Designated Extension States: AL BA HR MK YU

(30) Priority: 12.08.2004 US 917177

(43) Date of publication of application: 02.05.2007 Bulletin 2007/18

(73) Proprietor: UNITED STATES GYPSUM COMPANY Chicago, IL 60606 (US)

(72) Inventor: VEERAMASUNENI, Srinivas Round Lake, IL 60073 (US)

(74) Representative: BSB Intellectual Property Law Am Markt 2 (Eingang Herrenstraße) 59302 Oelde (DE)

(56) References cited: WO-A1-98/28240 JP-A- 7 330 410 JP-A- 9 142 915 US-A- 3 455 716 US-A- 6 106 607 US-A1- 2003 203 491

EP 1 778 457 B1

Note: Within nine months of the publication of the mention of the grant of the European patent in the European Patent Bulletin, any person may give notice to the European Patent Office of opposition to that patent, in accordance with the Implementing Regulations. Notice of opposition shall not be deemed to have been filed until the opposition fee has been paid. (Art. 99(1) European Patent Convention).

الشكل(I-14): براءة اختراع لطريقة صنع مادة تعتمد على الجبس المقاوم للماء [2].

I-4-4- جبس باريس

يُعرف جبس باريس بهذا الاسم نظرًا لتحضيره لأول مرة من رواسب الجبس المتوفرة بالقرب من مدينة باريس. وهو عبارة عن مسحوق أبيض ناعم سريع التصلب، صيغته الكيميائية ($CaSO_4.1/2H_2O$). يتميز هذا النوع من الجبس بخاصية فريدة، إذ يتحول إلى كتلة صلبة عند مزجه بالماء، مما يجعله مادة مثالية في العديد من التطبيقات [20].

يُنتج جبس باريس من خلال تسخين الجبس الطبيعي المفتت عند درجة حرارة تقارب 120°C، حيث يفقد جزءًا من مائه المرتبط. وإذا ارتفعت درجة الحرارة إلى حوالي 200°C، يتحول الجبس إلى أنهدريت "الجبس المحترق الميت" [21].

من الناحية التقنية، يتميز جبس باريس بكونه لا يتقلص ولا يتشقق عند الجفاف، الأمر الذي يجعله مناسبًا لصناعة القوالب الخاصة بالصب، إضافةً إلى استخدامه في إنتاج الزخارف الجبسية التي تُثبت على الأسقف والكورنيشات. كما يُستعمل في المجال الطبي لتثبيت العظام المكسورة، رغم أن العديد من قوالب تقويم العظام الحديثة أصبحت تُصنع من الألياف الزجاجية أو اللدائن الحرارية [22].

الشكل(I-15): جبس باريس (ما يسمى بجص باريس).

I-5- استخراج الجبس ومراحل تحضيره

يتم إنتاج مسحوق الجبس تجارياً من خلال تسخين حجارة الجبس (الكلسيوم ثنائي الهيدرات) عند درجات حرارة تتراوح بين 120°C و180°C، مما يؤدي إلى فقدان جزء من ماء التبلور وتحوله إلى الجص (نصف المائي). وتعتمد عملية التحضير إما على وسائل تقليدية أو حديثة، وذلك حسب السياق المحلي والتقنيات المتاحة.

I-5-1- الطريقة التقليدية

أ- صناعة الجبس في منطقة وادي سوف

تعتمد الصناعة التقليدية للجبس في منطقة وادي سوف (الجزائر) بشكل رئيسي على نوع محلي من الحجارة يعرف باسم "التافزة" حيث توجد هذه الحجارة ضمن الطبقات الجوفية تحت الرمال، وتحديداً في غيطان النخيل وبعض المستخرجات الشمالية. بناءً على بعض الروايات، يعود ظهور هذه الصناعة في المنطقة إلى العام (1620ميلادي تقريبا)، وهو ما تستدل عليه بعض المنشآت التاريخية كمسجد سيدي مسعود الشابي بالوادي الموضح في الشكل **(I-16)** ومساكن حي الأعشاش [23].

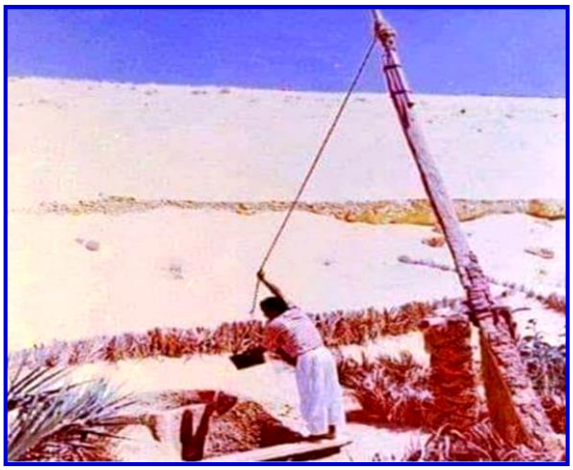
الشكل(I-16): مسجد سيدي مسعود الشابي بالوادي.

تتمثل مراحل هذه الصناعة التقليدية فيما يلي:

ب- قلع الحجارة

تُستخرج معظم الحجارة من الغيطان بهدف الوصول إلى المياه الجوفية وزراعة النخيل، كما هو موضح في الشكل (I-17) إضافةً إلى ذلك، يتم استخراج بعض الأنواع من مقاطع خاصة بالجهة الشمالية، وتُعرف بحجارة الدبدابة، وهي أحجار هشة يتراوح عمقها بين نصف متر إلى مترين ونصف [23].

أما حجر التافزة الموضح في الشكل (I-18) فيتميز بصلابته، وغالبًا ما يتواجد بالقرب من مصادر المياه في الجهة الجنوبية والغربية من المنطقة. في حين أن الترشة عبارة عن أحجار رقيقة، تظهر عادةً عند مستوى الماء أو فوقه بقليل [23].



الشكل(I-17): غيطان النخيل تظهر فيها صخور (التافزة) وقد تم قطعها لغرس النخيل والمزروعات بالقرب المياه الجوفية.

الشكل(I-18): حجارة الجبس (التافزة) الجبس بمنطقة الفولية.

ج- حرق الحجارة (التكليس أو الكلسنة)

كانت عملية حرق الحجارة تتم داخل أفران تقليدية تُعرف محليًا باسم **الكوشة**، وهي منشآت تُشيد عادةً من الجبس على شكل أسطواني. يتضمن الفرن فتحتين أساسيتين: الأولى تقع في جانبه السفلي وتُستخدم كموقد يوضع فيه الحطب لإشعال النار، ومنه يُستخرج الجبس بعد اكتمال عملية الحرق؛ أما الفتحة الثانية فهي كبيرة تقع في أعلى الفرن مباشرةً، وتُستعمل لملء الفرن بالحجارة حتى يأخذ شكلاً يشبه القبة.

تُوقد النار في الموقد وتستمر عملية التسخين حتى تصل الحجارة إلى درجات حرارة مرتفعة جدًا، وهو ما يُعرف محليًا بـ "طهي الحجارة"، بينما يُطلق عليه علميًا مصطلح الكلسنة أو التكليس. وتُظهر الصورة **(I-19)** الشكل التقليدي لهذه الأفران وطريقة عملها [23].

الشكل(I-19): أفران قديمة تقليدية بحي المنظر الجميل (قارة) [23].

د- الطحن والتجهيز النهائي

بعد اكتمال عملية الطهي أو الكلسنة داخل الأفران، تتفكك الحجارة وتنهار لتكوّن كتلاً يتم استخراجها لاحقًا. أما القطع المتبقية فيتم تفتيتها يدويًا باستخدام أدوات بسيطة مثل "الخباطة"، مما يحول الجبس إلى مسحوق ناعم يشبه الدقيق، جاهز للاستعمال [23]. وقد كان الجبس يُكلس تقليديًا باستعمال الحطب، ثم تطورت العملية لاحقًا باستخدام المازوت، كما موضح في الشكلين **(I-20)** و**(I-21)**.

الشكل(I-20): صورة قديمة لجبس مكلس تقليديا بالحطب [24].

الشكل(I-21): صورة لجبس الفولية المكلس بالمازوت.

I-2-5- الطريقة الحديثة

تتم صناعة الجبس حاليًا في مصانع متخصصة تُقام عادة بالقرب من المناجم لتقليل تكاليف النقل. يمر الجبس الخام بعدة مراحل متسلسلة حتى يصبح منتجًا نهائيًا معبأ في أكياس أو ألواح جبسية، ويمكن تلخيص هذه المراحل فيما يلي:

أ- الاستخراج

يتم استخراج الجبس الخام من المناجم باستخدام المتفجرات بعد إزالة الغطاء السطحي لتفادي الشوائب. تُحلل العينات الجبسية لضمان الجودة وتوفر احتياطي كافٍ بالقرب من الأسواق المستهلكة [25].

ب- التكسير

تُجزأ الصخور المستخرجة إلى قطع صغيرة عبر مرحلتين؛ تكسير أولي لتقليل الحجم، ثم تكسير ثانوي للحصول على قطع دقيقة تُخزن في المستودعات [25].

ج- إزالة الشوائب

تُغسل القطع وتُفصل عنها الشوائب، خاصة العضوية منها، باستخدام الطفو على الماء، ثم تُترك لتجف كليًا [25].

د- الكلسنة

تُسخن الحجارة المكسرة داخل الأفران عند درجة حرارة تقارب 130°م لفترة كافية لإزالة المياه المرتبطة تدريجيًا، مما يؤدي إلى الحصول على جبس نصف مميّه ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$). وتنتج هذه العملية نوعين رئيسيين هما جبس ألفا وجبس بيتا [25].

ه- الطحن

يُرسل الجبس بعد الكلسنة إلى المطاحن ليُطحن حسب المواصفات المطلوبة، ثم يُخزن في المستودعات[25].

و- أخذ العينات للتحليل

قبل التعبئة، تُؤخذ عينات من المنتج لإجراء اختبارات تحدد نسبة النقاء، وجود الشوائب، وخصائص التصلب، وذلك لضمان الجودة والحفاظ على سمعة الشركة [25].

ي- التعبئة

بعد التأكد من مطابقة المنتج للمعايير، تتم تعبئته في أكياس للتسويق أو يُرسل إلى وحدات إنتاج الألواح الجبسية [25].

الشكل(I-22): رسم تخطيطي لمحطة انتاج الجبس [26].

I-6- الجبس في منطقة الفولية

I-6-1- الوصف الجيولوجي لمنطقة الفولية

منذ نشأة الأرض نتيجة تصلب الغبار الكوني قبل حوالي 5.4 مليار سنة، وهي تشهد تحولات مستمرة على سطحها بفعل العمليات الطبيعية المختلفة، مثل التجوية والحركات التكتونية التي تؤثر على القشرة الأرضية. وقد تميزت الفترة الزمنية الممتدة من 1.64 مليون سنة إلى يومنا هذا بأهمية خاصة في التاريخ الجيولوجي للمنطقة، حيث تشكلت خلالها الرسوبيات الرملية والصخرية التي تغطي سطحها، مما ساهم في تكوين إقليم مناخي وجيومورفولوجي ونباتي خلال المراحل الأخيرة من العهد السينوزوي، أي في الزمن الرابع [1].

وتتضمن أبرز التكوينات الجيولوجية لهذا الزمن ما يلي:

أ- **الطبقة الرملية:** تشكل الغطاء السطحي للمنطقة، ويتراوح سمكها بين 9 و129 مترًا، وهي الطبقة التي يتحدد عندها مستوى السطح الرسوبي.

ب- **الطبقة الطينية (الصلصال):** تظهر في شكل صفائح صلبة، تحتوي على بلورات حديدية متداخلة ومتماسكة، ذات سمك ضعيف جدًا، وتنتشر بشكل خاص في مناطق وادي سوف ووادي ريغ.

ج- **القشرة الجبسية:** تُعد من أبرز الخصائص المميزة لتربة وادي سوف، حيث يبلغ سمكها حوالي 69 cm تقريبا، وتتكون من جبس رقيق ممزوج بالرمال. تنتشر هذه القشرة في مناطق واسعة شمال وادي سوف، بما في ذلك منطقة الفولية، وتوجد على عمق يتراوح بين 1.5 و2m. وهي عبارة عن تشكيلات صلبة غنية بالكالسيوم [27]، ما يمنحها أهمية خاصة من الناحية الجيولوجية والبيئية.

I-2-6- الموقع الجغرافي لمنطقة الفولية

تقع منطقة الفولية في الجهة الشمالية من بلدية الرقيبة، التي تتمركز بدورها في الجزء الشمالي الغربي من ولاية الوادي. وتُحدد إحداثياتها الجغرافية عند خط العرض ′33°33شمالاً وخط الطول ′42°6شرقاً، حيث تتربع على مساحة تُقدّر بـ $51,965\ km^2$. تبعد المنطقة عن مقر الولاية بحوالي 30km، وتحدها من الشمال بلدية الحمراية، ومن الجنوب بلدية تغزوت، ومن الشرق بلدية قمار، بينما يحدها من الغرب ولاية تقرت، كما هو موضح في الشكل **(I-23)**.

الشكل(I-23): خريطة ولاية الوادي تظهر فيها أماكن تواجد الجبس وكذلك منطقة الفولية بولاية الرقيبة وهي شمال ولاية الوادي [2].

I-7- الخصائص الحرارية للجبس

يُعتبر الجبس من المواد الطبيعية ذات الخصائص الحرارية المميزة التي تمنحه أهمية خاصة في مجال البناء والتشييد، حيث يساهم في تحقيق توازن مثالي بين مستويات الرطوبة ودرجات الحرارة داخل الفضاءات المغلقة. ويتميز البناء الجبسي، سواء من خلال الألواح أو القوالب ذات التجاويف، بخصائص عزل إضافية تعزز من كفاءته، كما تعمل الألواح الجبسية على تشكيل حاجز فعال للبخار يمنع تراكم الرطوبة في البيئات الداخلية [1].

ومن أبرز الخصائص الحرارية التي يتميز بها الجبس:

I-7-1- الناقلية الحرارية المنخفضة

يتمتع الجبس بقدرة عالية على العزل الحراري بفضل موصليته المنخفضة، مما يقلل من انتقال الحرارة عبر الجدران ويساهم في تحسين الكفاءة الطاقوية، وبالتالي تقليل الحاجة إلى التدفئة في الشتاء أو التبريد في الصيف.

I-7-2- مقاومة الحريق

بفضل احتوائه الطبيعي على نسبة من ماء التبلور المرتبط كيميائياً ضمن بنيته الداخلية، والتي تقدر بـ 21% بعد التصلب، فعند تعرضه لدرجات حرارة مرتفعة تتجاوز 100° C [28]، يتحرر هذا الماء تدريجيا على هيئة بخار، مما يستهلك جزءا من الطاقة الحرارية ويؤدي إلى خفض معدل انتقال الحرارة وإبطاء ارتفاع درجة الحرارة. كما يشكل البخار المنبعث حاجزا عازلا يحد من انتشار اللهب ويوخر انتقاله إلى الطبقات الجاورة. ويمكن للجبس أن يتحمل تأثير الحرائق لمدة تصل إلى ثلاث ساعات، مما يجعله خياراً آمناً في البناء.

I-7-3- غياب الشقوق الانكماشية

مقارنة بمواد أخرى مثل الإسمنت، يُظهر الجبس استقراراً أكبر أثناء عملية التجفيف نتيجة انخفاض التفاعل الحراري، وهو ما يقلل من احتمالية ظهور الشقوق الانكماشية ويحافظ على خصائصه العازلة على المدى الطويل.

I-7-4- الحد من انتقال الحرارة الشديدة

يمتلك الجبس قدرة ديناميكية على تنظيم درجات الحرارة الداخلية من خلال امتصاص الماء أو إطلاقه حسب الحاجة، مما يساعد على توفير بيئة داخلية مستقرة ومريحة من حيث الحرارة والرطوبة [29].

I-8- الخصائص الميكانيكية للجبس

تتراوح مقاومة الجبس للضغط بين 50–200 kg/cm² (تقريبًا بين 5 و20 MPa)، وهي قيمة تعتمد بدرجة كبيرة على عدة عوامل مرتبطة بظروف التحضير والتصنيع وطبيعة المكونات المستعملة، من أهمها:

- درجة حرارة تكليس الخام، إذ تؤثر في البنية النهائية للجبس وبالتالي في خصائصه الميكانيكية.
- كمية الماء المستعملة لتحضير عجينة الجبس تعد عاملا أساسيا في تحديد مقاومته للضغط، إذ تزداد هذه المقاومة كلما انخفضت نسبة الماء المضافة نتيجة انخفاض المسامية المتكونة بعد التصلب.
- نوع وطبيعة المواد المضافة المستعملة، حيث تؤثر في سرعة التصلب والبنية المجهرية والخصائص النهائية للمادة.
- تتسم مادة الجبس بضعف مقاومتها للشد مقارنة بمقاومتها للضغط، كما تمتلك مستوى محدودا من المرونة، إذ يتراوح معامل المرونة عادة بين 2–5 GPa تقريبا حسب نوع الجبس وظروف التحضير.
- كما تتأثر مقاومة الضغط بشكل مباشر بكمية المياه والمواد الداخلة في المزيج، حيث يؤدي انخفاض نسبة الماء إلى تقليل نسبة الفراغات المتشكلة داخل البنية المتصلبة وبالتالي زيادة مقاومة الضغط.
- أما من حيث زمن التصلب، فإن بداية التصلب تحدث عادة بعد 6–10 دقائق تقريبا، بينما يتراوح زمن التصلب النهائي بين 25 و30 دقيقة حسب نوع الجبس والمواد المضافة المستعملة [30،31].

I-9- تأثير الرطوبة والظروف البيئية على الجبس

تُعتبر الرطوبة العامل الأكثر تأثيراً على خصائص الجبس، إذ إن طبيعته المسامية تجعله سريع الامتصاص للماء، مما يؤدي إلى تفتته وتآكله تدريجياً عند التعرض المستمر للرطوبة [32].

كما أن الجبس المشبع بالرطوبة يُشكل بيئة ملائمة لنمو العفن والفطريات، وهو ما ينعكس سلباً على صحة الإنسان ويؤثر على المظهر الخارجي للمباني.

وتزداد خطورة هذه الظاهرة في التطبيقات الداخلية مثل الأسقف المعلقة والديكورات، حيث قد يتسبب ذلك في سقوط أجزاء منه وحدوث تشققات تُضعف الهيكل العام. إضافة إلى ذلك، فإن الرطوبة تؤدي إلى تغير لون الجبس وظهور بقع خضراء أو صفراء تُشوّه المظهر الخارجي، الأمر الذي يفسر تجنّب استخدامه في المطابخ والحمامات [33].

