الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة قاصدي مرباح – ورقلة
كلية العلوم التطبيقية
قسم الهندسة المدنية والري

مذكرة تخرج لنيل شهادة ماستر مهني

شعبة : الهندسة المدنية

تخصص : دراسة ومراقبة البنايات والطرق

بعنوان

دراسة تأثير إضافة بقايا الطوب على الخصائص الجيوتقنية للتيف

مقدم من طرف :

برني ياسين
حـاجي مـحمد كريـم

أمام اللجنة المتكونة من :

بوعكة وفاء	**أستاذ محاضر "ب"**	**جامعة ورقلة**	**رئيسًا**
بازين ربيعة	**ماجستير**	**مديرية الأشغال العمومية**	**مناقشًا**
بعيكر محمد الشريف	**طالب دكتوراه**	**جامعة ورقلة**	**مؤطرًا**
خلو عبد الرزاق	**أستاذ محاضر "أ"**	**جامعة ورقلة**	**مساعد مؤطر**

الموسم الجامعي: 2024 \ 2025

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

أهدي هذا الجهد المتواضع:

إلى والدايّ العزيزين،

حبّ لا يعرف الحدود وعطاءٌ لا ينقطع،

إلى أساتذتي الكرام الذين أضاءو لي الطريق،

إلى رفقاء الدرب الذين أسعدوا أيام الدراسة،

و إلى كل من ساندني بقلبه أو دعائه.

فإن كان في هذا العمل خير فليشركوا فيه،

وما كان من تقصير فمن نفسي واستغفر الله

برني ياسين

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

أهدي هذا الجهد المتواضع:

إلى والدايّ الكريمين،

حبّ لا ينضب وعطاءٌ لا يتوقف،

إلى أساتذتي الأفاضل الذين نهلت من علمهم،

إلى رفقاء الدرب الذين أسعدوا أيام الدراسة،

وإلى كل من ساندني بقلبه أو دعائه.

فإن كان في هذا العمل خير فليشركوا فيه،

وما كان من تقصير فمن نفسي واستغفر الله

حاجي محمد كريم

شكروعرفان

الحمد لله رب العالمين، الذي منَّ علينا بنعمة العلم والإيمان، وأعاننا على إتمام هذا البحث المتواضع. ونصلي ونسلم على سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم، خير هادٍ إلى طريق الحق والرشاد.

وبعد فإننا نتقدم بأعمق عبارات الامتنان:

لوالدينا الكريمين، ركيزة الحياة ودعامة النجاح، الذين بذلا الغالي والنفيس لمواصلة مسيرتنا العلمية.

للأستاذ الدكتور " **بعيكر محمد الشريف** " الفاضل، ومِّساعده "**خلو عبد الرزاق**"، على توجيهاتهما القيمة وجهودهما التي كانت عونًا أساسيًا في إنجاز هذا العمل.

لأساتذة قسم الهندسة المدنية الأفاضل، على ما قدموه من علم ومعرفة.

إلى مخبر الأشغال العمومية في جنوب البلاد (LTPS) وكذا مخبر الدراسة والمراقبة (LEC) على إستقبالهم ودعمهم ومرافقتهم طوال مدة إنجاز البحث

كل من ساهم ولو بكلمة طيبة أو تشجيع، كان لها أثرٌ في إتمام هذا البحث.

{ وَاشْكُرُوا لِي وَلَا تَكْفُرُونِ }

اللهم تقبل هذا العمل خالصًا لوجهك الكريم، واجعلنا من عبادك الصالحين

ملخص

هذا العمل يندرج في إطار تثمين المواد المحلية وإعادة تدوير النفايات واستخدامها في بناء الطرق، من خلال تحسين بعض الخصائص الجيوتقية و الميكانيكية للتيف عن طريق معالجته بالجير و الإسمنت وإضافة بقايا الطوب.

تم اعتماد اربع خلائط مختلفة (التيف , التيف +15% مسحوق بقايا الطوب , التيف +15% مسحوق بقايا الطوب + 4% جير , التيف +15% مسحوق بقايا الطوب + 4% اسمنت) . تم تعريض هذه الخلائط الى مجموعة من التجارب (خصائص بروكتور, مؤشر CBR , مقاومة القص , مقاومة الضغط البسيط, مقاومة الشد غير المباشر, و دورة الاماهة-تجفيف).حيث أظهرت النتائج تحسن الخصائص الجيوتقنية و الميكانيكية بشكل ملفت عند الخلائط المشكلة من التيف و مسحوق بقايا الطوب مضاف لها الاسمنت تليها تلك المضاف لها الجير .كما بينت النتائج ان اضافة مسحوق بقايا الطوب وحده لا يعطي نتائج مشجعة خصوصا الحساسية الكبيرة تجاه الماء.

الكلمات الأساسية : التيف ، الإسمنت ، الجير ، بقايا مخلفات الطوب ، الخصائص الجيوتقنية و الميكانيكية.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et du recyclage des déchets en vue de leur utilisation dans la construction routière, à travers l'amélioration de certaines propriétés géotechniques et mécaniques du tuf par traitement à la chaux et au ciment, avec l'ajout de déchets de briques.

Quatre mélanges différents ont été adoptés : (tuf seul, tuf + 15 % de poudre de déchets de briques, tuf + 15 % de poudre de déchets de briques + 4 % de chaux, tuf + 15 % de poudre de déchets de briques + 4 % de ciment). Ces mélanges ont été soumis à une série d'essais géotechniques (caractéristiques Proctor, indice CBR, résistance au cisaillement) et mécaniques (résistance à la compression simple, résistance à la traction indirecte, et cycle humidification-séchage).

Les résultats ont montré une amélioration notable des propriétés géotechniques et mécaniques pour les mélanges à base de tuf et de poudre de déchets de briques additionnés de ciment, suivis de ceux traités à la chaux. Les résultats ont également révélé que l'ajout de la poudre de déchets de briques seule ne donne pas des résultats encourageants, notamment en raison de la forte sensibilité à l'eau.

Mots-clés : tuf, ciment, chaux, déchets de briques, propriétés géotechniques et mécaniques.

Abstract

This work falls within the framework of promoting local materials and recycling waste for use in road construction, through the improvement of certain geotechnical and mechanical properties of tuf by treatment with lime and cement, along with the addition of brick waste.