كما تتأثر الزخارف والتماثيل الجبسية بالعوامل البيئية المختلفة، إذ يؤدي تراكم الغبار والأتربة إلى فقدانها رونقها الأصلي، بينما تُسهم الأمطار، وخاصة الأمطار الحمضية، في تفتت الأسطح المكشوفة وتآكلها. ولا يقتصر الأمر على الرطوبة والأمطار فحسب، بل إن التغيرات الحرارية الكبيرة، سواء بالارتفاع أو الانخفاض، تؤثر على الجبس من خلال التمدد أو الانكماش [34،35]، مما ينعكس على متانته واستقراره البنيوي.

I-10- المواد الطبيعية المستعملة في تحسين خصائص الجبس

I-10-1- نبتة الحلفاء

I-10-1-1- تعريف نبات الحلفاء

يُعد نبات الحلفاء (Stipatenacissima L)، المعروف أيضًا باسم الإسبارتو(Esparto) [36]، من الأعشاب المعمّرة التي تنمو على شكل كتل كثيفة ذات مظهر نافوري مميّز، بارتفاع يتراوح بين 0.6 و1.5m. يتميز بسيقانه الرفيعة وأوراقه الطويلة المقوّسة التي يبلغ طولها ما بين 30 و90 cm ، بلون أخضر مائل إلى الرمادي، وحواف خشنة قد تُسبب خدوشًا جلدية عند الملامسة (الشكل I-24) [37].

أما أزهاره فتظهر في سنابل ريشية ناعمة بطول 15 إلى 30cm ، تتنوع ألوانها بين الوردي والأرجواني والفضي حسب الصنف، قبل أن تتحول إلى اللون البيج (Beige) عند النضج، حيث تتمايل مع الرياح بشكل يشبه ذيل الثعلب. وتنتج ثمارًا صغيرة بنية اللون مغطاة بشعيرات دقيقة، مما يسهل انتشارها عبر الرياح أو انتقالها بواسطة التربة [37].

يُعتبر نبات الحلفاء من الموارد الطبيعية المهمة في النظم البيئية الجافة بمنطقة البحر الأبيض المتوسط، حيث يساهم في تثبيت التربة ومقاومة التصحر، مما يعزز استدامة هذه النظم [36]. كما يتميز بقدرته على النمو في البيئات الفقيرة والجافة والمشمسة، مما يجعله موردًا طبيعيا متجددا ذا أهمية بيئية واقتصادية في المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية [37].

الشكل(I-24): صورة توضح نبتة الحلفاء [38].

I-10-1-2- خصائص ألياف الحلفاء

❖ الوفرة والتكلفة

تعد ألياف الحلفاء مورداً نباتياً ذا قيمة علمية واقتصادية في الجزائر، حيث تغطي مساحات شاسعة تُقدَّر بأكثر من 3.8 إلى 4 ملايين هكتار، خصوصاً في مناطق السهوب والهضاب العليا مثل ولايات الجلفة، سطيف، والأغواط والمناطق الصحراوية مثل ولاية الوادي [39]. وتنمو هذه النباتات تلقائياً دون الحاجة إلى مياه السقي أو استخدام الأسمدة، مما يجعلها مورداً طبيعياً منخفض التكلفة مقارنة بالبدائل الصناعية.

تتميز ألياف الحلفاء بخصائص فيزيائية وبيئية مهمة، أبرزها قدرتها العالية على العزل الحراري وانخفاض كثافتها، وهو ما يمنحها إمكانات واعدة في مجالات البناء المستدام، تقنيات العزل[39]. كما أن اعتمادها كخيار بيئي بديل يسهم في تقليل الاعتماد على المواد المركبة الصناعية [36]، ويعزز التنمية الصناعية المستدامة من خلال استغلال مورد محلي متجدد ووفير.

❖ الخصائص الفيزيائية والميكانيكية

تتميز ألياف الحلفاء بموصلية حرارية ضعيفة للغاية، الأمر الذي يمنحها فعالية عالية في مجال العزل الحراري والصوتي ويُسهم في تقليل استهلاك الطاقة في المباني. كما أن كثافتها المنخفضة تجعلها مادة خفيفة الوزن، وهو ما ينعكس إيجاباً على تخفيض الكتلة الإجمالية للمنشآت والمركبات التي تدخل في تركيبها. إضافة إلى ذلك،تتمتع هذه الألياف بخصائص ميكانيكية متميزة، إذ تبلغ مقاومة الشد وقوة الكسر حوالي 250MPa، بينما يصل معامل الشد إلى نحو 20 GPa، مما يجعلها عنصراً داعماً فعالاً في الخرسانة والملاط الإسمنتي [36].

❖ **الاستدامة البيئية**

إلى جانب مزاياها التقنية، تُسهم ألياف الحلفاء في تحقيق أهداف الاستدامة البيئية، حيث تلعب دورًا محوريًا في مكافحة التصحر، وتحسين جودة التربة، وتعزيز التنوع البيولوجي في المناطق القاحلة. كما أن قابليتها للتحلل الحيوي وتجددها يجعلها مادةواعدةفي تطوير التقنيات الخضراء، بما يتماشى مع التوجه العالمي نحو الاقتصاد الدائري وتقليل النفايات وانبعاثات الكربون. وتفتح تطبيقاتها المتنوعة، بدءًا من المنسوجات والمواد المركبة وصولًا إلى الوقود الحيوي، آفاقًا واسعة لتقليل الأثر البيئي للموارد غير المتجددة، مما يعزز مكانتها كعنصر رئيسي في إنتاج المواد المستدامة [36].

I-10-1-3- التطبيقات الحالية والواعدة

تشهد عدة مخابر بحث جزائرية، جهوداً علمية لتوظيف ألياف الحلفاء في تحسين خصائص مواد البناء التقليدية مثل الطين، الجبس، والإسمنت. وقد أثبتت هذه التجارب أن دمج الألياف يُعزز من المتانة، يزيد من مقاومة التآكل، ويوفر عزلاً حرارياً طبيعياً، مما يفتح آفاقاً واسعة لتطوير مواد بناء مستدامة وملائمة للبيئة المحلية.

I-10-2- وردة الصحراء

I-10-2-1- تعريف وردة الصحراء

تُعرف "وردة الصحراء" (Desert Rose) والتي يُطلق عليها أيضاً حجر الرمل أو اللوس باللهجة العامية لمنطقة وادي سوف بأنها تكوين بلوري معدني طبيعي يتشكل في البيئات الرملية الجافة. وقد اكتسب هذا الاسم نتيجة التشابه البنيوي والجمالي بين هيئة بلوراته المتراكبة وبين أوراق الوردة المتفتحة كما يوضحه الشكل (I-25)، مما يجعلها مثالاً بارزاً على التداخل بين العمليات الجيولوجية والأنماط الجمالية الطبيعية في علم المعادن [40].

الشكل(I-25): صورة توضح وردة الصحراء [41].

I-10-2-2- الخصائص الجيولوجية لوردة الصحراء

تُعدّ وردة الصحراء تكويناً جيولوجياً فريداً يتميز بخصائصه البنيوية والمعدنية المميزة. فهي تتشكل من اندماج حبيبات الرمل مع بلورات معادن مثل الجبس أو الباريت، مما يمنحها طبيعة مركبة ذات قيمة علمية. وتعود نشأتها إلى عمليات التبخر البطيء للمياه الجوفية المشبعة بالأملاح والمعادن في البيئات الصحراوية أو السبخات الملحية الضحلة، وهي عملية جيولوجية تستغرق عقوداً طويلة حتى تكتمل. أما من الناحية الشكلية، فتتخذ هذه البلورات هيئة بتلات مسطحة ودائرية متداخلة، بما يعكس نمطاً هندسياً فريداً يضاهي جمال الورود الطبيعية. وتتنوع ألوانها بين الرملي والبيج والبني الصدئ، ويرتبط هذا التنوع بمدى اختلاف نسب أكاسيد الحديد الداخلة في تركيبها. جغرافياً، تنتشر وردة الصحراء بكثرة في الصحاري العربية وشمال إفريقيا، خاصة في الجزائر وتونس، كما تُسجَّل أيضاً في مناطق أخرى مثل المكسيك، مما يجعلها ظاهرة جيولوجية ذات انتشار واسع وأهمية علمية وجمالية في آن واحد [40].

I-11- خلاصة الفصل

في ضوء ما تم عرضه، يتضح أن مادة الجبس ليست مجرد معدن طبيعي واسع الانتشار، بل هي عنصر أساسي ارتبط بالإنسان منذ العصور القديمة وحتى يومنا هذا. فقد أثبتت أهميتها في البناء والزخرفة والفنون، كما ساهمت في تطوير تقنيات العمارة عبر الحضارات المختلفة، من الأهرامات المصرية إلى القصور الأوروبية، وصولاً إلى تقنيات البناء الحديثة مثل ألواح الجبس. إن تنوع أنواع الجبس وخصائصه الفيزيائية والكيميائية، إلى جانب سهولة استخراجه وتحضيره، جعله مادة اقتصادية وفعالة، تلعب دوراً محورياً في دعم التنمية المستدامة. كما أن تطور طرق إنتاجه، من الأساليب التقليدية إلى الصناعية الحديثة، يعكس قدرة الإنسان على الاستفادة من الموارد الطبيعية وتكييفها مع حاجاته المتجددة. وعليه، فإن دراسة مادة الجبس لا تقتصر على الجانب العلمي فحسب، بل تكشف أيضاً عن بعدها التاريخي والثقافي والاقتصادي، مما يجعلها مادة ذات قيمة متجددة في الماضي والحاضر والمستقبل. وتشكل المعارف النظرية المقدمة في هذا الفصل أساسا ضروريا لفهم الجوانب التجريبية المتعلقة بتحضير العينات ودراسة خصائصها في الفصول اللاحقة.

قائمة مراجع الفصل الأول

❖ المراجع العربية

[1] ع. رحومة؛ ش. رحومة، "تحسين الخصائص الحرارية والميكانيكية لجبس الفولية بالوادي المستعمل في البناء"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2025).

[2] ع. غريب، "دراسة عامة لمادة جبس منطقة الفولية بالوادي"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2022).

[3] ن. باي؛ م. بن ساسي، "دراسة تأثير المعالجة الحرارية على مادة الجبس في منطقة الفولية بالوادي"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2021).

[16] "البحوث الصناعية"، المجلد 2 العدد الثاني، ليبيا (1993).

[23] ف. باهي، "افران الجبس التقليدية ودورها في تنشيط الحركة العمرانية في وادي سوف مطلع ق 20"، مجلة قبس للدراسات الإنسانية والاجتماعية، جامعة الوادي، المجلد الثاني(02) العدد الثاني (02) ديسمبر 2018.

[26] س. الطويل؛ أ.بالهادف، "دراسة تجريبية حول تحسين خواص جبس منطقة الفولية بالوادي"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2023).

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

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

[30] الدرايسة محمد عبد الله؛ عدلي محمد عبد الله، "خامات البناء"، مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع (2011)، الطبعة العربية الأولى، عمان (2012).

[33] ع . قوجيل، ف. بقاري " دراسة مدى تأثير العوامل الخارجية على طوب الجبس التقليدي المدعم بالخشب"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، الجزائر (2023).

[35] ل. رحمون، "رطوبة الأسطح الخرسانية أنواعها وطرق معالجتها"، مقالة، 2024/04/25.

❖ المراجع الأجنبية

[4] Collectif, Gypse ries, gypsiers des villes, gypsiers des champs, colloque de Digne-les-Bains, Créa phis, (2005).

[17] N. Charles, S. Colin, T. Gutierrez, and G. Lefebvre, Rapport final Gypse et Anhydrite – Mémento, BRGM/RP-69280-FR, Mar. (2020).

[18] C. E. Housecroft and A. G. Sharpe, Inorganic Chemistry, 4th ed., Pearson Education Limited, (2012).

[21] J. D. Lee, Concise Inorganic Chemistry for JEE (Main-Advanced), 4th ed., Wiley India, 2017, Reprint (2019).

[24] C. Azul et al., "The desert rose domes of the souf region (Algeria): preliminary evaluations on the vulnerability of a unique vernacular heritage," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLIV-M-1, Spain, (2020).

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

[34] A. P. Silva, A. C. Magalhães, and M. D. Ferreira, "Effect of humidity on gypsum properties in coastal environments," Advanced Materials Research, vol. 1051, pp. 763–768, (2014).

[35] Mayo-Corrochano, C., Sánchez-Aparicio, L. J., Aira, J. R., Sanz-Arauz, D., Moreno, E., & Pinilla Melo, J. (2022). Assessment of the elastic properties of high-fired gypsum using the digital image correlation method. Construction and Building Materials, 317, 125945.

❖ **مواقع انترنت**

[5] https://futurefriends1.tripod.com/id19.html ,Accessed: 02/05/2026.

[6] https://batna.mta.gov.dz/%D8%B6%D8%B1%D9%8A%D8%AD-%D8%A7%D9%85%D8%AF%D8%BA%D8%A7%D8%B3%D9%86/ ,Accessed: 01/05/2026.

[7] https://sites.google.com/view/buildux-gypsum-plastering/history, Accessed: 14-04-2026.

[8] https://yoshino-gypsum.vn/en/gypsum-materials/ ,Accessed: 14/04/2026.

[9] https://en.wikipedia.org/wiki/Nefertiti_Bust ,Accessed: 04/05/2026.

[10] https://www.aljazeera.net/wp-content/uploads/2022/03/Untitle777d-2.jpg?resize=770%2C513&quality=80 ,Accessed: 04/05/2026.

[11]https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nottingham_Castle_gatehouse_01.jpg ,Accessed: 03/05/2026.

[12] https://en.wikipedia.org/wiki/Gypsum ,Accessed: 03/05/2026.

[13] https://www.mindat.org/photo-773928.html , Accessed: 05/05/2026.

[14] https://m-ouad-souf.blogspot.com/2018/05/Flower-of-sand-ELOUED.html, Accessed: 05/05/2026.

[15] https://www.istockphoto.com/photo/alabaster-jar-1-gm139743636-1413973, Accessed: 05/05/2026.

[19] https://patentscope.wipo.int/search/ar/detail.jsf?docId=WO2006020369, Accessed: 05/05/2026.

[20] https://www.britannica.com/technology/plaster-of-paris, Accessed: 02/05/2026.

[22] https://en.wikipedia.org/wiki/Plaster , Accessed: 30-04-2026.

[25]https://mawdoo3.com/%D8%B5%D9%86%D8%A7%D8%B9%D8%A9_%D8%A7%D9%84%D8%AC%D8%A8%D8%B3, Accessed: 05/05/2026.

[28] https://www.celotech.com/ar/news/what-are-the-properties-of-building-gypsum/?utm_source=copilot.com ,Accessed: 03/05/2026.

[36] https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214993725000235, Accessed: 23/05/2026.

[37] https://www.mshtly.com/product/%D9%86%D8%A8%D8%A7%D8%AA-%D8%A7%D9%84%D8%AD%D9%84%D9%81%D8%A7-pennisetum-setaceum,Accessed: 19/05/2026.

[38] https://cdn.elitihadcom.dz/wp-content/uploads/2021/04/61449552-780x470.jpg, Accessed: 30/05/2026.

[39] https://www.mdpi.com/2075-5309/15/16/2845, Accessed: 23/05/2026.

[40] https://en.wikipedia.org/wiki/Desert_rose_(crystal), Accessed:30/05/2026.

[41] http://www.lovely0smile.com/2015/mix/09/Desert-Rose-in-North-African-countries-02.jpg, Accessed: 30/05/2026.

الفصل الثاني

التقنيات والوسائل العلمية

II-1- تمهيـــد

بعد التطرق في الفصل الأول إلى مختلف الجوانب النظرية المتعلقة بمادة الجبس، من حيث تعريفه وخصائصه وتكوينه وتواجده، يأتي هذا الفصل ليشكل امتدادا منهجيا لذلك الجانب، حيث يتم عرض أهم التقنيات والوسائل العلمية المستعملة في توصيف المادة المدروسة.

إن دراسة الجبس، خاصة عند تدعيمه بألياف طبيعية مثل ألياف الحلفاء، تتطلب الاعتماد على مجموعة من التقنيات التحليلية التي تسمح بفهم بنيته البلورية وتركيبه العنصري، إضافة إلى تقييم سلوكه الحراري والميكانيكي. ولهذا تم الاعتماد في هذا العمل على تقنيات انعراج الأشعة السينية (XRD) وفلورية الأشعة السينية (XRF)، بالإضافة إلى طريقة ريتفالد (Rietveld Refinement) لتحسين نتائج التحليل البنيوي.

وتعد عملية توصيف الجبس ذات أهمية كبيرة في مجال تطبيقات البناء، إذ تساهم في تحديد مدى ملاءمته للاستعمال في مواد التشييد من خلال معرفة خصائصه الفيزيائية والميكانيكية والحرارية، مما يساعد على تحسين جودة المادة ورفع أدائها ومتانتها. كما أن فهم العلاقة بين البنية الداخلية للمادة وخواصها الميكانيكية والحرارية يُعد أساسياً لتفسير سلوك الجبس عند التدعيم، حيث تؤثر البنية البلورية وتوزيع المكونات بشكل مباشر على مقاومة الضغط والانحناء، وكذلك على العزل والتوصيل الحراري.

كما سيتم التطرق إلى المبادئ النظرية للأجهزة المستعملة في قياس الخصائص الحرارية والميكانيكية، وذلك بهدف ربط البنية الداخلية للمادة بسلوكها العملي.

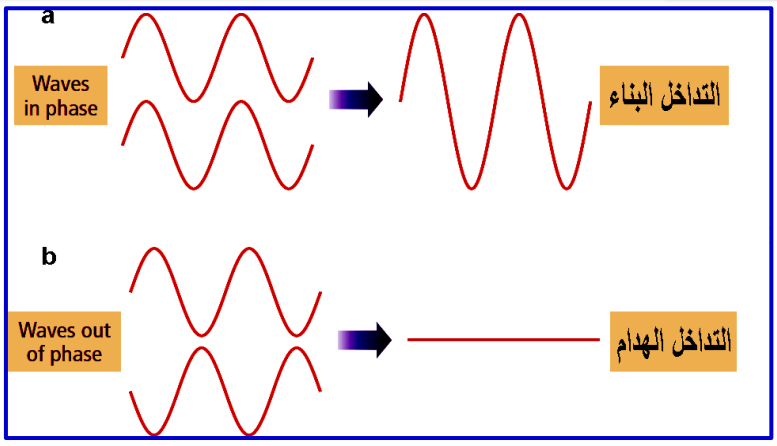
II-2- انعراج الأشعة السينية (X-Ray diffraction)

يطلق مصطلح الانحراف (الانعراج) عندما تنتقل حزمة من الأشعة السينية في خط مستقيم داخل وسط متجانس، ثم يطرأ تغيير على اتجاه مسارها [1].

II-2-1- مبدأ انعراج الأشعة السينية XRD

يعتمد انحراف الأشعة السينية على انعكاسها عن المستويات الشبكية التي تحتوي الذرات المكونة للبلورة. ويتم هذا الانعكاس وفق القوانين المعروفة للانعكاس الضوئي، حيث ينعكس جزء من حزمة الأشعة السينية، بينما يواصل الجزء الآخر مساره لينعكس عن مستويات لاحقة. وعند التقاء الأشعة المنعكسة، تظهر ظاهرة التداخل المعروفة في البصريات الفيزيائية، والتي أثبتتها تجربة لاوي عام 1912. وتؤكد هذه الظاهرة أن طبيعة الأشعة السينية مماثلة لطبيعة الضوء العادي، مع اختلاف في الطول الموجي فقط [2].

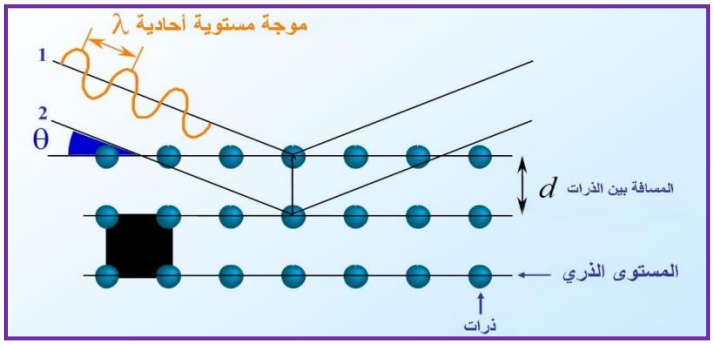
التداخل هو عملية تراكب الموجات، مما يؤدي إما إلى زيادة أو نقصان في السعة (الشدة)، وذلك وفقًا للفرق في الطور بين الموجات المتجمعة، (انظر الشكلين **(II-1)** و**(II-2)**) [3].



الشكل(II-1): تمثيل تخطيطي لظاهرة التداخل بين الموجات الضوئية، موضحًا (a) التداخل البنّاء (توافق في الطور) و(b) التداخل الهدّام (اختلاف الطور) [4].

تنشأ ظاهرة التداخل عندما تتراكب موجتان أو أكثر في نفس الحيز المكاني، بحيث تكون الإزاحة الناتجة عند كل نقطة مساوية للمجموع الجبري لإزاحات الموجات المتداخلة وفق مبدأ التراكب. فإذا كانت الموجتان متفقتين في الطور، أي أن القمم تتراكب مع القمم والقيعان مع القيعان، فإن سعاتهما تتجمع وينتج عن ذلك تداخل بنّاء يتميز بزيادة شدة الموجة الناتجة. أما إذا كانت الموجتان تختلفان في الطور، فإن التراكب يؤدي إلى انخفاض سعة الموجة الناتجة مقارنة بسعات الموجات الفردية، ويُعرف ذلك بالتداخل الهدّام. وتبلغ هذه الظاهرة أقصاها عندما يكون فرق الطور بين الموجتين مساوياً لـ 180° وتكون سعتاهما متساويتين، حيث تنعدم السعة الناتجة كلياً. أما في الحالات الأخرى فإن الانخفاض يكون جزئياً وتبقى للموجة الناتجة سعة غير معدومة.

وتُعد ظاهرة التداخل من الظواهر الأساسية التي تعتمد عليها العديد من التقنيات العلمية، ومن بينها انعراج الأشعة السينية (XRD) ، حيث يُستفاد من التداخل البنّاء للأشعة المتشتتة من المستويات البلورية للحصول على معلومات حول البنية البلورية للمواد.



الشكل(II-2): تتداخل الموجتان 1 و2 بشكل بناء إذا كان فرق المسير بينهما $\delta=n\lambda$ [5].

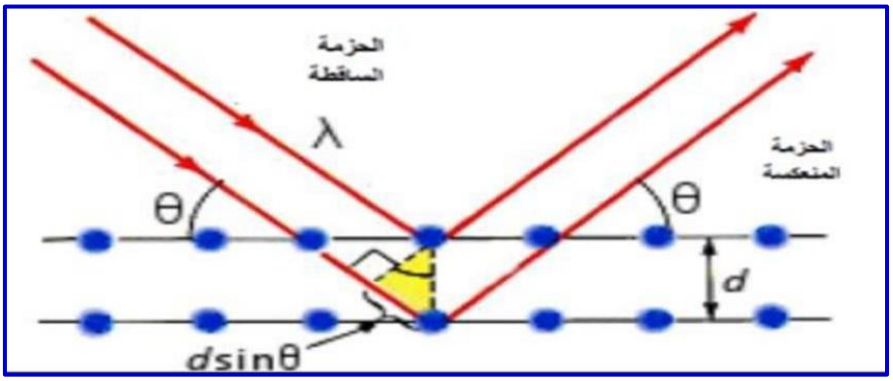
II-2-2- قانون براغ

يعد العالمان ويليام لورانس براغ (W. L. Bragg) ووالده ويليام هنري براغ (W. H. Bragg) هما أول من صاغا قانون براغ، وذلك ضمن أعمال مشتركة في مجال انعراج الأشعة السينية وتحليل البنية البلورية. والقانون يعتمد على فكرة ضرورة توفير شروط هندسية معينة لحدوث انعراج الأشعة السينية في

البلورات. حيث قاما بتسليط حزمة من الأشعة السينية أحادية الطول الموجي ومتطابقة الطور نحو بلورة، واقترحا نموذجاً مبسطاً للبنية البلورية يُمكن من خلاله تحديد اتجاه انعراج هذه الأشعة عقب اصطدامها بالمستويات الذرية الداخلية.

افترض براغ في نموذجه أن المستويات الذرية المتوازية داخل البلورة تعمل كأطراف عاكسة قادرة على حرف مسار الأشعة السينية. إذ شبّه هذا الانعكاس بانعكاس الأشعة الضوئية عن مرآة مستوية، حيث تتساوى زاوية السقوط مع زاوية الانعكاس. وأوضحا أن ظهور انعراج جليّ للأشعة السينية يتطلب توافقاً دقيقاً بين زاوية السقوط، والطول الموجي المستخدم، والمسافة الفاصلة بين المستويات الذرية، وهو ما اصطُلح على تسميته بشرط براغ للانعكاس البنّاء.

وبناءً على الترتيب الدوري والمنظم للذرات في البنية البلورية، فإن التداخل البنّاء للموجات المنعكسة ينحصر في اتجاهات محددة، ما يؤدي إلى نشوء نمط انعراج واضح. وتُقاس هذه الأنماط لاستخراج معلومات دقيقة تتعلق بالتوزيع المكاني للذرات داخل البلورة [6،7] كما يظهر في الشكل **(3-II)**.



الشكل(3-II): آلية انعراج الأشعة السينية بين مستويين بينية قدرها d [7].

لكي يحدث تداخل بنّاء بين الموجات الناتجة عن انعراج الأشعة السينية، يشترط أن يكون فرق المسار بين الأشعة المنعكسة عن المستويات الذرية المتوازية مضاعفا صحيحا لطول الموجة.

ونظرا لأن الأشعة الكهرومغناطيسية تكون موجهة بشكل متواز، فإن فرق المسار الناتج يمكن التعبير عنه بالعلاقة التالية:

$$2\theta \sin d = n\lambda \qquad \textbf{(1-II)}$$

وهي المعادلة التي اقترحها العالمان ويليام براغ وابنه لورانس عام 1912، وتعرف باسم قانون براغ (Bragg's Law)، حيث تمثل [6،7]:

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

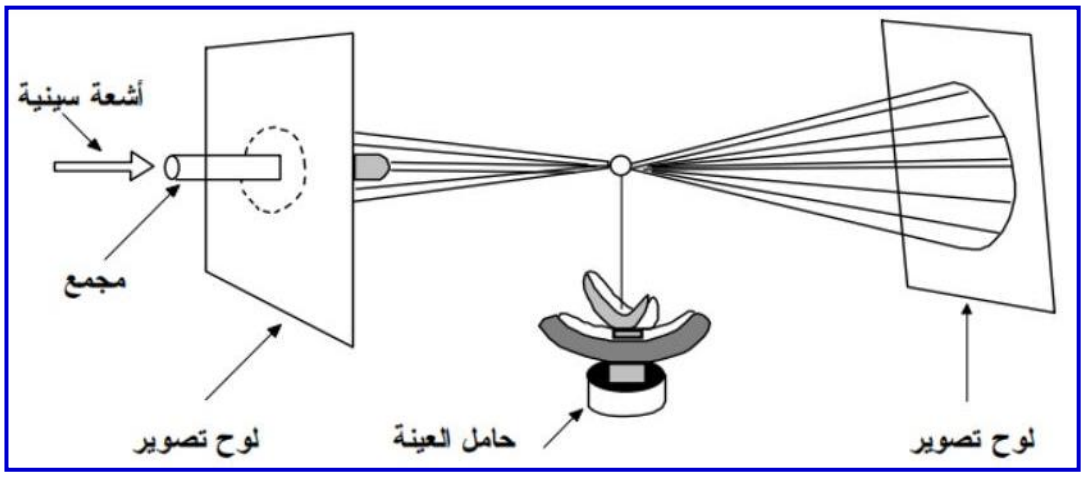
ويعد هذا القانون أساسا لفهم كيفية تفاعل الأشعة السينية مع البلورات، مما يتيح تحليل البنية الذرية بدقة عالية.

II-2-3- الطرق التجريبية لانعراج الأشعة السينية

توجد عدة طرق تجريبية لتسجيل ودراسة أنماط حيود الأشعة السينية، وتختلف هذه الطرق باختلاف طبيعة العينة المدروسة وشكلها الفيزيائي، سواء كانت على هيئة بلورة أحادية أو مسحوق أو مواد متعددة البلورات. ويعتمد اختيار الطريقة المناسبة على نوع المعلومات البنيوية المطلوبة، مثل تحديد اتجاه البلورات، أو دراسة البنية البلورية، أو التعرف على الأطوار الموجودة في المادة. ومن بين أكثر الطرق استعمالا: طريقة لاوي، طريقة البلورة الدوارة، وطريقة المسحوق [8].

II-2-3-1- طريقة فون لاوي

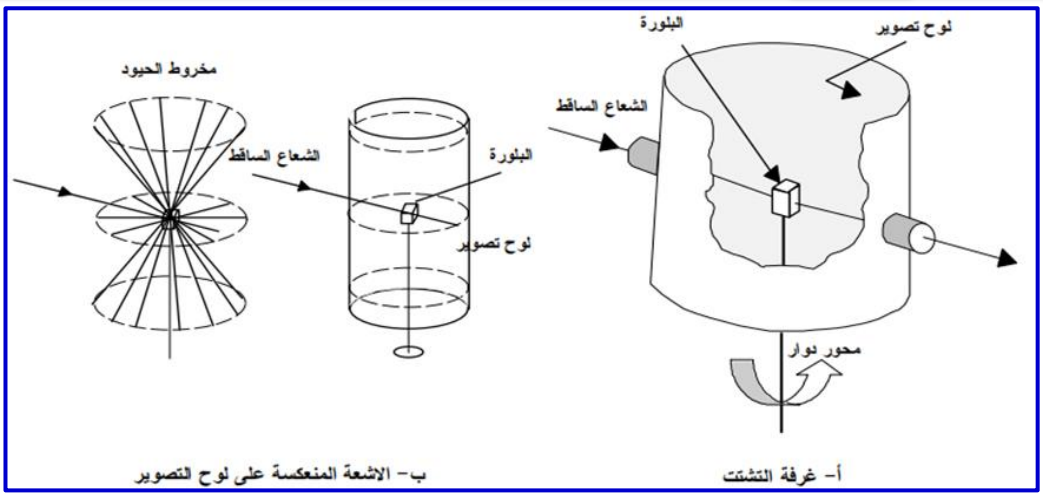
تنسب الطريقة للعالم الألماني ماكس فون لاوي الذي أثبت الطبيعة الموجية للأشعة السينية. وهي تستخدم لتحديد تناظر واتجاه البلوراتالأحادية (أبعادها< 1mm) عبر تحليل نمط الانعراج. تعتمد على أشعة ذات طيف مستمر واتجاه ثابت، مع ثبوت زاوية السقوط θ وتغير الطول الموجي λ لتحقيق قانون براغ. يوضع فيلم تصوير عمودي على الأشعة وآخر خلفه مثقوب [8،9] كما هو موضح في الشكل**(II-4)**:



الشكل(II-4): التركيب التجريبي للانعراج الأشعة السينية طبقا لطريقة لاوي [10].

II-2-3-2- طريقة البلورة الدوارة

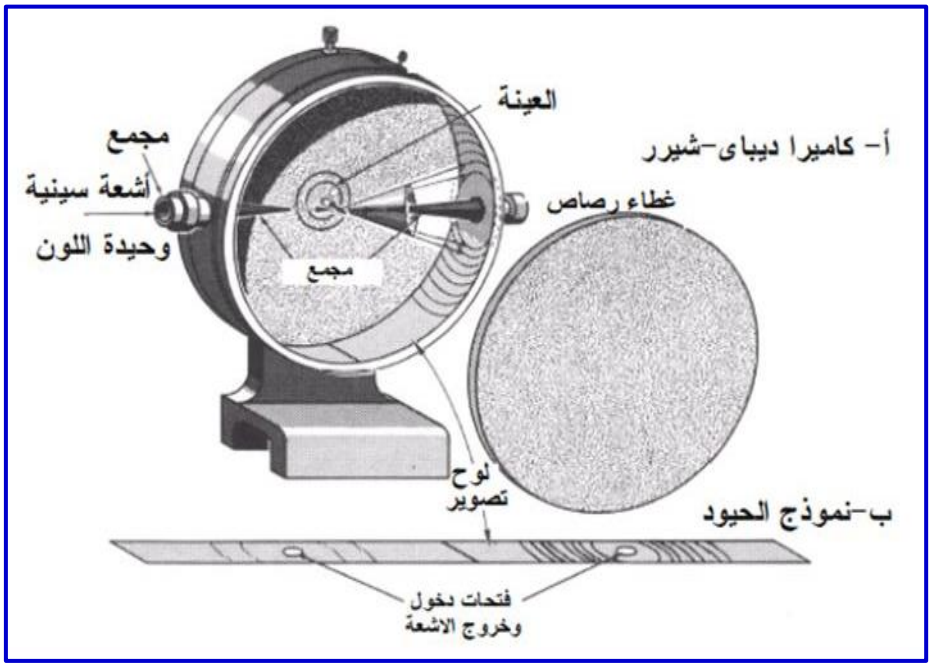
تُستخدم في هذه الطريقة بلورة صغيرة أحادية تدور حول محور ثابت. تسقط عليها أشعة سينية أحادية الطول الموجي، وذلك بهدف الحصول على مدى متصل من زوايا السقوط θ على المستويات البلورية المختلفة في مسافاتها البينية، مما يتيح الفرصة لتحقيق قانون براغ، يوضح الشكل **(II-5)** رسماً مبسطاً لهذه الطريقة، حيث يأخذ فيلم التصوير شكلاً أسطوانياً، بحيث يوازي محوره محور الدوران الذي تثبت عليه البلورة. وتظهر انعكاسات براغ على الفيلم الحساس في طبقات أفقية [9،10].



الشكل(II-5): طريقة الانعراج داخل البلورة الدوارة [11].

II-2-3-3- طريقة المسحوق

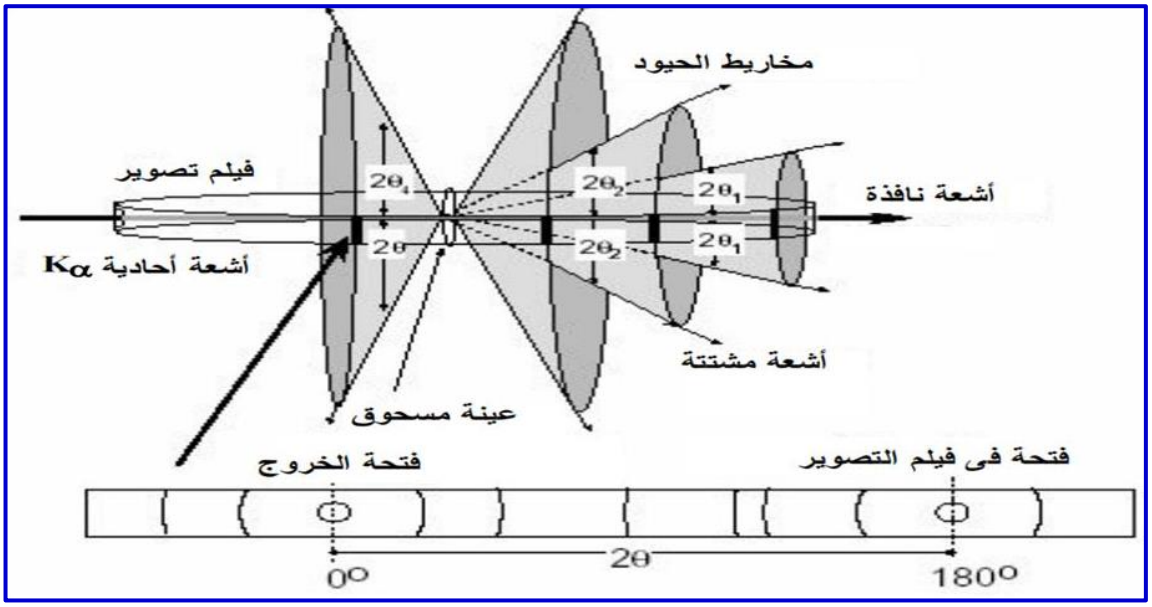
تُعرف هذه الطريقة أيضاً باسم طريقة ديباي - شيرر (Debye-Sherrer) نسبة إلى أول من صنعا آلة تصوير الانعراج (الحيود) التي تحمل الاسم نفسه. يعتمد مبدأ عملها على استخدام ضوء أحادي اللون (ثابت الطول الموجي) مع زاوية سقوط متغيرة [9]، حيث تُطحن العينة إلى مسحوق ناعم (بلورات صغيرة) وتُعبأ في كبسولة رفيعة على شكل أنبوبة شعرية من مادة لا تؤثر في الانعراج، ولا يتجاوز قطرها 1 mm. توضع الكبسولة عمودياً في مركز كاميرا ديباي - شيرر التي تحتوي على لوح تصوير داخلي، ثم تُعرض البلورة لأشعة سينية أحادية اللون، كما هو موضح في الشكل **(II-6)** [9].