Four different mixtures were adopted: (tuf alone, tuf + 15% brick waste powder, tuf + 15% brick waste powder + 4% lime, tuf + 15% brick waste powder + 4% cement). These mixtures were subjected to a series of geotechnical tests (Proctor characteristics, CBR index, shear strength) and mechanical tests (unconfined compressive strength, indirect tensile strength, and wetting-drying cycles).

The results showed a significant improvement in geotechnical and mechanical properties for the mixtures based on tuf and brick waste powder combined with cement, followed by those treated with lime. The results also revealed that the addition of brick waste powder alone does not yield encouraging results, mainly due to its high sensitivity to water.

Keywords: tuf, cement, lime, brick waste, geotechnical and mechanical propertie

فهرس المحتويات

المقدمة العامة 1

الفصل الأول:
عموميات حول مواد الدراسة

I-1 عموميات حول التيف..... 3
I-1-1 مقدمة 3
I-1-2 تعريف التيف..... 3
I-1-3 مناطق تواجد التيف حول العالم..... 4
I-1-4 أنواع التيف 4
I-2 الإضافات المعدنية 5
I-2-1 إستخدام الإضافات المعدنية في الهندسة المدنية..... 5
I-3 عموميات حول مخلفات الطوب 6
I-3-1 تعريف المخلفات..... 6
I-3-2 أنواع المخلفات..... 6
I-3-3 المخلفات المستخدمة في الهندسة المدنية..... 6
I-3-4 اهمية استخدام مخلفات الطوب في الهندسة المدنية 7
I-4 عموميات حول الجير..... 8
I-4-1 تعريف الجير 8
I-4-2 أنواع الجير 8
I-5 عموميات حول الإسمنت..... 10
I-5-1 تعريف الإسمنت 10
I -5-1 أنواع الإسمنت 10
I-6 الخاتمة 12

الفصل الثاني:
خصائص المواد المستخدمة

II -1 مقدمة 14
II -2 المواد المستعملة 14
II-2-1 تحديد خصائص مادة التيف 14
II-2-1-1 التحليل الكيميائي 14
II-2-1-2 التحليل الحبيبي 15
II-2-1-3 اختبار بروكتور المعدل (NF P 94-093) 16
II-2-1-4 اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا CBR (NF P 94-078) 17
II-2-1-5 اختبار الضغط البسيط (ASTM D2166 / D2166M-16) 21
II-2-1-6 اختبار أزرق الميثيلين (NF P 94-068) 22
II-2-2 خصائص مخلفات الطوب 23
II-2-2-1 التحليل الكيميائي 23
II-2-2-2 الكتلة الحجمية الظاهرية لمسحوق بقايا الطوب (NF P 18-554) [15] 24
II-2-2-3 الكتلة الحجمية المطلقة لمسحوق بقايا الطوب (NF P 18-301) [16] 25
II-2-3 خصائص الجير المستعمل 26
II-2-4 خصائص الاسمنت المستعمل 26
II-3 الخاتمة 27

الفصل الثالث:
النتائج والتفسيرات

III -1 مقدمة 29
III -2 منهجية الدراسة التجريبية 29
III-3- دراسة الخصائص الجيوتقنية 30
III-3-1 تأثير مختلف الاضافات على خصائص بروكتور 30
III-3-2 تأثير مختلف الاضافات على مؤشر CBR 31
III-3-3 تأثير مختلف الاضافات على مقاومة القص المباشر (cisaillement directe) 34
III-4 دراسة الاداء الميكانيكي 36
III-4-1 مقاومة الضغط البسيط 36

III-4-2 مقاومة الشد 38
III-4-3 دراسة سلوك مختلف الخلطات تحت تأثير دورة الاماهة تجفيف 40
III-4-4 مقارنة الاداء الميكانيكي لمختلف الخلطات في الحالة العادية وفي حالة تعرضها لدورة الاماهة تجفيف. 42
III.5 الخاتمة 43
الخاتمة العامة 44
التوصيات 44
قائمة المراجع 46

قائمة الصور

رقم الصورة	عنوان الصورة	الصفحة
الصورة I.1	صخور التيف	16
الصورة I.2	التيف الجيري	18
الصورة I.3	التيف الجيري-الجبسي	18
الصورة I.4	التيف الجبسي	18
الصورة I.5	مخلفات الطوب في المصنع.....	20
الصورة I.6	ماد الجير.....	21
الصورة I.7	الجير الحي.....	22
الصورة I.8	الجير المطفأ.....	22
الصورة I.9	مادة الإسمنت.....	23
الصورة I.10	اسمنت بورتالندي عادي.....	24
الصورة I.11	اسمنت بورتالندي سريع التصلب.....	24
الصورة I.12	اسمنت مقاوم للأملاح.....	24
الصورة II.1	التجارب الكيميائية على التيف.....	27
الصورة II.2	تجربة التدرج الحبيبي.....	28
الصورة II.3	تجربة بروكتور المعدل.....	29
الصورة II.4	تجربة الضغط البسيط.....	34
الصورة II.5	اختبار أزرق الميثيلين.....	35
الصورة II.6	التحليل الكيميائي لمخلفات الطوب.....	36
الصورة II.7	تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية على مسحوق الطوب.....	37
الصورة II.8	تجربة الكتلة الحجمية المطلقة على مسحوق الطوب.....	38
الصورة III.1	تجربة القص المباشر.....	47
الصورة III.2	ضاغطة هيدروليكية.....	49
الصورة III.3	عينة للضغط البسيط.....	49
الصورة III.4	جهاز التكسير.....	49
الصورة III.5	عينة خاصة بتجربة الشد غير المباشر.....	51
الصورة III.6	عينة اثناء التكسير.....	51
الصورة III.7	تجربة الاماهة تجفيف -A.العينات داخل الماء -B . العينات خارج الماء.....	53

قائمة الجداول

رقم الجدول	عنوان الجدول	الصفحة
الجدول II.1	نتائج التحليل الكيميائي للتيف.....	27
الجدول II.2	نتائج التدرج الحبيبي للتيف	28
الجدول II.3	نتائج CBR المشبع للتيف	31
الجدول II.4	نتائج اختبار CBR الفوري للتيف	32
الجدول II.5	مقترحات المواصفات للجزائر من قبل ستروبيو وعلول (Alloul & Struillou 1984)....	33
الجدول II.6	نتائج اختبار الضغط البسيط.....	34
الجدول II.7	تصنيف التربة حسب قيم VBS.....	35
الجدول II.8	نتائج التحليل الكيميائي لمخلفات الطوب	36
الجدول II.9	نتائج تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية لمسحوق الطوب	37
الجدول II.10	نتائج تجربة الكتلة الحجمية المطلقة لمسحوق الطوب	38
الجدول II.11	الخصائص الفيزيائية والكيميائية لجير السعيدة	39
الجدول II.12	خصائص الاسمنت المستعمل.....	40
الجدول III.1	الخلطات المعتمدة في الدراسة التجريبية.....	42
الجدول III.2	نتائج تجربة القص المباشر.....	48

قائمة الأشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
الشكل II.1	منحنى التدرج الحبيبي للتيف.....	29
الشكل II.2	منحنى المحتوى المائي الأمثل للتيف.....	30
الشكل II.3	منحنى CBR المشبع للتيف.....	31
الشكل II.4	منحنى CBR الفوري للتيف.....	32
الشكل II.5	مقاومة الضغط البسيط للتيف عند مختلف نسب الدمك.....	34
الشكل III.1	منحنى بروكتور المعدل لمختلف الخلطات.....	43
الشكل III.2	قيم CBR الفوري لمختلف الخلطات.....	44
الشكل III.3	قيم CBR بعد الغمر.....	45
الشكل III.4	مقارنة قيم CBR الفوري و المشبع لمختلف الخلطات.....	46
الشكل III.5	قيم التماسك لمختلف الخلطات.....	48
الشكل III.6	قيم زاوية االحتكاك الداخلي لمختلف الخلطات.....	48
الشكل III.7	تطور مقاومة الضغط بدلالة الزمن لمختلف الخلطات.....	50
الشكل III.8	تطور مقاومة الشد لمختلف الخلطات بدلالة الزمن.....	52
الشكل III.9	مقاومة الضغط البسيط لدورة الإماهة تجفيف.....	54
الشكل III.10	مقاومة الضغط البسيط في الحالة العادية وفي حالة دورة الإماهة تجفيف.....	55

قائمة المصطلحات

M كتلة العينة.

V حجم العينة.

δ_a الكتلة الحجمية الظاهرية.

δ_{abs} الكتلة الحجمية المطلقة.

W_{opm} محتوى الماء الامثل.

W تركيز الماء المعبّر عنه بالنسبة المئوية.

γ_d الكثافة الجافة المثلى لاختبار بروكتور المعدل.

Rc مقاومة الضغط.

Rt مقاومة الشد.

$ICBR$ مؤشر قدرة تحمل كاليفورنيا Californian Bearing Ratio.

V_{BS} قيمة أزرق الميثيلين.

C تماسك التربة.

φ زاوية الإحتكاك الداخلي للتربة.

المقدمة العامة

يُعد استغلال المواد المحلية وإعادة تدوير النفايات الصناعية من المجالات البحثية البارزة، نظرًا لدورها في تقديم حلول فعالة للتحديات الاقتصادية والبيئية.

في ولاية ورقلة (جنوب شرق الجزائر)، تتوفر كميات كبيرة من التيف كأحد الموارد الطبيعية، حيث يتم استخدامه في مجال الطرق بشكل محدود نظرا لضعف ضعف خصائصه الجيوتقنية و الميكانيكية نسبيًا. من جهة أخرى، تنتج مصانع الطوب (الياجور) المنتشرة في المنطقة كميات هائلة من النفايات والمخلفات التي غالبًا ما يتم التخلص منها في البيئة دون معالجة.

تهدف هذه الدراسة إلى الجمع بين هذين المادتين (التيف ومخلفات الطوب) كحل بديل للاعتماد المفرط على المواد التقليدية مثل الحصى المسحوق، مع تحسين الأداء الجيوتقني و الميكانيكي للتيف. كما تسعى إلى تعزيز استغلال المواد المحلية وإعادة تدوير النفايات الصناعية، مع التركيز على تحسين مقاومة الضغط والشد البسيط، وتقليل الحساسية تجاه الماء في الخليط الناتج، مما يجعله مناسبًا للاستخدام في انشاء الطرق في المناطق الرطبة.

تنقسم هذه المذكرة إلى ثلاثة فصول رئيسية:

- **الفصل الأول** يستعرض نظرة عامة عن المواد المسخدمة (التيف , مخلفات الطوب , الجير , الإسمنت)
- **الفصل الثاني** يدرس الخصائص الجيوتقنية والكيميائية للمواد المستخدمة في الخليط.
- **الفصل الثالث** يُحلل نتائج التجارب المتعلقة بالأداء الجيوتقني و الميكانيكي للخلطات المختلفة ويقدم تفسيرات لها.

يختتم العمل بخاتمة تلخص النتائج وتقدم توصيات لتطوير وتعزيز استخدام هذه المواد في المستقبل.

الفصل الأول

عموميات حول مواد الدراسة

I-1 عموميات حول التيف

I-1-1 مقدمة

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الخصائص الجيوتقنية لصخور التيف باستخدام مواد معالجة مُحددة، وقد تم تقسيم هذا الفصل إلى أربعة أقسام رئيسية :

القسم الأول : يستعرض لمحة عامة عن صخور التيف، تعريفها، المناطق التي تتواجد فيها، والأنواع المختلفة لها.

القسم الثاني : يُقدم نظرة شاملة عن بقايا الطوب، تعريفها، أنواعها، وتطبيقاتها في مجال الهندسة المدنية.

القسم الثالث : يتناول الجير من حيث التعريف الأساسي له وأنواعه المُختلفة.

القسم الرابع : يُوضح الإسمنت، تعريفه، وأبرز أنواعه المستخدمة.