الشكل(II-6): مخطط يوضح كاميرا (ديباي – شيرر) ونموذج الانعراج [9].

ونظرا لأن العينة تكون على شكل مسحوق مكون من عدد كبير من البلورات الدقيقة ذات التوجيهات العشوائية، فإن بعض هذه البلورات يحقق شرط براغ بالنسبة لكل مجموعة من المستويات البلورية. وعند

سقوط الأشعة السينية أحادية اللون على العينة، تنعكس الأشعة من البلورات التي تحقق شرط الانعراج في اتجاهات مختلفة، مكونة أسطحا مخروطية تعرف بمخاريط ديباي–شيرر (Debye–Scherrer cones)، يكون محور كل منها موازيا للشعاع الساقط وزاوية فتحه مرتبطة بزاوية الانعراج 2θ. وعند تقاطع هذه المخاريط مع لوح التصوير أو الكاشف تظهر على شكل حلقات متحدة المركز، تمثل كل حلقة انعراج الأشعة السينية عن عائلة معينة من المستويات البلورية، كما هو موضح في الشكل **(7-II)** [9] .



الشكل(II-7): مخطط يوضح مخاريط الأشعة المتشتتة بزوايا مختلفة والانعراجات داخل فيلم التصوير[9].

II-2-4- طريقة التحسين لريتفالد

II-2-4-1- مقدمة

هي طريقة وضعها العالم ريتفالد (H. Rietveld) في عام 1969، حيث تهدف إلى تحسين البنية انطلاقًا من مخطط الانعراج خلال المسحوق، ومعرفة البنية الدقيقة للعينة. وتُعد هذه الطريقة من أبرز الطرق الجيدة لتحديد الثوابت الشبكية للبنى البلورية، كما تعتبر من الإجراءات الفعالة لتحليل المخططات البيانية لانعراج الأشعة السينية من المساحيق [12].

II-2-4-2- مبدأ عملها

يقوم عمل هذه الطريقة على مقارنة منحنى الانعراج النظري المحسوب انطلاقا من نموذج بلوري مفترض، مع منحنى الانعراج التجريبي المُقاس فعلياً من العينة. ويتم تحسين البنية بتقليل الفروق بين المنحنيين، مع استخدام معامل التوافق (GOF) كمؤشر رقمي لمراقبة جودة التحسين، حيث يجب أن تقترب قيمته من الرقم 1 لتحقيق توافق جيد. كما تتميز هذه الطريقة بقدرتها على تحليل العينات متعددة الأطوار في وقت واحد، أي عندما تحتوي العينة على أكثر من طور بلوري [13].

II-2-4-3- دالة التحسين

تعتبر دالة التحسين في طريقة ريتفالد المقياس الأساسي لمدى دقة النموذج الهيكلي المقترح. تعتمد هذه الدالة على مبدأ تقليل الفروق بين النتائج التجريبية والنتائج النظرية باستخدام طريقة المربعات الصغرى، وذلك للوصول إلى أفضل تطابق ممكن يمثل البنية البلورية الحقيقية للمادة [13]، وتعطى بالعلاقة:

$$S = \sum_i w_i \left| y_i^{obs} - y_i^{cale} \right|^2 \qquad \textbf{(2-II)}$$

حيث:

- **S:** تمثل دالة التحسين أو معامل القياس الإجمالي الذي يتم العمل على تقليله لأدنى قيمة ممكنة لضمان أفضل تطابق.
- **Y_{io}:** تمثل شدة الأشعة المقاسة عمليا (Observed Intensity) عند نقطة معينة، وهي البيانات الخام المستمدة من التجربة.
- **Y_{ic}:** تمثل شدة الأشعة المحسوبة نظريا (Calculated Intensity) بناء على النموذج الهيكلي المقترح للجسم المحدث للتشتت.
- **W_i:** تمثل الوزن الإحصائي لكل نقطة بيانات.

II-2-4-4- معاملات الجودة

هي مؤشرات تُستخدم لمراقبة مدى توافق المنحني النظري مع المنحني التجريبي في تحليل ريتفالد، ويمكن كتابة العلاقة النظرية لمعامل التوافق بالشكل التالي:

$$(GOF)^2 = \left(\frac{R_{wp}}{R_{exp}}\right)^2 = \left[\frac{\sum NW_i[y_{iobs} - y_{icalc}]^2}{N-P+C}\right] \qquad \textbf{(3-II)}$$

حيث:

- **R_{exp}:** معامل مخطط المرجح المتوقع.
- **R_{wp}:** معامل مخطط المرجح.

تعطى علاقتهما كما يلي **(4-II)** و**(5-II)**:

$$R_{exp}(\%) = \left[\frac{N-P+C}{\sum_i w_i (y_{iobs})^2}\right]^{\frac{1}{2}} \times 100 \qquad \textbf{(4-II)}$$

$$R_{wp}(\%) = \left[\frac{\sum_i W_i \left| y_{iobs} - y_{icalc} \right|^2}{\sum_i W_i \left| y_{iobs} \right|^2}\right]^{1/2} \times 100 \qquad \textbf{(5-II)}$$

في العلاقات السابقة نعرف ما يلي [14-16]:

- **GOF:** معامل التوافق.
- **R_{exp}:** معامل الثقة أو المطابقة.
- **R_{wp}:** معامل الوزن.
- **W_i:** الوزن الإحصائي.
- **(N – P + C):** عدد درجات الحرية (N عدد نقاط الرسم البياني، P عدد الوسائط المحسنة، C عدد القيود المطبقة على الوسائط).

II-2-4-5- أهمية طريقة ريتفالد

تكتسب طريقة ريتفالد أهمية كبيرة في مجال توصيف المواد وتحليل بيانات انعراج الأشعة السينية (XRD)، وذلك لقدرتها على استخراج معلومات بنيوية دقيقة اعتمادًا على نمط الانعراج الكامل بدلًا من الاعتماد فقط على مواقع القمم وشدّاتها. وتتمثل أهميتها فيما يلي:

- ✓ تحديد الأطوار البلورية الموجودة في العينة بدقة من خلال التعرف على القمم المميزة لكل طور ومقارنتها بالبطاقات المرجعية المناسبة (على شكل ملف cif.).
- ✓ التحليل الكمي للأطوار (Quantitative Phase Analysis) من خلال حساب النسبة الوزنية أو الحجمية لكل طور بلوري موجود في العينة، مما يسمح بتحديد التركيب الكمي للمادة.
- ✓ تحديد البنية البلورية للمادة واستخراج المعلمات البلورية المختلفة، مثل ثوابت الشبكة البلورية (a, b, c) و الزوايا البلورية، إضافة إلى تحديد الزمرة الفضائية (Space Group).
- ✓ تحسين المعلمات البنيوية المتعلقة بمواضع الذرات داخل الخلية البلورية وبعض الخصائص البنيوية الأخرى.

في الدراسة الحالية، تساهم طريقة ريتفالد في تحديد الأطوار البلورية الموجودة في العينة المدروسة بدقة، وتقدير نسبها الكمية، مما يسمح بفهم العلاقة بين البنية والخواص الفيزيائية للمادة [17،18].

II-3- تقنية فلورية الأشعة السينية (XRF)

II-3-1- تعريف

فلورية الأشعة السينية (X-Ray Fluorescence, XRF) هي تقنية تحليلية غير متلفة للمادة تعتمد على ظاهرة الفلورية، والمتمثلة في انبعاث إشعاع كهرومغناطيسي من المادة بعد إثارتها بإشعاع ذي طاقة أعلى. فعند تعريض العينة لأشعة سينية أولية عالية الطاقة أو لأشعة غاما، تكتسب ذراتها طاقة كافية لطرد إلكترونات من الأغلفة الداخلية، وعند عودة الذرة إلى حالة الاستقرار تنتقل إلكترونات من مستويات طاقة أعلى لملء الفراغات المتكونة، مما يؤدي إلى انبعاث أشعة سينية ثانوية مميزة لكل عنصر كيميائي. ومن خلال تحليل طاقات وشدات هذه الأشعة المنبعثة يمكن تحديد التركيب العنصري للعينة بصورة سريعة ودقيقة [19،20].

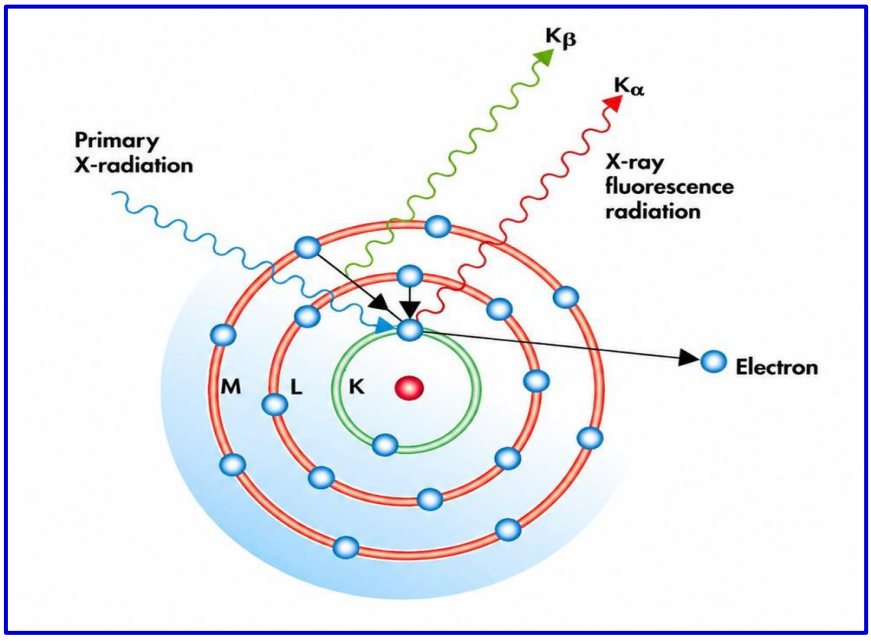
ويرمز لفلورية الأشعة السينية بالرمز (XRF) اختصاراً من (X-Ray Fluorescence)، وهي عبارة عن انبعاث تلقائي ومميز للأشعة السينية الثانوية (الفلورية) من مادة تم تعرضها لمصدر عالي الطاقة يحدث تهيجاً أو إثارة فيها، مثل الأشعة السينية عالية الطاقة أو أشعة غاما [20].

بحيث تعتمد تقنية فلورية الأشعة السينية (XRF) على تفاعل الأشعة السينية مع إلكترونات العينة، وتستخدم في تحديد العناصر الكيميائية المكونة للعينة، سواء كانت ذات تركيز مرتفع (العناصر الرئيسية) أو تركيز منخفض (العناصر النادرة) [19].

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

عندما تسقط أشعة سينية ذات طاقة عالية (تتراوح بين 50 و60 KeV) على ذرات العينة، فإنها قد تمتلك طاقة كافية لانتزاع إلكترون من الأغلفة الداخلية للذرة وذلك بسبب تفاعلها مع الإلكترونات الداخلية للمادة. إذا كانت طاقة الإشعاع الساقط أكبر من طاقة ربط الإلكترون الداخلي، فإن الإلكترون يُقتلع من مداره، لتصبح الذرة غير مستقرة بسبب وجود فجوة إلكترونية في أحد الأغلفة الداخلية. لذلك تنتقل الإلكترونات من مستويات طاقة أعلى إلى المستويات الأدنى لملء هذه الفجوة. وخلال ذلك يتم تحرير الطاقة الزائدة الناتجة عن هذا الانتقال على شكل أشعة سينية فلورية [19]، وهذه الظاهرة موضحة في الشكل **(II-8)** [21].

هذه الأشعة المنبعثة هي عبارة عن موجات كهرومغناطيسية ذات طاقة منخفضة (أقل من طاقة الأشعة السينية الابتدائية الساقطة على المادة) وتسمى الأشعة الفلورية. تمتلك فوتونات هذه الأشعة طاقات محددة ومميزة لكل عنصر وذلك تبعاً للانتقال الإلكتروني بين مدارات محددة داخل العنصر. وبناءً على ذلك يمكن استخدام فلورية الأشعة السينية الناتجة للكشف عن نسبة وفرة العناصر الموجودة في العينة [19].



الشكل(II-8): ظاهرة إصدار أشعة الفلورة [21].

II-3-3- جهاز الفلورة

هو جهاز تحليلي يعتمد على تفاعل الأشعة السينية مع المادة لتحديد تركيبها العنصري، مناسب للمواد الصلبة والسوائل والمساحيق، وهو في معظم الحالات غير مدمر للعينة. يعد هذا الجهاز أداة فعالة للتحليل النوعي والكمي للمركبات العنصرية [22].

هناك العديد من أجهزة الفلورة بالأشعة السينية بتصميماتها المختلفة، إلا أنها تشترك جميعاً في ثلاثة أجزاء رئيسية يمكن تفصيلها فيما يلي:

II-3-3-1- مصادر الأشعة السينية (الأولية والثانوية)

تتكون منظومة المصادر في الجهاز من أنبوب الأشعة السينية الذي يُعد المصدر الأكثر شيوعًا لإنتاج الأشعة السينية الأولية عالية الشدة. ويعتمد الطيف الناتج على نوع المعدن المستعمل كمصعد داخل الأنبوب، كما يمكن استخدام مرشحات أو أهداف ثانوية لتحسين خصائص الحزمة الساقطة على العينة. و في بعض أجهزة XRF تُستخدم أهداف ثانوية توضع بين أنبوب الأشعة السينية والعينة. تعمل هذه الأهداف على تحويل الحزمة الأولية واسعة الطيف إلى حزمة أكثر انتقائية، مما يقلل من الخلفية الإشعاعية والتداخلات الطيفية، ويساهم في تحسين حساسية القياس ودقة التحليل العنصري.

II-3-3-2- المصادر المشعة

هذه المصادر عبارة عن حاويات محكمة الإغلاق تحتوي على نظائر مشعة، تصدر إشعاعات ذات طاقة متقطعة مناسبة لإثارة العناصر في العينة، ويختلف نوع المصدر تبعاً للأشعة السينية المطلوبة.

II-3-3-3- الكاشف:

يعتمد مبدأ عمل الكاشف على تفاعل الإشعاع مع المادة الحساسة للكاشف، مما يؤدي إلى تأيين الذرات وإثارتها. و يُعد التأين الظاهرة الأكثر أهمية، إذ ينتج في الكواشف الغازية أزواج من الأيونات والإلكترونات، بينما تتولد في كواشف أشباه الموصلات أزواج إلكترون–فجوة. ويُقاس الإشعاع من خلال الإشارة الكهربائية الناتجة عن هذه التفاعلات، والتي تُسجل على شكل نبضات كهربائية أو تيار مستمر، ثم تُعالج بواسطة دائرة إلكترونية متكاملة. وتتوفر أنواع متعددة من الكواشف تختلف باختلاف طبيعة الإشعاع المراد قياسه ومتطلبات التحليل. ومن أكثر الكواشف استعمالا في أجهزة XRF الحديثة كواشف الانجراف السيليكوني (SDD) لما تتميز به من دقة طاقوية عالية وسرعة في جمع الإشارات [23].

II-3-3-4- مزايا تحليل تقنية الفلورة (XRF)

- ✓ **غير مدمرة:** يتم الحفاظ على العينات، وهي مناسبة للأشياء النادرة، الثمينة، أو الأثرية.
- ✓ **إعداد العينة بالحد الأدنى:** العديد من الفحوصات الروتينية ممكنة دون تحضير مكثف، مما يقلل الوقت والتكلفة.
- ✓ **الحساسية الجيدة:** كشف أقل من جزء في المليون في ظروف مثالية.
- ✓ **التعددية:** تعمل عبر المواد الصلبة والسوائل والمساحيق، قابلة للتكيف مع البيئات الميدانية والمختبرات.
- ✓ **السرعة والفعالية من حيث التكلفة:** ينتج من ثوانٍ إلى دقائق. يتجنب استخدام المواد الكيميائية والمواد الرطبة المعقدة.
- ✓ **التحليل متعدد العناصر:** إمكانية الكشف عن عدة عناصر كيميائية في العينة وتحليلها في في وقت واحد[24].

II-4- تعريف الناقلية الحرارية

II-4-1- مقدمة

الناقلية الحرارية هي خاصية فيزيائية تتعلق بالمادة، تربط التدرج في درجة الحرارة بتدفق الحرارة (ثابت التناسب)، وهي تمثل قابلية المادة إلى توصيل الحرارة، فعندما تسمح مادة ما للحرارة بالانتشار بسهولة من خلالها، يقال إنها موصلة للحرارة أو ذات موصلية حرارية عالية، هذا ينطبق بشكل خاص على المعادن، وعلى العكس من ذلك، فإن مادة مثل الهواء الساكن تقاوم انتقال الحرارة وتسمى عازلة حراريا.

وبشكل عام الناقلية الحرارية تمثل كمية الحرارة المتنقلة خلال وحدة الزمن من خلال مادة ذات وحدة سمك ووحدة مساحة، عندما يكون الفارق في درجة الحرارة عند طرفي المادة المتقابلين واحد درجة، يرمز لها بالرمز λ أو k، وحدتها في النظام العالمي $W.m^{-1}.k^{-1}$ [25].