I-1-2 تعريف التيف

يُعرف التيف (Tuf) بأنه صخر بركاني فتاتي ناتج عن تراكم وتصلب المواد المقذوفة أثناء الثورانات البركانية، مثل الرماد البركاني والفتات الصخري. يتميز هذا الصخر ببنية مسامية ووزن خفيف، مما يجعله ذا خصائص جيوتقنية تحتاج غالباً إلى تحسين عند استخدامه في مشاريع الطرق، مثل تعزيز مقاومته وقدرته على تحمل الأحمال. نظراً لتواجده في مناطق النشاط البركاني السابق، يُعد التيف مادة متاحة محلياً في بعض المناطق، لكن تطبيقه في طبقات الطرق (كطبقة أساس أو تحت الأساس) يتطلب معالجة مسبقة بإضافات مثل الجير أو الإسمنت لزيادة تماسكه وقوته. تُسهم هذه المعالجة في جعله مناسباً للاستخدام في الإنشاءات الطرقية، خاصةً عند دمجه مع مواد رابطة أخرى لتحسين أدائه تحت الضغوط المرورية والظروف البيئية المختلفة.**[1]**

الصورة I.1 صخور التيف

I-1-3 مناطق تواجد التيف في الجزائر

يُعد صخر التيف (Tuf) من الصخور المنتشرة في الجزائر، حيث يتواجد العديد من المناطق:
في شمال شرق البلاد، تبرز منطقة الأوراس (ولايتي باتنة وخنشلة) كأهم مواقع تواجد التيف، حيث يُستغل تقليدياً في البناء نظراً لخواصه العازلة. أما في وسط الجزائر، فتتميز الهضاب العليا (خاصة ولايتي سطيف ومسيلة) بوجود تكوينات من هذا الصخر البركاني المسامي. بينما في الجنوب، نجد تواجداً محدوداً للتيف في بعض النقاط الصحراوية (ورقلة وبسكرة والأغواط)، حيث يشكل تكوينات جيولوجية فريدة.
تختلف خصائص التيف الجزائري من منطقة لأخرى، حيث يتميز في الأوراس بكثافة متوسطة وألوان فاتحة، بينما يأخذ في المناطق الصحراوية أشكالاً أكثر مسامية. ورغم هذه التوزعات الجغرافية، يبقى استغلال التيف في الجزائر محدوداً مقارنة بإمكاناته الحقيقية، ويعود ذلك أساساً لندرة الدراسات التفصيلية حول خصائصه وتطبيقاته العملية في مختلف المجالات. **[2]**

I-1-4 أنواع التيف

يمكن تصنيف التيف إلى ثلاث فئات رئيسية بناءً على تركيبته الكيميائية وخصائصه الجيولوجية:

أ. التيف الجيري(الكلسي)

يتكون التيف الجيري أساساً من كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) ، وينشأ من ترسب المواد الجيرية على شكل مسحوق أو حبيبات كروية. يتشكل هذا النوع عبر عمليات التحجر والتراكم التدريجي، حيث يحل محل التربة أو الصخور المتآكلة. يتميز التيف الجيري بصلابة عالية وينتشر في المناطق ذات النشاط المائي الغني بالكالسيوم.

ب. التيف الجبسي

يظهر التيف الجبسي خصائص مشابهة للحجر الجيري لكنه يتكون أساساً من كبريتات الكالسيوم المائية ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). يتواجد هذا النوع بكثرة في المناطق الجافة حيث تكون معدلات الأمطار منخفضة. غالباً ما يرتبط وجوده بالتكوينات الجيولوجية القديمة (خاصةً العصر الطباشيري)، ويتميز بانخفاض ملحوظ في درجة الصلابة مقارنة بالتيف الجيري.

ج. التيف الجيري-الجبسي

يمثل هذا النوع تكويناً انتقالياً بين النوعين السابقين، حيث يظهر في المناطق شبه الرطبة وشبه القاحلة. تتوقف عملية تطوره عند انخفاض معدلات الأمطار بشكل كافٍ لمنع إذابة المواد الجيرية ونقلها إلى المياه الجوفية. في المناخات الصحراوية، تميل القشور الجبسية إلى استبدال القشور الجيرية، بينما في المناخات شبه الجافة يصبح الجبس غير

مستقر بسبب قابليته العالية للذوبان، مما يؤدي إلى تشكل طبقات مختلطة من الجير والجبس.هذا التصنيف يعكس التفاعل المعقد بين العوامل الجيوكيميائية والظروف المناخية في تشكيل الأنواع المختلفة من التيف. **[3]**

الصورة I.2 التيف الجيري

الصورة I.3 التيف الجيري-الجبسي

الصورة I.4 التيف الجبسي

I-2 الإضافات المعدنية

تتنوّع الإضافات المعدنيّة المستخدمة في الصناعة، مثل الرماد المتطاير، وخبث الفرن العالي المحبب (الناتج عن إنتاج الحديد)، وأبخرة السيليكا، والبوزولان، وغيرها. تحتوي هذه المواد أساسًا على سيليكا غير متبلورة، تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم في وجود الماء لتُكوّن مركّبات مائيّة عبر تفاعلٍ مُطلقٍ للطاقة، شرط أن يكون مستوى الطاقة الحرة الأوليّة مرتفعًا بما يكفي لتحقيق نظامٍ أكثر استقرارًا ذي خصائص هيدروليكيّة.

وتُوجد هذه الإضافات إما كمواد طبيعيّة تحتاج إلى معالجة بسيطة، أو كنفايات صناعيّة، أو كمنتجاتٍ ثانويّة لعمليات التصنيع. تُضاف هذه المواد إلى خليط المواد الخام قبل الطحن، أو إلى الدقيق الخام، أو حتى إلى الكلنكر البورتلاندي (قبل أو بعد الطحن)، مع اختلاف نسبتها في الكتلة حسب الهدف المنشود والدور الوظيفيّ المطلوب.

وتجدر الإشارة إلى أن الإضافات المعدنيّة المُحدّدة بدقّة هي فقط ما يضمن الاستغلال الأمثل لخصائصها وفوائدها. **[4]**

I-2-1 إستخدام الإضافات المعدنية في الهندسة المدنية

يُعدّ استخدام الإضافات المعدنية في صناعة الأسمنت خيارًا ذا كفاءة عالية، حيث يُسهم في خفض تكاليف استهلاك الكلنكر بشكل ملحوظ عند إضافتها بنسب مدروسة. والجدير بالذكر أن الكلنكر "الذي يُنتج عبر معالجة المواد الخام كالطين والحجر الجيري تحت درجات حرارة مرتفعة" يتطلب كميات هائلة من الطاقة، مما يجعل الاستعانة بهذه الإضافات حلاً عملياً لتقليل الهدر الطاقي والاقتصادي.

ومن أبرز مزايا التفاعل البوزولاني كفاءته في توظيف مواد منخفضة التكلفة مع ضمان متانة استثنائية، وهو سر نجاح الأسمنت الروماني الذي حافظ على متانة المنشآت لأكثر من ألفي عام. كما تبرز اليوم المخلفات الصناعية كالرماد المتطاير وأبخرة السيليكا كخيارات مستدامة، حيث تُحوّل الدول الصناعية هذه النفايات إلى موارد قيمة في عمليات التصنيع.

أما البوزولانات الطبيعية، فهي تُستخدم مباشرة دون الحاجة إلى طحن أو معالجة حرارية مسبقة، مما يزيد من جدواها الاقتصادية. ولا تزال دول مثل الصين واليونان وإيطاليا والهند والمكسيك تعتمد بشكل كبير على ملايين الأطنان من هذه المواد في صناعة الأسمنت، مستفيدةً من وفرة مواردها الطبيعية وخواصها الفريدة. **[5]**

I-3 عموميات حول مخلفات الطوب

I-3-1 تعريف المخلفات

تُعرف المخلفات بأنها مواد ثانوية ناتجة عن الأنشطة البشرية والصناعية أصبحت غير صالحة للاستخدام المباشر أو فقدت قيمتها الأصلية. تتنوع بين صلبة (كبقايا الطعام، المعادن)، وسائلة (كمياه الصرف، الزيوت)، وغازية (كانبعاثات المصانع). ورغم تصنيفها كنفايات إلا أن العديد منها يحوي قيمة كامنة يمكن استغلالها عبر إعادة التدوير والتحويل، مثل استخلاص المعادن الثمينة من النفايات الإلكترونية أو استخدام المخلفات الصناعية في مواد البناء، مما يجعل إدارتها السليمة ركيزة أساسية للاقتصاد الدائري والاستدامة البيئية. **[6]**

I-3-2 أنواع المخلفات

- **المخلفات الصناعية :** مثل الرماد المتطاير، خبث الأفران، أو أبخرة السيليكا.
- **المخلفات الزراعية :** كبقايا المحاصيل والقش.
- **المخلفات البلدية :** مثل النفايات المنزلية والمواد البلاستيكية.
- **المخلفات الخطرة :** كالمواد الكيميائية أو الإلكترونية الضارة**[7]**

I-3-3 المخلفات المستخدمة في الهندسة المدنية

في الهندسة المدنية، تُعرف المخلفات بأنها المواد الثانوية الناتجة عن عمليات التشييد والهدم والتصنيع التي تفقد قيمتها الإنشائية المباشرة أو تتطلب معالجة قبل إعادة استخدامها. وتشمل:

أ. مخلفات البناء والهدم

- الخرسانة المسحوقة، الطوب، الأسفلت، الأخشاب، المعادن. والتي تمثل 30-40% من إجمالي النفايات الصلبة في الدول الصناعية.

ب. المخلفات الصناعية المرتبطة بالإنشاءات

- الرماد المتطاير، خبث الأفران، غبار السيليكا. التي تُستخدم كبدائل جزئية للإسمنت أو المواد الخام.

ج. مخلفات عمليات الحفر

- التربة الصخرية، المواد الحفرية غير الصالحة للردم المباشر.

الصورة I.5 مخلفات الطوب في المصنع

I-3-4 اهمية استخدام مخلفات الطوب في الهندسة المدنية

- تقلل من تكاليف التشييد عند استخدامها كمواد بديلة.
- يمكن إعادة تدوير جزء كبير من مخلفات البناء في المشاريع المستدامة.

I-4 عموميات حول الجير

I-4-1 تعريف الجير

الصورة I.6 مادة الجير

الجير هو مسحوق أبيض يُنتج عن طريق تسخين الحجر الجيري في درجات حرارة عالية. استُخدم منذ العصور القديمة في البناء وصناعات أخرى نظرًا لخصائصه الفريدة.
كيميائيًا، يتكون أساسًا من أكسيد الكالسيوم، وقد يحتوي على كميات متفاوتة من أكسيد المغنيسيوم حسب نوع الحجر الجيري المستخدم.
وتختلف تسمية "الجير" حسب طريقة تحضيره واستخدامه **[8]**

I-4-2 أنواع الجير

هناك عدة عوامل تتحكم في نوع الجير منها طبيعة الحجر الجيري المستخدم، درجة حرارة التسخين، وكذلك إضافة الماء ومن أبرز أنواعه:

أ. الجير الحي (CaO):

يُعرف الجير الحي (أكسيد الكالسيوم - CaO) باسم "الجير الكاوي"، وهو نتاج حرق الحجر الجيري (كربونات الكالسيوم) في درجات حرارة مرتفعة تصل إلى 900-1100°م خلال عملية التكليس. يتميز هذا النوع من الجير بتركيبة غير متبلورة ونشاط كيميائي عالٍ، حيث يمتاز بقدرته الفائقة على امتصاص الرطوبة من الجو، مما يجعله مادة شديدة التفاعل. يُعتبر الجير الحي من أكثر أنواع الجير توافراً واقتصادية، كما يلعب دوراً محورياً في العديد من التطبيقات الصناعية نظراً لخصائصه القلوية القوية. تظهر أهميته بشكل خاص في العمليات الصناعية الكبرى، حيث يُستخدم كمادة خام أساسية في عدة صناعات تحويلية.

- **استخدامات الجير الحي**

- صناعة الإسمنت والملاط في أعمال البناء.
- تحسين جودة التربة الحمضية في المجال الزراعي.
- يدخل في عمليات إنتاج الصلب والورق صناعياً.
- يستخدم لتنقية المياه ومعالجة مياه الصرف الصحي.

- يساهم في التخلص من المواد الضارة والشوائب بسرعة.
- يستعمل في بعض الأحيان لتعقيم وتطهير الأسطح.

ب. الجير المطفأ $Ca(OH)_2$

هو مسحوق أبيض نقي يُحضّر عن طريق تفاعل الجير الحي مع الماء في عملية كيميائية تسمى "التطفئة"، والتي يصاحبها ارتفاع في درجة الحرارة. يتميز هذا النوع من الجير بقوامه الناعم وخصائصه الرابطة، مما يجعله مادة مثالية للعديد من التطبيقات الإنشائية.