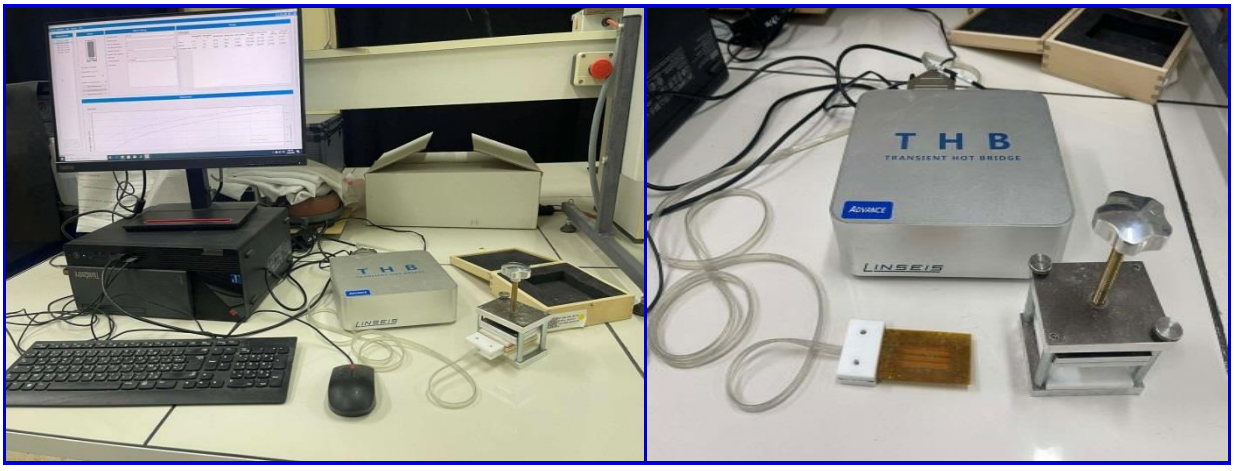
II-4-3- جهاز الناقلية الحرارية المستعمل في التجربة

استخدم في هذه التجربة جهاز (THB)، وهو المعروف ب الجسر الساخن العابر (Transient Hot Bridge). تعد هذه التقنية نسخة مطورة من طريقة أسلاك التسخين، حيث تم تحسينها من قبل المكتب الفني الفيزيائي الألماني (PTB).

تسمح هذه الطريقة بقياس الخصائص الحرارية التالية في أقل من دقيقة:

- التوصيل الحراري.
- الانتشار الحراري.
- السعة الحرارية النوعية

ويشمل نطاق قياس الناقلية الحرارية المواد العازلة والسيراميك والمعادن، مما يوفر دقة عالية في قياس مختلف أنواع العينات [26].



الشكل(II-9): الجهاز المستعمل لقياس الناقلية.

II-2-4- مبدأ عمل الجهاز قياس الناقلية الحرارية

يعتمد الجهاز في تشغيله على تقنية دقيقة تهدف إلى قياس قدرة المواد على نقل الحرارة، وتتلخص آلية العمل في الخطوات التالية [27]:

- **تجهيز العينة:** يتم وضع المادة المراد فحصها في حامل مخصص، بحيث يثبت المستشعر المرن (Flexible Sensor) بدقة بين عينتين من المادة لضمان التلامس التام.
- **عملية التسخين:** يمر تيار كهربائي صغير عبر عنصر تسخين مدمج داخل المستشعر، مما يؤدي إلى توليد كمية محددة من الحرارة.
- **انتقال الحرارة:** تنتقل هذه الحرارة من المستشعر إلى داخل مادة العينة المحيطة به.
- **قياس تغير درجة الحرارة:** يقوم المستشعر بقياس التغير في درجة الحرارة بالنسبة للزمن.
- **معالجة البيانات:** يتم إرسال هذه البيانات إلى نظام إلكتروني أو برنامج حاسوبي متخصص يقوم بتحليل النتائج باستخدام المعادلات الفيزيائية للتبادل الحراري.

حامل العينة | المستشعر المرن

الشكل(II-10): جهاز قياس الناقلية الحرارية.

ويمتلك جهاز THB عدة مزايا نذكر منها [26]:

- ✓ سهولة وسرعة إجراء القياسات الحرارية.
- ✓ إمكانية الحصول على نتائج دقيقة وموثوقة بفضل اعتماد الجهاز على نماذج حسابية مناسبة لتحليل البيانات التجريبية.
- ✓ إمكانية قياس الخصائص الحرارية لعينات ذات أشكال وأحجام مختلفة.
- ✓ إمكانية الحصول على النتائج خلال فترة زمنية قصيرة.
- ✓ إمكانية قياس عدة خصائص حرارية في تجربة واحدة، مثل الناقلية الحرارية والانتشارية الحرارية والسعة الحرارية الحجمية.

II-5- جهاز الضغط والانحناء

II-5-1- التعريف بالجهاز

جهاز الضغط والانحناء هو جهاز مخبري يستخدم لقياس الخواص الميكانيكية للمواد مثل: الإسمنت، الطوب، الجبس وغيرها من من المواد الصلبة كما هو موضح في الشكل **(II-11)** [28]. حيث يقوم بتطبيق قوة ميكانيكية متزايدة تدريجيا على العينة إلى غاية حدوث الكسر أو التشوه من أجل تحديد:

- مقاومة الانحناء.
- مقاومة الضغط.

الشكل(II-11): صورة جهاز الضغط والانحناء.

II-5-2- مبدأ عمل جهاز الضغط والانحناء

يعتمد مبدأ عمل جهاز الضغط والانحناء على تطبيق حمل ميكانيكي متزايد على العينة بواسطة نظام هيدروليكي أو كهربائي حتى الوصول إلى نقطة الكسر أو التشوه [28]، حيث يقوم الجهاز بقياس:

- القوة المطبقة بوحدة كيلونيوتن (KN).
- الإجهاد الناتج بوحدة ميجا باسكال (MPa).

ومن هاته القياسات يتم حساب مقاومة الضغط ومقاومة الانحناء للمادة المدروسة.

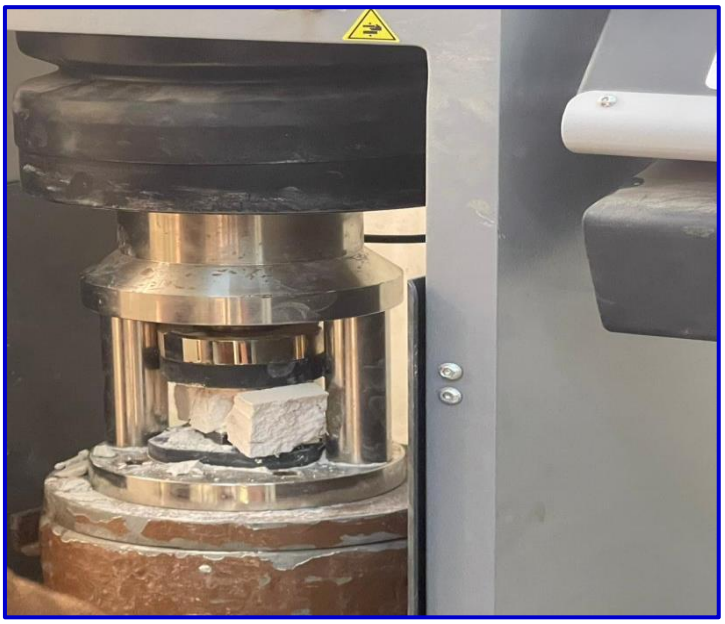
❖ **في اختبار الانحناء**

توضع العينة على دعامتين، ثم يُطبق حمل في المنتصف، مما يؤدي إلى انحنائها حتى الكسر، ومن خلال ذلك يتم حساب مقاومة الانحناء كما هو موضح في الشكل **(II-12)** [28].

الشكل(II-12): العينة أثناء اختبار الانحناء.

❖ **في اختبار الضغط**

توضع العينة بين صفيحتين ضاغطتين كم يظهر في الشكل **(II-13)**، ثم تُطبق قوة عمودية متزايدة تدريجياً حتى حدوث انهيار أو كسر العينة، ويتم تسجيل أقصى حمل تحملته [29].



الشكل(II-13): العينة أثناء اختبار الضغط.

II-5-3- أهمية الاختبارات

تكتسي اختبارات الضغط والانحناء أهمية كبيرة في تحديد الخواص الميكانيكية الأساسية للمواد، حيث تسمح بتقييم مقاومتها وقدرتها على تحمل الإجهادات المطبقة عليها، كما تساعد في تقدير مدى ملائمة المادة للاستعمالات المختلفة.

وتساهم هذه الاختبارات في دراسة السلوك الميكانيكي للمواد وتحديد حدود مقاومتها تحت ظروف تحميل مختلفة، مما يسمح باختيار المواد المناسبة للتطبيقات المختلفة مثل مواد البناء، الهندسة المدنية، صناعة السيارات والطائرات [29].

II-6- خلاصة الفصل

في ختام هذا الفصل، يتضح أن اختيار الوسائل والتقنيات التحليلية المناسبة يشكل ركيزة أساسية لأي دراسة علمية تهدف إلى فهم خصائص المواد وتطبيقاتها. فقد تم استعراض أهم التقنيات المستعملة في توصيف مادة الجبس المدعمة بألياف الحلفاء، بدءاً بتقنيات الانعراج وانعكاس الأشعة السينية (XRD) وتحليل العناصر بالأشعة السينية (XRF) ، مروراً بطريقة ريتفالد (Rietveld Refinement) لتحسين دقة التحليل البنيوي .

كما تم التطرق إلى المبادئ النظرية للأجهزة المستعملة في قياس الخصائص الحرارية والميكانيكية، حيث شملت هذه التجارب كلاً من قياس الناقلية الحرارية لتقييم قدرة المادة على نقل الحرارة، وهو أمر مهم في دراسة الجبس المستخدم في تطبيقات العزل والبناء، بالإضافة إلى تجربة الضغط التي تهدف إلى قياس مقاومة المادة، وتجربة الانحناء التي تحدد سلوك المادة عند تعرضها لقوى الانحناء، خاصة بعد تدعيمها بالألياف حيث تساهم هذه الأخيرة في تحسين الصلابة ومقاومة التشقق. وبهذا التكامل بين هذه التقنيات والتجارب، يمكن ربط البنية الداخلية للمادة بسلوكها الحراري والميكانيكي العملي، وتفسير النتائج التجريبية التي سيتم عرضها في الفصول الموالية.

قائمة مراجع الفصل الثاني

❖ المراجع العربية

[1] ميرفانا ياسر سلامة، "معجم الفيزياء التعريفات العلمية"، دار صفاء للنشر والتوزيع، الأردن، (2016).

[2] أ.د. محمود نصر الدين، "الأشعة السينية وبعض تطبيقاتها"، الهيئة العربية للطاقة الذرية، تونس (2008).

[6] ز. منصوري؛ ش. قروط، " المساهمة في دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية لرمل ووردة الرمال منطقة الراشدي بالحجيرة "، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، الجزائر (2020).

[7] ن. محدادي، "تحديد تركيب الأصناف اللونية الرئيسية لرمل كثبان منطقة ورقلة، وتحديد سبب تلونها باستخدام الطرق الطيفية"، أطروحة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، الجزائر (2017).

[8] م. يسري، "فيزياء الحالة الصلبة - الباب الخامس - انعراج الأشعة السينية في البلورات"، جامعة المنصورة، مصر، نوفمبر (2015).

[9] ع. نعيمة؛ م. سليمان، "علم البلورات والأشعة السينية" دار الفكر العربي، مصر (2005).

[10] خ. رزاق هبلة؛ ر. طالبي، "تحضير وتحديد البنية البلورية للمركب $SrFe_{0.7}MO_{0.3}O_{3-\delta}$"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2018).

[11] ن. باي؛ م. بن ساسي، "دراسة تأثير المعالجات الحرارية على مادة الجبس في منطقة الفولية بالوادي"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2021).

[12] ش. ديدة، "تطبيق تدقيق ريتفالد على مخطط انعراج الأشعة السينية لمسحوق (بآثار السيليكا) عند زوايا صغيرة"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، الجزائر (2021).

[19] د. متولي، "الأشعة السينية الفوائد والمخاطر"، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الرياض، السعودية (2018).

[20] م. مختاري، "الفصل الثاني في طرق التحليل والخصائص - مطيافية الأشعة السينية" - كلية العلوم الدقيقة جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي.

[21] الدكتور محمد الصادق محبوب، "الفصل الثاني الأشعة السينية" محاضرة لسنة أولى ماستر كلية العلوم الدقيقة، جامعة حمه لخضر الوادي 2025 – 2026.

[25] إ. بن عمارة، "مساهمة في دراسة العزل الحراري للبناءات الجبسية في المناطق الصحراوية"، أطروحة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، الجزائر (2025).

[27] ش، رحومه؛ ع. رحومة، "تحسين الخصائص الحرارية والميكانيكية لجبس الفولية بالوادي المستعمل في البناء"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2025).

❖ المراجع الأجنبية

[4] NIVALDO J.TRO, "CHEMISTRY A MolecularApproach ", Third Edition, Pearson Education United States of America, (2018).

[5] Anne-line AUZENDE, " Techniques Analytiques en Sciences de la Terre Quelques techniques de la Minéralogie ", Biogéomédia, UNIVERSITE PARIS 7 deniddiderot.

[14] A. Bouhali, "synthèse caractérisation et etude structurale par diffraction des RX des oxalates mixtes à base de plomb, de lanthane et de strontium", mémoire magister en chimie, université mentouri, Constantine, Algérie (2005).

[15] S. Benmokhtar, "Affinements méthode de Rietveld (Fullprof)", université Hessa II – Mohamedia Ben M'sik, (2010).

[16] Lutterotti, L. (2012). Introduction to Diffraction and the Rietveld Method. Laboratorio di Tecnologia e Scienza dei Materiali. University of Trento, Italy.

[17] H. M. Rietveld, A profile refinement method for nuclear and magnetic structures, Journal of Applied Crystallography, 2(2), (1969) 65–71

[18] Young, R. A. (Ed.). (1993). *The Rietveld Method*. IUCr Monographs on Crystallography, Vol. 5. Oxford University Press, Oxford, UK.

[23] Encyclopedia of Analytical chemistry; copyright John Wiley & Sons Ltd Meyers R.A (2010).

[28] CONTROLS Group, Compression and Flexural Testing Machines, Official Technical Documentation, Italy.

❖ **مواقع انترنت**

[3] https://opentextbc.ca/chemistry/chapter/10-6-lattice-structures-in-crystalline-solids/?fbclid=IwARl8ec3fGW2cHdMX-hbYXbrq_Y8YKMNbdktEJZJT3Fn6VEPGP9FH_bdjJ2Y, Accessed: 30/04/2026.

[13] الرابط : تدقيق ريتفيلد(almerja.com) : Rietveld Refinement تاريخ الاطلاع: 2026/05/12.

[22] https://www.horiba.com/aut/scientific/technologies/energy-dispersive-x-ray-fluorescence-ed-xrf/what-is-x-ray-fluorescence-xrf/; Accessed: 25/04/2026.

[22] https://www.spectro.com/xrf-principle, Accessed: 25/04/2026.

[26] الرابط :ما هو الجسر الساخن العابر THB؟ (linseis.com) ، تاريخ الاطلاع: 01-05-2026.

[29] https://www.qa-group.com/en/glossary/tensile-compressive-and-bending-testing/; Accessed: 25/04/2026.

الجزء التجريبي

الفصل الثالث

العمل التجريبي، عرض النتائج ومناقشتها

III-1- تمهيد

يُعتبر الجبس من المواد الطبيعية واسعة الاستعمال في مجالات البناء والصناعة، لما يتميز به من سهولة التحضير والتشكيل وتوفره بكميات كبيرة في العديد من المناطق. غير أن خصائصه الفيزيائية والميكانيكية في حالته الطبيعية قد لا تكون كافية لبعض التطبيقات الحديثة، مما دفع إلى البحث عن وسائل لتحسين أدائه من خلال إضافة مواد طبيعية داعمة.

وقبل الشروع في تحضير الخلطات المدعمة، أُجريت تحليلات بنيوية وكيميائية على الجبس الخام لفهم طبيعته البلورية وتركيبه الكيميائي، وذلك باستخدام تقنيتي انعراج الأشعة السينية (XRD) وفلورية الأشعة السينية (XRF).

خضعت عدة خلطات للدراسة شملت الجبس بدون إضافات كعينة مرجعية، والجبس المدعم بألياف الحلفاء، إضافة إلى الجبس المحتوي على وردة الصحراء. كما أُجريت عليها مجموعة من التجارب الميكانيكية والحرارية، تمثلت في اختبار الانحناء، واختبار الضغط، والتوصيل الحراري، والرطوبة، بهدف تقييم مدى تأثير هذه الإضافات الطبيعية على خصائص الجبس وتحسين أدائه.

III-2- الدراسة البنيوية

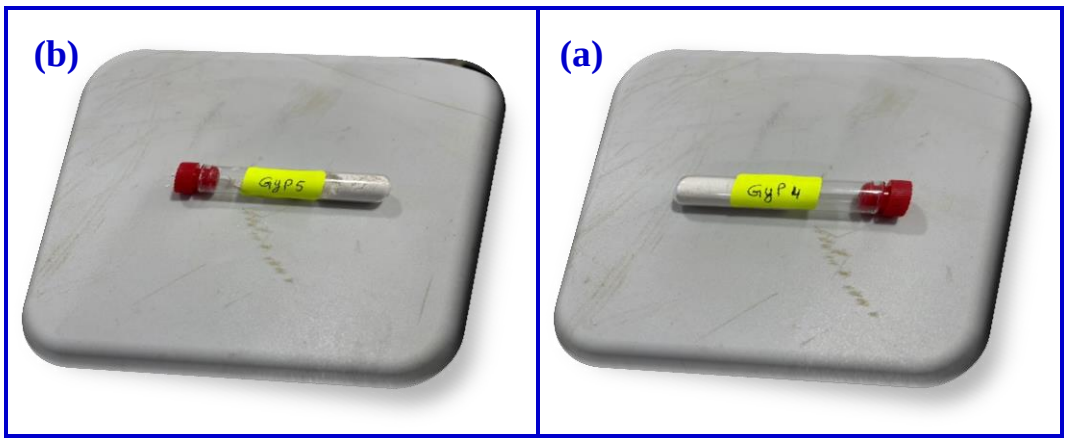
III-2-1- تحضير عينات

الجبس الصناعي المستخدم في هذه الدراسة تم توفيره من منطقة الفولية، كما هو موضح في الشكل **(III-1)**.

الشكل(III-1): جبس اصناعي من منطقة الفولية.

تم تحضير دفعتين من الجبس الصناعي (الشكل **III-2-a**، **III-2-b**). وذلك بهدف انجاز الاختبارات التالية:

- **اختبار انعراج الأشعة السينية (XRD):** يهدف إلى التعرف على البنية البلورية وتحديد الأطوار المكونة للعينة.
- **اختبار فلورة الأشعة السينية (XRF):** يهدف إلى تحديد التركيب الكيميائي للعينة والكشف عن العناصر ونسبها.



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

III-2-2- تحليل انعراج الأشعة السينية (XRD)

تم إجراء تحليل انعراج الأشعة السينية باستخدام جهاز من نوع PROTO AXRD Benchtop powder diffraction، والذي يعمل وفق الهندسة الزاوية (θ -2θ)، كما هو موضح في الشكل **(3-III)**.