- **استخدامات الجير المطفأ**

- صناعة الملاط لربط الطوب أو الحجارة في أعمال البناء.
- أعمال التجصيص (التبييض والتشطيب).
- يستعمل كمادة رابطة مساعدة للإسمنت. **[8]**

الصورة I.7 الجير الحي

الصورة I.8 الجير المطفأ

I-5 عموميات حول الإسمنت

I-5-1 تعريف الإسمنت

الصورة I.9 مادة الإسمنت

الإسمنت هو مادة رابطة هيدروليكية تتصلب عند تفاعلها مع الماء، تُستخدم في البناء والهندسة لربط المواد الأخرى مثل الرمل والحصى، مما يُكوّن الخرسانة أو المونة. ويتم تحضيره عن طريق خلط الحجر الجيري مع الطين وطحنها ثم تدخل إلى فرن دوار ضخم حيث تتعرض لدرجات حرارة عالية تصل إلى حوالي 1450 درجة مئوية. داخل الفرن، تتحول هذه المواد إلى مادة صلبة تسمى "الكلنكر". بعد التبريد، يُضاف قليل من الجبس إلى الكلنكر لتنظيم سرعة تصلب الإسمنت عند استخدامه، ثم يُطحن الخليط مرة أخرى ليصبح مسحوقاً ناعماً. هذا المسحوق هو الإسمنت الجاهز للاستخدام في البناء، حيث يمزج مع الماء والرمل أو الحصى لصنع الخرسانة أو المونة اللاصقة. تختلف أنواع الإسمنت باختلاف نسب المواد الخام أو بإضافة مواد أخرى لتحسين خصائصه. **[8]**

I -5-1 أنواع الإسمنت

يوجد عدة أنواع رئيسية من الإسمنت، تختلف حسب تركيبها الكيميائي وخصائصها واستخداماتها. ومن أهمها:

1 . الإسمنت البورتلاندي العادي

- الاستخدام: الأكثر شيوعاً في البناء العام (الخرسانة، المونة، البلاط).
- الخصائص: يتصلب بسرعة معقولة، ويصل إلى قوة جيدة بعد 28 يومًا.

2 . الإسمنت البورتلاندي سريع التصلب

- الاستخدام: المشاريع التي تحتاج إلى قوة مبكرة، مثل الإصلاحات الطارئة أو صب الأسقف بسرعة.
- الخصائص: يكتسب قوة خلال أيام قليلة.

3. الإسمنت المقاوم للكبريتات

- الاستخدام: المنشآت المعرضة للمياه المالحة أو التربة الغنية بالكبريتات (مثل الأرصفة البحرية أو الأساسات).

- الخصائص: يحتوي على نسبة منخفضة من "ألومينات الكالسيوم" لتجنب التآكل.

4. الإسمنت الأبيض

- الاستخدام: أعمال الديكور، الواجهات، الأرضيات، والمنحوتات.

- الخصائص: نفس خصائص الإسمنت العادي لكن بدون أكاسيد الحديد (لذا لونه أبيض).

5. الإسمنت البوزولاني

- الاستخدام: المنشآت التي تحتاج إلى مقاومة عالية للماء والحرارة (مثل السدود والخزانات).

- الخصائص: يُصنع بإضافة مواد مثل الرماد البركاني أو السليكا، مما يجعله أكثر متانة على المدى الطويل.

6. الإسمنت منخفض الحرارة

- الاستخدام: المشاريع الضخمة مثل السدود الخرسانية حيث يجب تجنب ارتفاع الحرارة أثناء التصلب.

- الخصائص: يتصلب ببطء لتقليل تشقق الخرسانة. **[8]**

الصورة I.10
اسمنت بورتلاندي عادي

الصورة I.11
اسمنت بورتلاندي سريع التصلب

الصورة I.12
اسمنت مقاوم للأملاح

I-6 الخاتمة

في مجال الأشغال العامة، يُعد استغلال الموارد المحلية وإعادة تدوير النفايات من الموضوعات البحثية بالغة الأهمية. في هذا الفصل، تم التركيز على أبرز المواد المحلية المتوفرة في المناطق جافة وشبه الجافة، وهي التيف، بالإضافة إلى بعض المواد المُستخدمة لمعالجتها مثل مخلفات الياجور والجبر والإسمنت.

هذا النهج يسهم في تعزيز الاستدامة البيئية ويدعم التوجه نحو حلول إنشائية أكثر كفاءة وملاءمة للبيئة المحلية.

الفصل الثاني

خصائص المواد المستخدمة

II -1 مقدمة

في هذا الفصل، سنستعرض الخصائص الأساسية للمواد المستخدمة في التجارب، والتي تُعد عاملاً حاسماً في تحديد أدائها وتطبيقاتها. سنغطي خصائص مثل المقاومة الميكانيكية، الطبيعة الكيميائية، الصلابة، وغيرها من الصفات التي تؤثر على اختيار المواد. من خلال فهم هذه الخصائص، يمكن تحليل مدى ملاءمة المواد لمختلف الاستخدامات، مما يسهم في اتخاذ قرارات هندسية وعملية أكثر دقة.

II -2 المواد المستعملة

II-2-1 تحديد خصائص مادة التيف

II-2-1-1 التحليل الكيميائي

يتم إجراء التحليل الكيميائي وفقا للمعايير NF P 15-461, BS 1377 و NF P 94-048 من أجل تحديد المواد الغير قابلة للذوبان و تحديد محتوى الكبريتات و الكربونات و الكلوريدات.

التحليل الكيميائي تم إجراؤه في مخبر الدراسة والمراقبة (LEC) لمدينة ورقلة.

النتائج المتحصل عليها موضحة في الجدول II.1.

الصورة II.1 التجارب الكيميائية على التيف

الجدول II.1 نتائج التحليل الكيميائي للتيف

$CaCo_3$ (%)	Insoluble (%)	Cl^- (mg/L)	$CaSO_4\,2H_2O$ (%)	So_3 (%)	So_4 (mg/kg)
6,27	08,42	0,088	73,23	33,99	40784,61

نتائج التحليل الكيميائي تظهر ان العناصر الغالبة في عينات التيف هي كبريتات الكالسيوم(الجبس) بنسبة 73.23% مما يعني ان التيف قيد الدراسة هو تيف ذو طبيعة جبسية.

II-2-1-2 التحليل الحبيبي (NF P 94-056)

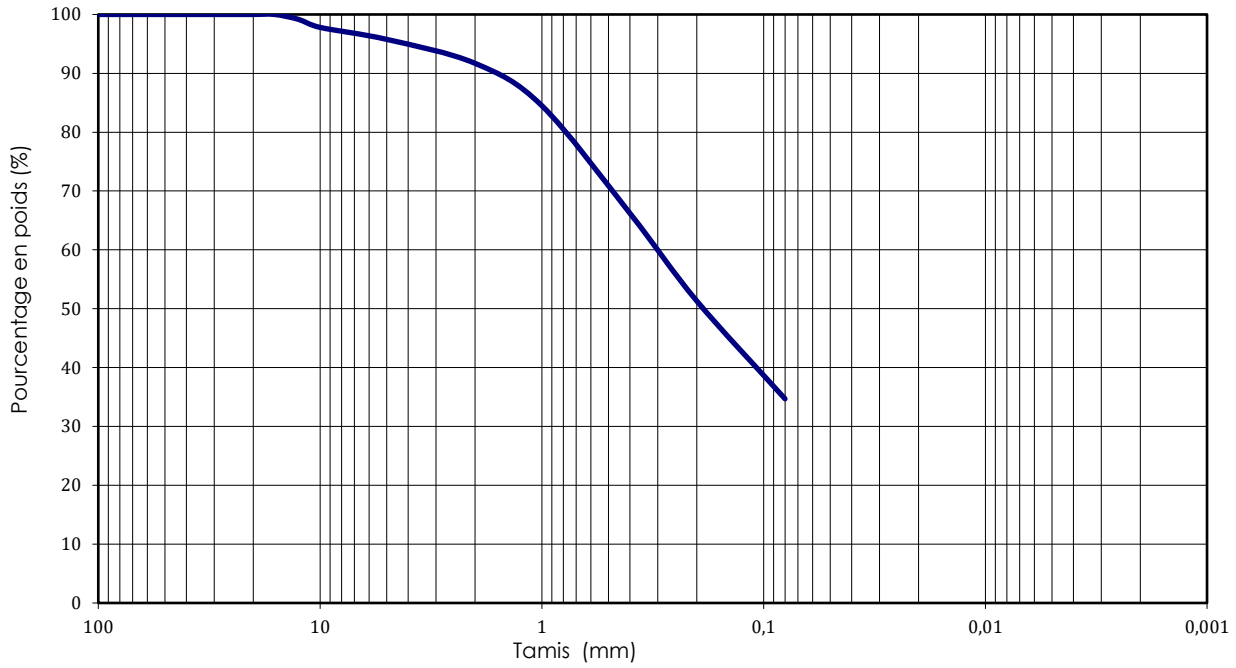
يهدف التحليل الحبيبي إلى دراسة خصائص الحبيبات من خلال تحديد أبعادها والنسب المئوية لكل فئة حجمية. تُستخدم عدة أنظمة لتصنيف التربة، ومن أبرزها النظام الموحد (USCS)، الذي يعتمد على الخصائص الفيزيائية للتربة، بما في ذلك توزيع أحجام الحبيبات. في هذا العمل ، يتم إجراء تجربة التدرج الحبيبي لتحقيق هذا الهدف.
تتم التجربة باستخدام سلسلة من الغرابيل المرتبة تنازليًا حسب حجم الفتحات. توضع العينة المراد تحليلها في أعلى الغرابيل، ثم تُهز الآلة لفرز الحبيبات حسب أحجامها. تتيح هذه الطريقة تحديد كميات ونسب الحبيبات المختلفة في العينة، مما يساهم في فهم التوزيع القطري لحبيبات التربة بدقة. **[9]**

الصورة 2.II تجربة التدرج الحبيبي

نتائج تجربة التحليل الحبيبي على التيف موضحة في الجدول 2.II و الشكل 1.II

الجدول 2.II نتائج التدرج الحبيبي للتيف

tamis (mm)	poids	poids cumulee	% de refus	**% de tamisat**
12.5	8.3	8.3	0.83	**99**
10	13.6	21.9	2.20	**98**
5	20.3	42.2	4.24	**96**
2	40.5	82.7	8.30	**92**
1	71.6	154.3	15.49	**85**
0.4	182.5	336.8	33.81	**66**
0.2	148.2	485	48.69	**51**
0.08	165.6	650.6	65.31	**35**



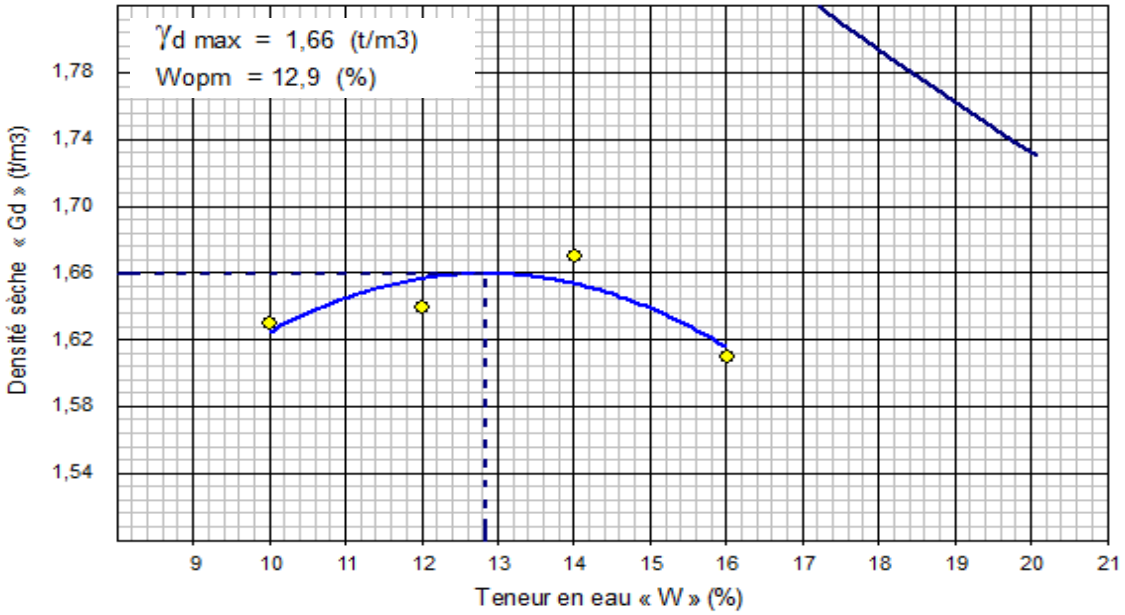
الشكل 1.II منحنى التدرج الحبيبي للتيف

من خلال النتائج المتحصل عليها من تجربة التحليل الحبيبي يتبين ان التيف قيد الدراسة ذو طبيعة حبيبية ناعمة (35% نسبة الحبيبات اقل من 0.08mm).