✓ **المنهجية التجريبية**

أ- **تحضير العينة:** وضعت المادة المراد فحصها على شكل مسحوق ناعم في حامل مخصص داخل الجهاز (**الشكل (4-III)**).

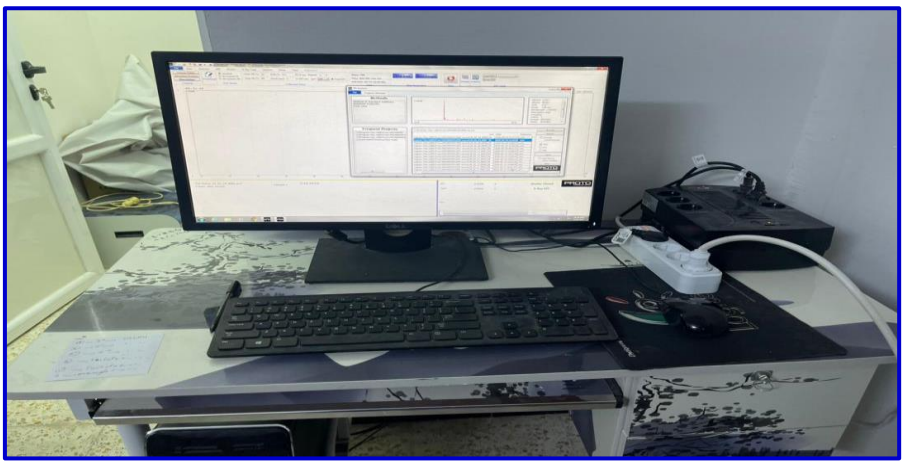
ب- **ظروف القياس:** عرضت العينة لأشعة سينية أحادية اللون الصادرة عن مصدر من النحاس (Cu) يملك طولا موجيا مقداره: $\lambda_{k\alpha} = 1.54251$ Å

ت- **مجال المسح:** تم مسح زاوية الانعراج (2θ) في المجال من 10° إلى 80°.

ث- **معالجة البيانات:** الجهاز مربوط مباشرة مع حاسوب (الشكل **(5-III)**) مزود ببرنامج متخصص يقوم بتسجيل شدة الأشعة المنعرجة ورسمها في شكل مخطط انعراج (XRD Pattern). يعد هذا المخطط المصدر الرئيسي للتحليل حيث يمكننا من حساب الثوابت الشبكية وتقدير حجم البليرات.

الشكل(III-3): جهاز انعراج الأشعة السينية.

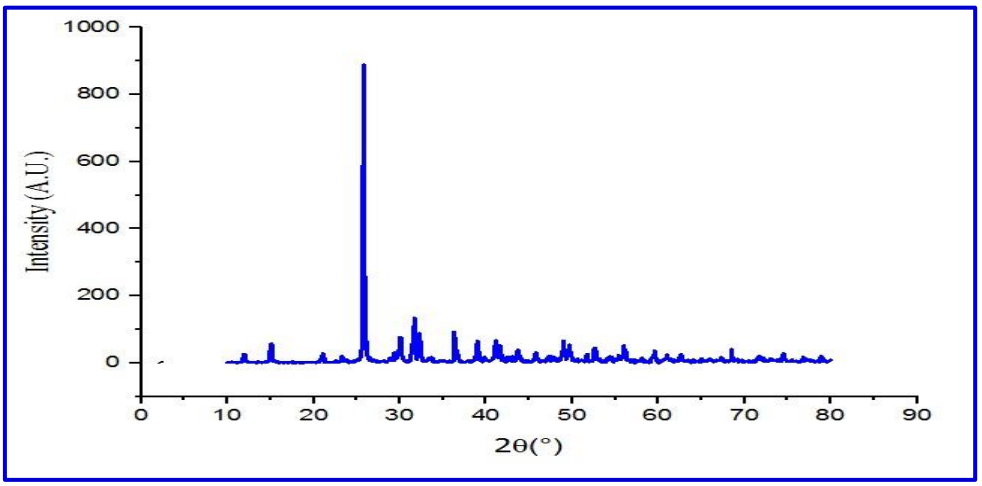
الشكل(III-4): حامل العينة داخل الجهاز.



الشكل(III-5): الحاسوب المتصل بجهاز (XRD).

III-2-2-1- نتائج انعراج الأشعة السينية (XRD)

يوضح الشكل **(III-6)** مخطط انعراج الأشعة السينية للعينة المدروسة، والذي يمثل تغير شدة الأشعة المنعرجة بدلالة زاوية الانعراج (2θ) في المجال الممتد من °10 إلى °80. ويتميز النمط المسجل بظهور قمم انعراج حادة وواضحة، تتصدرها قمة رئيسية عالية الشدة عند °2θ=25.82، بالإضافة إلى قمم أخرى عند الزوايا مثل °31.7 و°32.3 و°36.3، مما يدل على الطبيعة البلورية للعينة المدروسة وارتفاع درجة انتظامها البنيوي.



الشكل(III-6): مخطط انعراج الأشعة السينية لعينة من جبس الفولية.

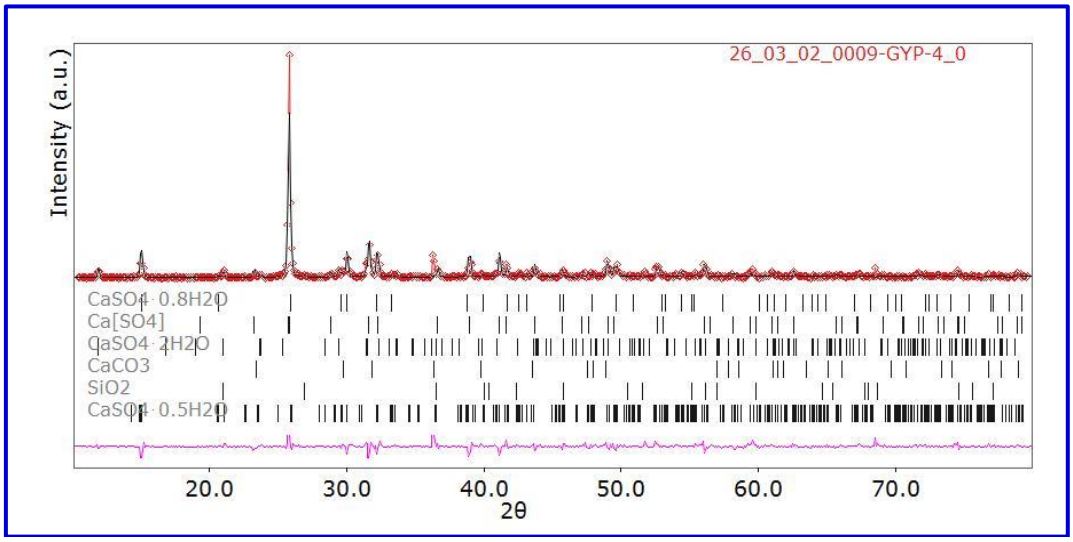
نلاحظ من خلال المخطط أن القمة الأكثر شدة وحدة (المظهر البلوري السائد) تقع عند زاوية براغ 2θ=25.8 والتي تمثل الطور البلوري الرئيسي والأكثر استقرارا لكبريتات الكالسيوم اللامائية والمعروف بطور الأنهيدريت ($CaSO_4$).

كما تظهر قمم انعراج ثانوية أخرى أقل شدة وموزعة عند الزوايا القريبة من °31.7 و°32.3 و°36.3 وهي تؤكد التداخل البلوري الطوري المصاحب لمركب الجبس البلوري ثنائي الهيدرات ($Ca\ SO_4\ 2H_2O$) والأطوار المتدرجة لكبريتات الكالسيوم.

يعكس هذا التوزيع الطوري والشدة العالية للقمم درجة تبلور ممتازة للمادة الخام المستخدمة في الدراسة.

III-2-2-2- تحسين نتائج الانعراج بطريقة ريتفالد

يمثل الشكل **(7-III)** تحسين ريتفالد لنمط انعراج الأشعة السينية (XRD) الخاص بعينة قائمة على الجبس، حيث تُعد هذه التقنية من أهم الطرق المستعملة في توصيف المواد البلورية وتحديد الأطوار المعدنية بدقة. وقد أُنجزت عملية التحسين باستعمال برنامج FullProf [1]، المخصص لمعالجة وتحليل بيانات حيود الأشعة السينية. ويُلاحظ من خلال الشكل وجود توافق جيد بين المنحنى التجريبي المسجل باللون الأحمر والمنحنى المحسوب باللون الأسود، مما يدل على دقة النموذج المستعمل في عملية التحسين. كما أن منحنى الفرق يتميز بانخفاض شدته واستقراره النسبي، وهو ما يعكس جودة المطابقة وموثوقية النتائج المتحصل عليها.



الشكل(7-III): النتيجة النهائية لتحسين ريتفالد لمخطط انعراج العينة Gyp 4.

بعد إتمام عملية تحسين ريتفالد لنمط انعراج الأشعة السينية للعينة المدروسة، تم استخراج النتائج النهائية المتعلقة بالبنية البلورية. وقد لخصت هذه النتائج في الجدول **(1-III)**، الذي يتضمن الأطوار البلورية المحددة في العينة ونسبها، بالإضافة إلى نسب عوامل الثقة المرتبطة بعملية التحسين.

الجدول(1-III): نتائج تحسين ريتفالد لمخطط (XRD) تتضمن عوامل الثقة ونسبة تواجد الأطوار لعينة الجبس المدروسة.

العينة	نسبة التواجد %					
Gyp-4	$CaSO_4•0.8H_2O$	$Ca\ SO_4$	$CaSO_4•2H_2O$	$CaCO_3$	SiO_2	$CaSO_4•0.5H_2O$
	12.90	62.69	8.10	0.34	0.64	15.33
العينة	عوامل الثقة %					
Gyp-4	R_P	R_{WP}	R_{exp}	χ^2		
	32.31	44.77	28.09	2.54		

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

- تظهر نتائج تحسين ريتفالد أن العينة المدروسة (Gyp-4) تتكون أساسا من طور كبريتات الكالسيوم اللامائية (Anhydrite) $CaSO_4$ بنسبة مرتفعة بلغت 62.69%، مما يدل على أن المادة المدروسة خضعت لتحولات حرارية كبيرة أدت إلى إزالة ماء التبلور بصورة شبه كاملة. ويرتبط ذلك مباشرة بطريقة تحضير العينة، حيث تم طهي الجبس عند درجة حرارة مرتفعة جدا تقارب 1400°C، وهي درجة حرارة كافية لإحداث تحولات طورية مهمة في بنية كبريتات الكالسيوم وتحويل الجزء الأكبر منها إلى الطور اللامائي (Anhydrite).
- كما تم الكشف عن وجود طور (Gypsum) $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ بنسبة 8.10%، وهو الجبس ثنائي الإماهة المعروف بأنه الطور الطبيعي الأكثر شيوعا لكبريتات الكالسيوم. وعلى الرغم من تعرض العينة لدرجة حرارة مرتفعة جدا، فإن بقاء نسبة محدودة من هذا الطور قد يكون ناتجا عن عدم تجانس التوزيع الحراري داخل المادة أو عن إعادة امتصاص الرطوبة من الوسط المحيط بعد التبريد والتخزين.
- أظهرت النتائج كذلك وجود طور (Bassanite) $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ بنسبة 15.33%، وهو الشكل نصف المميه للجبس .وقد يشير وجوده إلى أن بعض مناطق المادة مرت بمراحل انتقالية أثناء عمليات التسخين والتبريد، حيث يمثل هذا الطور مرحلة وسيطة بين الجبس ثنائي الإماهة والأنهيدريت.
- تم ايضا تسجيل وجود طور $CaSO_4 \cdot 0.8H_2O$ بنسبة 12.90%، ويمكن اعتبار هذا الطور حالة انتقالية ذات درجة إماهة متوسطة قد ترتبط بظروف التحضير أو بمراحل إعادة الترطيب الجزئي بعد المعالجة الحرارية.
- إضافة إلى ذلك، كشفت النتائج عن وجود آثار طفيفة جدا من $CaCO_3$ بنسبة 0.34% وSiO_2 بنسبة 0.64%، وهي نسب ضعيفة قد تعود إلى شوائب طبيعية مرتبطة بمصدر الجبس أو بمواد معدنية مرافقة خلال التكوين الجيولوجي أو أثناء التحضير.
- تشير هذه النتائج إجمالا إلى أن العينة لا تتكون من طور بلوري واحد وإنما من نظام متعدد الأطوار (Multi-phase system) يضم عدة أشكال مختلفة من كبريتات الكالسيوم بدرجات إماهة متنوعة .كما تعكس هذه النتائج التأثير الواضح للمعالجة الحرارية عند درجات الحرارة المرتفعة جدًا على البنية البلورية للجبس، حيث تؤدي هذه المعالجة إلى إزالة الماء البنيوي وحدوث تحولات طورية متتالية نحو الأطوار الأقل إماهة ثم نحو الأنهيدريت.
- بالنسبة لعوامل الثقة الناتجة عن عملية تحسين ريتفالد، فقد بلغت قيم $R_p = 32.31\%$ و $R_{wp} = 44.77\%$ و$R_{exp} = 28.09\%$ و $\chi^2 \approx 2.54$. وتشير هذه القيم إلى وجود توافق مقبول نسبيا بين المخطط التجريبي والمخطط المحسوب، إلا أن الارتفاع النسبي لقيمة R_{wp} قد يرتبط بتداخل بعض القمم أو تأثير الخلفية.
- وتجدر الإشارة إلى أن تحاليل الأشعة السينية المنجزة على عينات أخرى أظهرت وجود الأطوار البلورية نفسها، مع اختلاف في نسب تواجدها من عينة إلى أخرى. ويمكن تفسير هذا التباين أساسا بعدم تجانس المادة الأولية المستعملة، حيث إن الجبس الخام لا يتكون من طور نقي واحد، بل يحتوي على خليط من الجبس المميه بالإضافة إلى شوائب معدنية مثل الكالسيت **($CaCO_3$)** والرمل **(SiO_2)** بنسب متفاوتة. كما قد تتأثر هذه النسب أيضا بظروف التحضير والمعالجة الحرارية، والتي تؤثر على التحولات الطورية لكبريتات الكالسيوم أثناء عملية التسخين.

III-3-2- نتائج التحليل الطيفي للعينة بتقنية XRF

يظهر الجدول **(2-III)** نتائج التحليل الطيفي للأشعة السينية الفلورية (XRF) لعينة الجبس المستخدمة في هذه الدراسة.

الجدول(2-III): نتيجة التحليل الطيفي باستعمال تقنية XRF لعينة من الجبس.

التركيب الكيميائي	نسبة التواجد (%)	التركيب الكيميائي	نسبة التواجد (%)
Na2O	0.09	**CuO**	0.0061
MgO	0.27	**ZnO**	0.0022
Al_2O_3	0.06	**Rb2O**	<0.001
SiO2	1.2	**SrO**	0.1291
P_2O_5	<0.01	**ZrO2**	0.0516
SO3	56.85	**MoO3**	0.0037
K2O	0.03	**BaO**	<0.001
CaO	41.9	**PbO**	<0.001
TiO2	<0.01	**Nb_2O_5**	<0.001
MnO	<0.01	**CoO**	<0.001
Fe_2O_3	0.05	**WO3**	<0.001
V_2O_5	<0.001	**Br**	0.0019
Cr_2O_3	<0.001	**Cl**	0.0646
NiO	0.0027		

يتضح من خلال النتائج الكيميائية أن العينة تتكون بشكل رئيسي من ثلاثي أكسيد الكبريت (SO_3) بنسبة 56.85%، ومن أكسيد الكالسيوم (Cao) بنسبة 41.9%، وهو ما يمثل المركبات الأساسية المكونة لجبس كبريتات الكالسيوم. كما تبين المؤشرات انخفاضا حادا في نسب الشوائب الأخرى، حيث لم تتجاوز نسبة السيليكا (SiO_2) 1.2%، مع وجود نسب ضئيلة جدا من أكاسيد المغنزيوم والألمنيوم والحديد.

III-3- تحضير العينات

اعتمد تحضير العينات في هذه الدراسة على مرحلتين أساسيتين وهما:

III-3-1- تحضير العينات في المرحلة الأولى

تم خلال هذه المرحلة تحضير مجموعة من الخلطات الجبسية انطلاقا من الجبس الصناعي لمنطقة الفولية بالوادي، باستعمال قوالب ذات أبعاد قياسية 4×4×16 cm، وذلك بهدف دراسة تأثير إضافة ألياف الحلفاء على الخصائص الميكانيكية والحرارية للجبس.

اعتمدت الدراسة على تدعيم الجبس بألياف الحلفاء باعتبارها مادة طبيعية متجددة ومتوفرة محليا بكثرة في البيئة الصحراوية، إضافة إلى انخفاض تكلفتها مقارنة بالمواد الصناعية المستعملة في التدعيم، مما يجعلها خيارا مناسبا لتثمين الموارد المحلية وتطوير مواد بناء ذات طابع مستدام.

تم تحضير أربع خلطات مختلفة وفق نسب وزنية من ألياف الحلفاء بلغت 0%، 1%، 2%، و3%، حيث تمثل عينة 0% العينة المرجعية للمقارنة. وقد اختيرت هذه النسب من أجل تقييم تأثير محتوى الألياف على سلوك المادة وتحسين خصائصها الفيزيائية والميكانيكية.

ويوضح الجدول **(3-III)** المقادير الوزنية لمختلف مكونات الخلطات الجبسية المحضرة وفق نسب الإضافة المعتمدة.

الجدول(3-III): المقادير الوزنية لمكونات الخلطات الجبسية بمختلف نسب إضافة ألياف الحلفاء ذات الأبعاد (16×4×4) cm.

نسبة الإضافة %	كمية الجبس (g)	كمية الماء (g)
0	290	170.31
1	287.1	170.31
2	284.2	170.31
3	281.3	170.31

ولضمان تجانس الخلطات، قُطعت ألياف الحلفاء ميكانيكيًا إلى طول ثابت قدره 2 cm (الشكل **(8-III)**)، ثم خُلِطت تدريجيًا مع الجبس والماء وفق المقادير المحددة مسبقًا، مع الحرص على تحقيق توزيع منتظم للألياف داخل المزيج. بعد ذلك صُبَّت الخلطات داخل القوالب المجهزة مسبقًا، ثم تُركت العينات لتجف في الهواء الطلق إلى غاية التصلب الأولي.

الشكل(8-III): ألياف الحلفاء بطول 2 cm.

كما يبين الشكل **(9-III)** مختلف مراحل تحضير العينات الجبسية المدعمة بألياف الحلفاء، حيث تم إعداد أربع أنواع من الخلطات بنسب إضافات مختلفة، وإن لكل نسبة 04 عينات متماثلة (بإجمالي 16 عينة اختبار).

الشكل(III-9): مراحل تحضير عينات الجبس بـ ثلاث نسب مختلفة.

III-2-3- تحضير العينات في المرحلة الثانية

III-2-3-1- القسم الأول

قمنا بصب عينات أخرى من جبس منطقة الفولية الصناعي بأبعاد cm (1×5×7) مع الالتزام بنفس نسب الإضافة الثلاثة المعتمدة سابقاً من ألياف الحلفاء. تم تحضير ستة (06) عينات لكل نسبة وزنية، وذلك بهدف دراسة تأثير إضافة ألياف الحلفاء على الناقلية الحرارية للجبس (أنظرالجدول **(III-4)**).

الجدول(III-4): المقادير الوزنية لمكونات عينات ذات الأبعاد cm (1×5×7).

نسبة الإضافة %	كمية الجبس (g)	كمية الماء (g)
0	49	28.77
1	48.51	28.77
2	48.02	28.77
3	47.53	28.77

كما يبين الشكل **(III-10)** مختلف مراحل تحضير العينات المستعملة في هذه الدراسة.

الشكل(III-10): مراحل تحضير العينات الجبسية المدعمة بألياف الحلفاء والمستعملة في الاختبارات الحرارية.

III-3-2-2- القسم الثاني

تم تحضير مجموعة إضافية من العينات الجبسية باستعمال وردة الصحراء (اللوس) كمادة مضافة ثانية، وذلك بهدف إجراء دراسة مقارنة بينها وبين ألياف الحلفاء من حيث تأثيرهما على الخصائص الحرارية للجبس، خاصة الناقلية الحرارية.

وقد تم اعتماد نفس أبعاد القوالب المستعملة سابقا cm (1×5×7)، من أجل ضمان توحيد الظروف التجريبية وتحقيق مقارنة دقيقة بين مختلف الخلطات، حيث يوضح الشكل **(III-11)** طريقة تحضير هذه العينات الجبسية.

1- حبيبات وردة الصحراء المستعملة | 2- وضع الخلطة الجبسية مضاف إليها وردة الصحراء داخل القالب | 3- عينات جبسية مضاف إليها وردة الصحراء

الشكل(III-11): مراحل تحضير وتجفيف العينات الجبسية المدعمة بوردة الصحراء والمستعملة في الدراسة الحرارية.

III-4- اختبار خواص العينات الميكانيكية (الانحناء والضغط)

خضعت العينات لفترة تجفيف أولية مدتها 15 يوماً، إلا أن التجارب الأولية لم تظهر استقراراً كافياً في النتائج، مما استدعى تمديد فترة الجفاف لضمان الوصول إلى الحالة الميكانيكية المثالية. وبناءً عليه، تم إجراء الاختبارات النهائية بعد مرور 28 يوماً من التجفيف المستمر لضمان استقرار البنية الدقيقة للعينات وتحقيق نتائج دقيقة.

وقد تم استخدام آلة اختبار الضغط والشد (Compression Testing Machine) وفقاً للمعايير المعتمدة، حيث خضعت كل خلطة لتجربتين دقيقتين لتحديد خصائصها الميكانيكية، شملت اختبار إجهاد الانحناء واختبار الضغط.

III-4-1- اختبار إجهاد الانحناء

اعتمدت الدراسة على اختبار الانحناء لتقييم الخواص الميكانيكية للعينات الجبسية، وذلك عبر تسليط قوى انحناء مركزية متزايدة. تم تثبيت العينات بدقة متناهية على جهاز الاختبار الميكانيكي، حيث تم تطبيق قوة عمودية متزايدة (F) حتى الوصول إلى نقطة الانكسار (الشكل **(III-12)**).

الشكل(III-12): آلة اختبار الانحناء.

ويسمح هذا الاختبار بدراسة سلوك العينات تحت تأثير الإجهادات الميكانيكية، إضافة إلى تقييم تأثير ألياف الحلفاء على مقاومة الجبس للإنحناء والكسر.

III-4-2- اختبار الضغط

نظراً لطبيعة تجربة الانحناء التي أدت إلى انقسام العينات إلى جزئين، تم الاحتفاظ بأحد الأجزاء الناتجة عن الكسر لإخضاعه لاختبار الضغط، وذلك بهدف الاستفادة من نفس العينة في تقييم الخصائص الميكانيكية.

وضعت هذه الأجزاء المتبقية في جهاز الضغط (Compression Testing Machine)، حيث طُبقت عليها قوى ضغط تصاعدية بانتظام حتى بلوغ لحظة الانهيار. وتم تسجيل "القيمة القصوى للقوة" التي تعد مؤشراً لتقييم صلابة الخلطات الجبسية وقدرتها على تحمل الإجهادات الانضغاطية.

الشكل(III-13): آلة اختبار الضغط.

ويلخص الجدول **(5-III)** نتائج اختبار الانحناء من حيث إجهاد الإنحناء وقوة الكسر، بينما يلخص الجدول **(6-III)** نتائج اختبار الضغط من حيث مقاومة العينات للإجهادات الانضغاطية.

الجدول(5-III): نتائج اختبار الانحناء.

اسم العينة	ترميز العينة	القوة (KN)	اجهاد الانحناء (MPa)
جبس+ماء	GS_1	0.4	0.84
	GS_2	0.4	1.05
	GS_3	0.5	1.2
جبس + ماء + 1% حلفاء	$G1_1$	0.4	1.05
	$G1_2$	0.5	1.2
	$G1_3$	0.5	1.2
جبس + ماء + 2% حلفاء	$G2_1$	0.4	1.05
	$G2_2$	0.7	1.58
	$G2_3$	0.4	0.98
جبس + ماء + 3% حلفاء	$G3_1$	1	2.26
	$G3_2$	0.6	1.51
	$G3_3$	0.7	1.58

الجدول(6-III): نتائج اختبار الضغط.

اسم العينة	ترميز العينة	القوة (KN)	الضغط (MPa)
جبس+ماء	GS_1	1.2	0.74
	GS_2	1.1	0.68
	GS_3	1.4	0.86
جبس + ماء + 1% حلفاء	$G1_1$	1.3	0.82
	$G1_2$	1.3	0.78
	$G1_3$	1.4	0.86
جبس + ماء + 2% حلفاء	$G2_1$	1.9	1.16
	$G2_2$	2.1	1.3
	$G2_3$	1.6	1
جبس + ماء + 3% حلفاء	$G3_1$	0.8	5.02
	$G3_2$	3.1	1.95
	$G3_3$	3.5	2.21

III-4-3- مناقشة نتائج تجربتي الانحناء والضغط

III-4-3-1- مناقشة نتائج تجربة الانحناء

لقد أظهرت عينة الجبس الممزوجة بالماء مقاومة ضعيفة للانحناء، مما يدل على أن قدرة الجبس على تحمل قوى الكسر منخفضة.

كما أظهرت النتائج أن تدعيم خليط الجبس بنسبة 1% من ألياف الحلفاء لم يحقق تحسناً ملموساً في مقاومة الانحناء مقارنة بالخلطة المرجعية، ويعود ذلك إلى أن الكمية المُضافة من الحلفاء كانت قليلة، مما يشير إلى ثبات الخصائص الميكانيكية للجبس.

في حيث إن إضافة 2% من ألياف الحلفاء (أي ضعف كمية النسبة 1%) أدت إلى تحسين قدرة الجبس على تحمل قوة الكسر مقارنة بالنسبة 1%، مما عزز الترابط بين جزيئات الجبس، وبالتالي تحسنت الخصائص الميكانيكية مقارنة بالخلطة المرجعية.

أما عند إضافة نسبة 3% من ألياف الحلفاء، فقد تحسّنت قدرة الجبس على تحمل الكسر بدرجة كبيرة، مقارنة بالخلطة المرجعية وكذلك مقارنة بباقي النسب الأخرى (1% و2%)، مما جعل هذه النسبة تظهر كأفضل نسبة من حيث مقاومة الانحناء.

واستناداً إلى ما سبق، نستخلص أن عند إضافة الحلفاء بنسب مختلفة، تبين أن كلما زادت نسبة الإضافة، تحسن الأداء الميكانيكي للمادة المركبة من حيث الصلابة والقوة، وزادت قدرتها على تحمل الكسر ومقاومة الانحناء.

III-4-3-2- مناقشة نتائج تجربة الضغط

تظهر عينة الجبس بدون إضافات قوة ترابط ضعيفة مقارنة ببعض العينات الأخرى.وتُستخدم هذه العينة كمرجع أساسي لقياس تأثير الإضافات الأخرى.

إن إضافة الحلفاء بنسبة 1% لم يؤثر على الخواص الميكانيكية، أي أن نتائجها مشابهة لنتائج العينة المرجعية (الجبس والماء فقط).

كما أن إضافة 2% من ألياف الحلفاء أدت إلى تحسن ملحوظ في مقاومة الضغط مقارنة بالخلطة المرجعية والخلطة المحتوية على 1% حلفاء. هذا التحسين في الترابط بين جزيئات الجبس أدى إلى ارتفاع قيم مقاومة الضغط بشكل واضح مقارنة بالعينات الأخرى.

في حين تُعد إضافة الحلفاء بنسبة 3% من أفضل الإضافات المدروسة، إذ تحتوي على أعلى نسبة من ألياف الحلفاء مقارنة بباقي العينات، مما ساهم في تحسين تماسك البنية الداخلية للجبس وزيادة قدرته على تحمّل الإجهادات. وقد أظهرت هذه النسبة أفضل مقاومة للضغط، بفضل دور الألياف في تقليل التشققات وتعزيز الترابط داخل المادة

وبالتالي فيمكن أن نستنتج أن إضافة ألياف الحلفاء تؤثر بشكل إيجابي على الخواص الميكانيكية للجبس، حيث يزداد تأثيرها تدريجيًا بزيادة النسبة المضافة. فالعينة المرجعية (الجبس والماء) أظهرت مقاومة ضعيفة نسبيًا، بينما لم تُحدث إضافة 1% تحسنًا واضحًا. في المقابل، ساهمت إضافتا 2% و3% في تحسين مقاومة

الضغط بشكل ملحوظ نتيجة تعزيز تماسك البنية الداخلية وتقليل التشققات، وكانت إضافة 3% الأفضل أداءً بين جميع العينات المدروسة.

III-5- تجربة قياس التوصيل الحراري (قياس الناقلية الحرارية)

تم قياس الناقلية الحرارية للعينات المحضرة التي تشمل: عينات الجبس المعزز بألياف الحلفاء، وعينات مضافة إليها وردة الصحراء، حيث يهدف هذا الاختبار إلى مقارنة تأثير هذه الإضافات الطبيعية على الخصائص الحرارية للمادة الأساسية.

وأُجري القياس عند درجة حرارة الغرفة (18°C)، وقد تم تكرار القياس مرتين (02) لكل عينة (الشكل **(14-III)**)، ولضمان الموثوقية والدقة الإحصائية.

1- تنظيف مسبار التدفق الحراري بعد كل استعمال، لضمان دقة القياسات وسلامة تحضير العينات.

2- وضع مسبار التدفق الحراري بين سطحين مستويين للعينة.

3- عرض النتائج على برنامج الحاسوب المرتبط بالجهاز.

4- صورة مقربة لشاشة الحاسوب الموصول بالجهاز.

الشكل(III-14): تجربة قياس الناقلية الحرارية باستخدام جهاز THB.

يقدم الجدول **(7-III)** القيم التجريبية الخاصة بالناقلية الحرارية المقاسة بواسطة جهاز THB، وذلك لمختلف العينات المدروسة. وتشمل هذه العينات الجبس بدون إضافات (GS) والجبس المدعم بألياف الحلفاء بنسب مختلفة 1% (G1)، 2% (G2) و3% (G3)، بالإضافة إلى العينات المحتوية على وردة الصحراء (GL).

تم تسجيل القيم الحرارية لكل عينة خلال تجربتين متتاليتين (اختبار 01 واختبار 02)، مع حساب فرق درجة الحرارة (ΔT1) و(ΔT2) والقيمة المتوسطة لكل حالة.

الجدول(III-7): قيم الناقلية الحرارية لجبس الفولية (بدون وبوجود إضافات).

اسم العينة	اختبار 01	ΔT1	اختبار 02	ΔT2	القيمة المتوسطة
GL_1+GL_2	0.2781	3.8118	0.2892	3.8015	0.28365
GL_3+GL_4	0.2807	3.3745	0.2858	3.3627	0.28325
GS_5+GS_6	0.3409	3.9963	0.3403	3.8163	0.3406
GS_7+GS_8	0.4292	1.9068	0.3687	2.3613	0.39895
$G1_5+G1_6$	0.2756	3.3624	0.2716	3.2715	0.2736
$G1_7+G1_8$	0.2472	3.9413	0.2513	3.857	0.2436
$G2_5+G2_8$	0.271685	2.381	0.272003	2.2253	0.27184
$G2_9+G2_{10}$	0.3485	2.9096	0.2711	3.9151	0.3098
$G3_6+G3_7$	0.2423	2.4474	0.2392	2.3078	0.24075
$G3_5+G3_{10}$	0.3355	2.1998	0.3071	2.4328	0.3213

III-5-1- مناقشة نتائج تجربة قياس التوصيل الحراري

- أدت جميع الإضافات المدروسة، والمتمثلة في وردة الصحراء وألياف الحلفاء بمختلف نسبها، إلى تحسين أداء العزل الحراري مقارنة بالجبس غير المدعم.
- أظهرت ألياف الحلفاء أعلى فعالية في تحسين العزل الحراري، خاصة عند نسبة إضافة 3%، حيث سجلت أفضل أداء عازل بين جميع العينات المدروسة.
- ساهمت إضافة وردة الصحراء في تحسين تجانس الخلطة الجبسية نتيجة تقارب طبيعتها المعدنية مع الجبس، مما انعكس على استقرار القيم المقاسة.

اذا فاستنادا إلى النتائج المتحصل عليها، تعد إضافة ألياف الحلفاء بنسبة 3% أفضل تعديل لتحسين الأداء العازل حراريا لجبس الفولية، حيث حققت أدنى قيمة للناقلية الحرارية مقارنة بالعينة المرجعية وبالعينات المحتوية على وردة الصحراء أو نسب الحلفاء الأقل (1% و2%).

III-6- دراسة تغير الكتلة إثر التعرض للرطوبة

III-6-1- نتائج تجربة الرطوبة

أُجريت هذه التجربة لتقييم قدرة العينات على امتصاص الرطوبة، وهو مؤشر اساسي لتحديد مدى استدامة المادة ومقاومتها للظروف البيئية والرطوبة. وقد نُفذت التجربة وفق الخطوات المنهجية التالية:

1) **تجفيف العينات:** وُضعت كافة العينات في الهواء الطلق لمدة 35 يوماً، وذلك بهدف إزالة الجزء الأكبر من الرطوبة الأولية الموجودة داخلها.

2) **الوزن القبلي (قبل التعرض):** جرى وزن كل عينة مباشرة وتسجيل كتلتها الابتدائية m.

3) **مرحلة التعرض للرطوبة:** وُضعت العينات داخل غرفة ذات رطوبة نسبية (RH =70%) لمدة 24 ساعة متواصلة، وذلك لتمكينها من امتصاص الرطوبة والوصول إلى حالة توازن رطوبي مع الوسط المحيط.

4) **الوزن البعدي (بعد التعرض):** تمت إعادة وزن العينات بعد انتهاء فترة امتصاص الرطوبة وتسجيل الكتلة الجديدة 'm.

A- وزن العينة قبل التعرّض للرطوبة | B- وضع العينات في غرفة الرطوبة | C- وزن العينة بعد التعرّض للرطوبة

الشكل(III-15): مراحل إجراء تجربة الرطوبة.

يتضمن الجدول **(8-III)** القيم الخاصة بكتلة العينات المدروسة قبل وبعد تعرّضها للرطوبة، حيث يبيّن وزن كل عينة قبل التعرّض للرطوبة ووزنها بعد التعرّض بالإضافة إلى الفرق بين الكتلتين والنسبة المئوية للتغيّر في الكتلة الناتجة عن امتصاص الرطوبة أو فقدانها.

الجدول(8-III): قيم كتل العينات قبل وبعد التعرّض للرطوبة مع بيان الفرق والنسبة المئوية للتغيّر في الكتلة.

اسم العينة	وزن قبل التعرض للرطوبة m (g)	وزن بعد التعرض للرطوبة m' (g)	الفرق ΔT=m'-m	النسبة المئوية %
GL_1	37.1668	37.1546	-0.0122	(*)
GL_2	35.9983	35.9785	-0.0198	(*)
GL_3	31.7763	31.7796	0.0033	0.01
GS_1	44.9794	44.9917	0.0123	0.03
GS_2	37.3356	37.34	0.0044	0.01
GS_3	37.8857	37.8984	0.0127	0.03
$G1_1$	41.8019	41.8362	0.0343	0.08
$G1_2$	44.1693	41.1797	-2.9896	(*)
$G1_3$	42.3629	42.3323	-0.0306	(*)
$G1_4$	43.5993	43.6333	0.034	0.08
$G2_1$	44.5106	44.5549	0.0443	0.10
$G2_2$	44.0551	44.1043	0.0492	0.11
$G2_3$	43.6618	43.7069	0.0451	0.10
$G2_4$	44.5235	44.5175	-0.006	(*)
$G3_1$	44.4012	44.3525	-0.0487	(*)
$G3_2$	44.0428	44.0478	0.005	0.01
$G3_3$	44.4195	44.4331	0.0136	0.03
$G3_4$	42.1947	42.1288	-0.0659	(*)

* سُجلت قيم سالبة لبعض العينات نتيجة انفصال أجزاء صغيرة من المادة الجبسية أثناء المناولة أو خلال مراحل التجفيف والتعرض للرطوبة، مما أدى إلى انخفاض الكتلة المقاسة بعد التجربة. لذلك لا تعكس هذه القيم فقدانا فعليا للرطوبة وإنما تعود إلى فقدان مادي جزئي من العينة.

III-2-6- مناقشة تجربة الرطوبة

تُظهر نتائج الجدول **(8-III)** أن جميع العينات المدروسة سجلت تغيرات طفيفة جدا في الكتلة بعد تعريضها لوسط ذي رطوبة نسبية قدرها 70% لمدة 24 ساعة، حيث لم تتجاوز الزيادة في أغلب الحالات 0.11% من الكتلة الابتدائية، وهو ما يدل على أن الجبس المستعمل يتمتع باستقرار مقبول تجاه امتصاص الرطوبة تحت ظروف الاختبار المعتمدة.

بالنسبة للعينة المرجعية المكونة من الجبس فقط، فقد سُجلت تغيرات طفيفة جدا في الكتلة تراوحت بين 0.01% و0.03%، مما يشير إلى أن البنية المتصلبة للجبس تحد من نفاذ بخار الماء إلى داخل المادة خلال مدة التعرض القصيرة نسبيا.

أما العينات المدعمة بألياف الحلفاء فقد أظهرت بوجه عام زيادة أكبر نسبيا في الكتلة مقارنة بالعينة المرجعية، خاصة عند نسب الإضافة 2% و3%. ويمكن تفسير ذلك بالطبيعة الليفية للحلفاء واحتوائها على مركبات سليلوزية ذات قابلية لامتصاص بخار الماء من الوسط المحيط. كما أن وجود الألياف داخل المصفوفة الجبسية قد يؤدي إلى زيادة طفيفة في المسامية الداخلية، مما يوفر مواقع إضافية لاحتجاز الرطوبة.

وقد سُجلت أعلى نسبة تغير في الكتلة لدى بعض العينات المدعمة بنسبة 2% من ألياف الحلفاء، حيث بلغت حوالي 0.11%، وهو ما يشير إلى أن زيادة نسبة الألياف تؤدي إلى ارتفاع طفيف في قابلية امتصاص الرطوبة. ومع ذلك تبقى هذه القيم منخفضة جدا مقارنة بالكتلة الكلية للعينات، مما يدل على أن تأثير الرطوبة يظل محدودا.

أما العينات المحتوية على وردة الصحراء فقد أظهرت تغيرات ضعيفة جدًا في الكتلة، وهي قيم قريبة من تلك المسجلة للعينة المرجعية. ويمكن إرجاع ذلك إلى التشابه التركيبي بينها وبين الجبس، والتي تجعلها أقل قابلية لامتصاص الرطوبة مقارنة بالألياف النباتية، مما يساهم في الحفاظ على تجانس البنية الداخلية للخلطة.

بصفة عامة، تُظهر النتائج أن إضافة ألياف الحلفاء ووردة الصحراء لم تؤدِّ إلى زيادة كبيرة في حساسية الجبس للرطوبة، إذ بقيت جميع قيم التغير في الكتلة منخفضة جدًا. وعليه يمكن اعتبار الخلطات المحضرة مستقرة نسبيًا في الأوساط ذات الرطوبة المتوسطة، مع احتفاظها بالمزايا الحرارية والميكانيكية التي توفرها هذه الإضافات الطبيعية.

III-7- خلاصة الفصل

في هذا الفصل، تم الانتقال من الجانب النظري إلى الجانب التطبيقي من خلال إجراء مجموعة من التجارب المخبرية على عينات من الجبس المحضر، بهدف دراسة تأثير بعض الإضافات الطبيعية المحلية على الخصائص الميكانيكية والحرارية للمادة وسلوك المادة تجاه الرطوبة. وقد استُخدمت عينات من جبس منطقة الفولية نظرا لتوفره محليا وخصائصه التي تجعله مادة واعدة للتطوير والتحسين في مجال مواد البناء.

ولتحقيق أهداف الدراسة، تم في البداية إجراء تحاليل بنيوية وكيميائية على الجبس المستعمل باستعمال تقنيتي انعراج الأشعة السينية (XRD) وفلورة الأشعة السينية (XRF)، مما سمح بالتعرف على طبيعته البلورية وتركيبه الكيميائي. كما تم تحسين نتائج الانعراج بطريقة ريتفالد، والتي أظهرت أن العينة المدروسة تتكون أساسا من أطوار مختلفة لكبريتات الكالسيوم مع سيادة طور الأنهيدريت الناتج عن المعالجة الحرارية.

كما شملت الدراسة تدعيم الجبس بألياف الحلفاء باعتبارها الإضافة الرئيسية للدراسة، مع استعمال وردة الصحراء كإضافة طبيعية للمقارنة. وتم اختيار هذه المواد نظرا لتوفرها محليا، وقابليتها للتحلل الحيوي، وكونها مواد صديقة للبيئة ومنخفضة التكلفة، مما يجعلها مناسبة للاستعمال في مجال البناء المستدام وتقليل الأثر البيئي.

وقد تم تحضير عينات الجبس بإضافة الحلفاء بثلاث نسب مختلفة وهي 1%، 2% و3%، وذلك بهدف دراسة تأثير تغير نسبة الإضافة على خصائص الجبس، حيث أُخضعت هذه العينات لسلسلة من الاختبارات الميكانيكية والحرارية شملت اختبارات الانحناء والضغط والتوصيل الحراري والرطوبة، من أجل تقييم تأثير الإضافات الطبيعية على خصائص الجبس.

وأظهرت النتائج أن الخصائص الميكانيكية والحرارية للجبس تتأثر بنسبة الإضافة، حيث أظهرت العينات المدعمة بنسبة 3% أداءً متميزا، خاصة فيما يتعلق بالعزل الحراري، مقارنة بباقي العينات والعينة المرجعية المكونة من الجبس فقط.

كما ساهمت إضافة الحلفاء في تحسين بعض الخصائص الميكانيكية للجبس وتقليل التذبذب الحراري، مما يبرز فعالية هذه المادة كعازل طبيعي يمكن الاستفادة منه في تطوير مواد بناء أكثر كفاءة واستدامة. وتؤكد النتائج المتحصل عليها أهمية استغلال الموارد الطبيعية المحلية في تحسين أداء الجبس والحصول على مواد بناء ذات خصائص محسنة وتكلفة منخفضة.

قائمة مراجع الفصل الثالث

❖ المراجع الأجنبية

[1] M. Bortolotti, L. Lutterotti and I. Lonardelli, ReX: a computer program for structural analysis using powder diffraction data, J. Appl. Cryst. (2009). 42, 538-539.

الخاتمة العامة

خاتمة عامة

تندرج هذه الدراسة ضمن إطار تثمين الموارد الطبيعية المحلية وتطوير مواد بناء مستدامة ذات خصائص محسنة، من خلال دراسة تأثير بعض الإضافات الطبيعية المتوفرة محليا على خواص الجبس المستخرج من منطقة الفولية بولاية الوادي. وقد سمحت الدراسة النظرية بفهم طبيعة الجبس وخصائصه الفيزيائية والكيميائية والبنيوية، كما أبرزت أهمية المواد الطبيعية المتمثلة في ألياف الحلفاء، باعتبارها مواد واعدة يمكن توظيفها لتحسين أداء مواد البناء التقليدية مع الحفاظ على الطابع البيئي والاقتصادي للمادة.

كما تم خلال الجانب النظري استعراض أهم تقنيات التوصيف والتحليل المستعملة في دراسة المواد، وخاصة تقنيتي انعراج الأشعة السينية (XRD) وفلورية الأشعة السينية (XRF)، بالإضافة إلى أهم الاختبارات الميكانيكية والحرارية المعتمدة لتقييم أداء المواد المركبة، مما وفر أساسا علميا لفهم النتائج التجريبية وتفسيرها.

لقد أظهرت نتائج التحاليل البنيوية والكيميائية أن الجبس المدروس يتكون من عدة أطوار لكبريتات الكالسيوم بدرجات إماهة مختلفة، حيث بيّن تحليل XRD المحسن بطريقة ريتفالد سيادة طور الأنهيدريت ($CaSO_4$)إلى جانب وجود الجبس المميه والباسانيت وبعض الأطوار الانتقالية، وهو ما يعكس تأثير المعالجة الحرارية على البنية البلورية للمادة. كما أكد تحليل XRF أن التركيب الكيميائي للعينة يهيمن عليه أكسيد الكالسيوم وأكسيد الكبريت، وهما المكونان الرئيسيان للجبس.

كما بينت النتائج التجريبية أن إضافة ألياف الحلفاء تؤثر إيجابيا على الخواص الميكانيكية والحرارية للجبس. فقد سجلت العينات المدعمة تحسنا تدريجيا في مقاومة الانحناء والضغط مع زيادة نسبة الإضافة، حيث حققت العينات المحتوية على 3% من ألياف الحلفاء أفضل أداء ميكانيكي مقارنة بالعينة المرجعية وباقي النسب المدروسة. ويُعزى ذلك إلى الدور الذي تلعبه الألياف في تعزيز الترابط الداخلي للمادة والحد من انتشار التشققات.

أما من الناحية الحرارية، فقد أظهرت النتائج انخفاضا ملحوظا في الناقلية الحرارية للعينات المدعمة، مما يدل على تحسن قدرتها على العزل الحراري. وقد سجلت إضافة 3% من ألياف الحلفاء أفضل النتائج، الأمر الذي يؤكد فعالية هذه الألياف الطبيعية كعامل تدعيم وعزل حراري في الوقت نفسه. كما أظهرت العينات المحتوية على وردة الصحراء وهي احد مكونات البناء المحلي قديما تحسنا مقبولا في الخصائص الحرارية مع احتفاظها بتجانس جيد داخل المصفوفة الجبسية.

و بخصوص مقاومة الرطوبة، فقد بينت النتائج أن جميع العينات المدروسة أظهرت تغيرات طفيفة جدا في الكتلة بعد التعرض للرطوبة، مما يدل على استقرار مقبول للخلطات المحضرة وعدم تأثرها بشكل كبير في ظروف الرطوبة المتوسطة.

وعموما، تؤكد هذه الدراسة إمكانية الاستفادة من ألياف الحلفاء كمضافات طبيعية منخفضة التكلفة وصديقة للبيئة لتحسين خصائص الجبس المحلي. كما تُبرز النتائج أن إضافة 3% من ألياف الحلفاء تمثل النسبة الأكثر ملائمة ضمن المجال المدروس، نظرا لما حققته من توازن بين تحسين الخواص الميكانيكية وتعزيز العزل الحراري.

وتفتح هذه النتائج آفاقا مستقبلية لدراسة تأثير نسب إضافية من الألياف، ومعالجة ألياف الحلفاء بطرق مختلفة لتحسين توافقها مع المصفوفة الجبسية، إضافة إلى دراسة المتانة طويلة الأمد وسلوك هذه المواد في ظروف الخدمة الحقيقية، بما يساهم في تطوير مواد بناء محلية أكثر كفاءة واستدامة، ويعزز من تثمين الموارد الطبيعية المتوفرة في البيئة الجزائرية واستغلالها في تطبيقات البناء والعزل الحراري.

وعلى ضوء النتائج المتحصل عليها خلال هذه الدراسة، يمكن تقديم التوصيات التالية:

1. اعتماد ألياف الحلفاء كمادة تدعيم طبيعية للجبس لما أظهرته من قدرة على تحسين الخواص الميكانيكية والحرارية، خاصة عند نسبة إضافة 3%.
2. تشجيع استغلال الموارد الطبيعية المحلية، مثل الحلفاء وغيرها، في تطوير مواد بناء صديقة للبيئة ومنخفضة التكلفة.
3. دراسة تأثير نسب إضافية من ألياف الحلفاء تتجاوز 3% من أجل تحديد النسبة المثلى بدقة أكبر وتقييم حدود التحسين الممكنة.
4. دراسة تأثير أطوال مختلفة لألياف الحلفاء ومعالجة سطحها بطرق فيزيائية أو كيميائية لتحسين التماسك بينها وبين المصفوفة الجبسية.
5. إجراء اختبارات إضافية تتعلق بالمتانة طويلة الأمد، مثل مقاومة التآكل، ودورات الترطيب والتجفيف، ومقاومة العوامل المناخية المختلفة.
6. دراسة تأثير إضافة الحلفاء على خصائص أخرى للجبس، مثل مقاومة الحريق والعزل الصوتي والكثافة الظاهرية.
7. توسيع الدراسة لتشمل خلطات تجمع بين ألياف الحلفاء ووردة الصحراء في الوقت نفسه، من أجل الاستفادة من المزايا التي توفرها كل مادة على حدة.
8. العمل على تطوير ألواح أو عناصر بناء جبسية مدعمة بالمواد الطبيعية المحلية وإجراء تقييم تطبيقي لأدائها في ظروف الاستعمال الحقيقية.
9. تشجيع تثمين مخلفات النباتات الصحراوية والموارد المعدنية المحلية في مجال مواد البناء المستدامة بما يساهم في تقليل التكلفة والأثر البيئي.

قائمة الملاحق

قائمة الملاحق

الملحق (A): نتائج قياس كتلة العينات في الهواء الطلق خلال فترات زمنية مختلفة.

اسم العينة	وزن في اليوم 3	وزن في اليوم 7	وزن في اليوم 28
GS_5	43.92	43.06	43.03
GS_6	41.41	40.98	40.97
GS_7	53.91	51.04	51.01
GS_8	46.41	44.03	43.99
GS_9	48.93	46.10	46.07
GS_{10}	46.78	43.55	43.52
$G1_5$	53.48	42.11	42.03
$G1_6$	55.53	44.24	44.16
$G1_7$	51.13	42.34	42.29
$G1_8$	54.24	43.55	43.50
$G1_9$	55.83	45.21	45.15
$G1_{10}$	52.38	43.62	43.55
$G2_5$	58.94	44.58	44.53
$G2_6$	59.98	41.15	40.98
$G2_7$	56.96	43.40	43.34
$G2_8$	58.21	44.07	44.01
$G2_9$	55.86	43.72	43.64
$G2_{10}$	57.33	44.53	44.47
$G3_5$	58.33	44.50	44.43
$G3_6$	62.74	45.47	45.35
$G3_7$	60.74	44.42	44.33
$G3_8$	60.31	43.40	43.30
$G3_9$	55.91	43.44	43.35
$G3_{10}$	61.25	44.60	44.50

الملحق (B): نتائج قياس الكتل لعينات الجبس المدعمة بوردة الرمال خلال فترات زمنية مختلفة.

اسم العينة	وزن في اليوم 01	وزن في اليوم 12	وزن في اليوم 21
GL_1	59.06	42.70	42.41
GL_2	60.42	43.23	43.14
GL_3	58.27	44.16	44.08
GL_4	56.10	41.90	41.85
GL_5	57.64	41.87	41.82
GL_6	62.51	42.68	42.58

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الخواص الميكانيكية والحرارية للجبس المستخرج من منطقة الفُولية بولاية الوادي، وذلك من خلال تدعيمه بإضافات طبيعية محلية بهدف تطوير أدائه واستعماله في مجال البناء. وقد تم توصيف العينات باستعمال تقنية انعراج الأشعة السينية (XRD)، وفلورة الأشعة السينية (XRF)، حيث أظهرت النتائج أن الجبس المدروس يتكون من عدة أطوار لكبريتات الكالسيوم، مع سيادة طور الأنهيدريت ($CaSO_4$) بنسبة بلغت 62.7%.

اعتمد الجانب التجريبي على خلط الجبس بثلاثة نسب مختلفة من الحلفاء (1%، 2%، 3%)، إضافة إلى عينات تحتوي على وردة الصحراء استُعملت لأغراض المقارنة، من أجل دراسة تأثير هذه الإضافات على الخواص الميكانيكية والحرارية. وقد أظهرت نتائج اختبار الانحناء أن العينة المرجعية (جبس فقط) سجلت أدنى قيمة بلغت 0.84 MPa ، بينما حققت العينة المدعمة بـ 3% من الحلفاء أعلى قيمة قدرت بـ 2.26 MPa ، مما يدل على تحسن واضح في مقاومة الانحناء.

أما بالنسبة لاختبار الضغط، فقد سجلت العينة المرجعية أدنى قيمة بلغت 0.68 MPa ، في حين سجلت العينة المدعمة بـ 3% من الحلفاء أفضل نتيجة بقيمة وصلت إلى 2.21 MPa ، وهو ما يؤكد فعالية الحلفاء في تحسين مقاومة الجبس وتحمل الإجهادات الميكانيكية.

كما بينت النتائج أن إضافة الياف الحلفاء ساهمت في تحسين العزل الحراري وتقليل الناقلية الحرارية، خاصة عند نسبة 3%، مما يجعل الجبس أكثر ملائمة للاستعمال في تطبيقات العزل والبناء. وتؤكد هذه النتائج أن دمج ألياف الحلفاء كنموذج للإضافات الطبيعية المحلية، يمثل حلاً فعالاً ومستدامًا لتطوير خصائص الجبس وتحسين أدائه في تطبيقات البناء والعزل الحراري.

الكلمات المفتاحية: الجبس، الأنهيدريت، ألياف الحلفاء، مقاومة الضغط، مقاومة الانحناء، العزل الحراري.

Abstract

This study aims to improve the mechanical and thermal properties of gypsum extracted from the El-Fouliya region in El-Oued Province. To achieve this objective, gypsum was reinforced with locally available natural additives in order to enhance its performance and expand its use in the construction sector. The samples were characterized using X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) techniques. The results revealed that the studied gypsum consists of several calcium sulfate phases. Anhydrite ($CaSO_4$) was identified as the dominant phase, with a proportion of 62.7%.

The experimental work was based on incorporating three different percentages of alfa fibers (1%, 2%, and 3%) into the gypsum matrix. The influence of these natural additives on the mechanical and thermal properties of gypsum was then investigated. The flexural strength test showed that the reference sample (gypsum only) exhibited the lowest value of 0.84 MPa, whereas the sample reinforced with 3% alfa fibers (Stipa tenacissima L.) achieved the highest value of 2.26 MPa, indicating a significant improvement in flexural strength.

Regarding the compressive strength test, the reference sample recorded the lowest value of 0.68 MPa, while the gypsum reinforced with 3% alfa fibers reached the highest value of 2.21 MPa. These results confirm the effectiveness of alfa fibers in enhancing the mechanical resistance of gypsum and its ability to withstand applied stresses.

Furthermore, the results demonstrated that the incorporation of alfa fibers improved thermal insulation and reduced thermal conductivity, particularly at the 3% addition level, making gypsum more suitable for insulation and building applications.

These findings confirm that the incorporation of alfa fibers as a locally available natural additive represents an effective and sustainable approach for improving gypsum properties and enhancing its performance in construction and thermal insulation applications.

Key words: Gypsum, Anhydrite, Alfa Fibers, Compressive Strength, Flexural Strength, Thermal Insulation.