3-1-2-II اختبار بروكتور المعدل (NF P 94-093)

تعتمد تجربة بروكتور على تحديد العلاقة بين محتوى الرطوبة والكثافة الجافة للتربة للوصول إلى الكثافة الجافة العظمى ومحتوى الرطوبة الأمثل. يتم ذلك عن طريق إعداد عينات تربة بمستويات رطوبة مختلفة، ثم رصها بطريقة قياسية باستخدام مطرقة معيارية في قالب فولاذي. بعد الدمك، تحسب الكثافة الجافة لكل عينة، ثم يرسم منحنى يربط بين الكثافة الجافة ونسبة الرطوبة لتحديد القيم المثلى. تختلف طاقة الدمك بين طريقة بروكتور القياسي والمعدل، حيث يستخدم المعدل طاقة أعلى لتحقيق دمك أفضل للتربة الطينية. تعد هذه التجربة أساسية في ضمان جودة الدمك واستقرار التربة في المشاريع الإنشائية. **[10]**

الصورة 3.II تجربة بروكتور المعدل



الشكل II.2 منحنى المحتوى المائي الأمثل للتيف

المنحنى يسجل هبوط سريع نوعا ما في قيمة الكثافة الجافة و ذالك بعد تجاوز القيمة المثلى للمحتوى المائي مما يعطي انطباع اولي عن حساسية هذا التيف تجاه الماء.

II-1-2-4 اختبار نسبة تحمل كاليفورنيا CBR (NF P 94-078)

يهدف اختبار (California Bearing Ratio) إلى تقييم قدرة تحمل التربة مقارنة بتربة قياسية مرجعية تتكون من مواد حجرية مكسرة ومدمجة. يعتمد مبدأ الاختبار على قياس مقاومة التربة للاختراق باستخدام مكبس قياسي بقطر وسرعة تحميل محددة، وذلك تحت ظروف رطوبة وكثافة معيارية.

تتم مقارنة نتائج اختبار العينة مع قيم التربة القياسية المرجعية لتحديد نسبة تحمل التربة المدروسة. يعد هذا الاختبار أداة أساسية في تقييم خصائص التربة الطبيعية وطبقات الأساس، حيث يوفر معياراً دقيقاً لقدرة تحمل التربة تحت الأحمال المختلفة. **[11]**

أ. **اختبار CBR المشبع**

- التحضير:

تُنقع العينة في الماء لمدة 96 ساعة (4 أيام) قبل الاختبار. **[12]**

يُحاكي تأثير الأمطار أو ارتفاع منسوب المياه الجوفية على التربة.

- النتائج:

يعطي قيم CBR أقل من الاختبار الفوري بسبب تشبع التربة بالماء وضعف مقاومتها.

يُستخدم في التصاميم الهندسية المحافظة لضمان استقرار التربة في أسوأ الظروف.

- التطبيقات:

طبقات الأساس تحت الطرق في المناطق الرطبة.

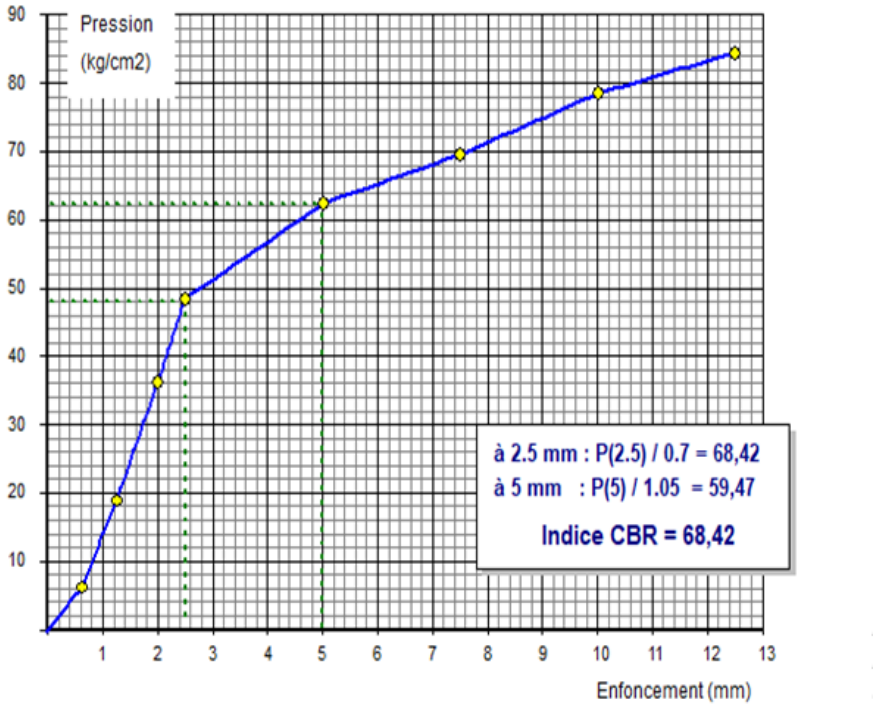
المنشآت المعرضة لتغيرات موسمية في الرطوبة.

الجدول 3.II نتائج CBR المشبع للتيف

Temps	30 s	1 mn	1mn 40s	2 mn	4 mn	6 mn	8 mn	10 mn
Enf (mm)	0,63	1,25	2,00	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50
Lecture	1,20	3,64	6,97	9,31	12,00	13,38	15,10	16,25
Pr(kg/cm2)	6,24	18,92	36,23	48,39	62,37	69,54	78,48	84,46

Coefficient de l'anneau = 102

Surface du piston = 19,625 cm2



الشكل 3.II منحنى CBR المشبع للتيف

ب .اختبار CBR الفوري

- التحضير:

يُجرى على العينة بدون نقع، حيث تُختبر فور دمكها أو في حالتها الطبيعية
يعكس خصائص التربة تحت ظروف الجفاف أو الرطوبة الأولية.

- النتائج:

يعطي قيم CBR أعلى من المشبع لأن التربة غير مشبعة بالماء.
قد لا يعكس الأداء الحقيقي في الظروف الرطبة.

- التطبيقات:

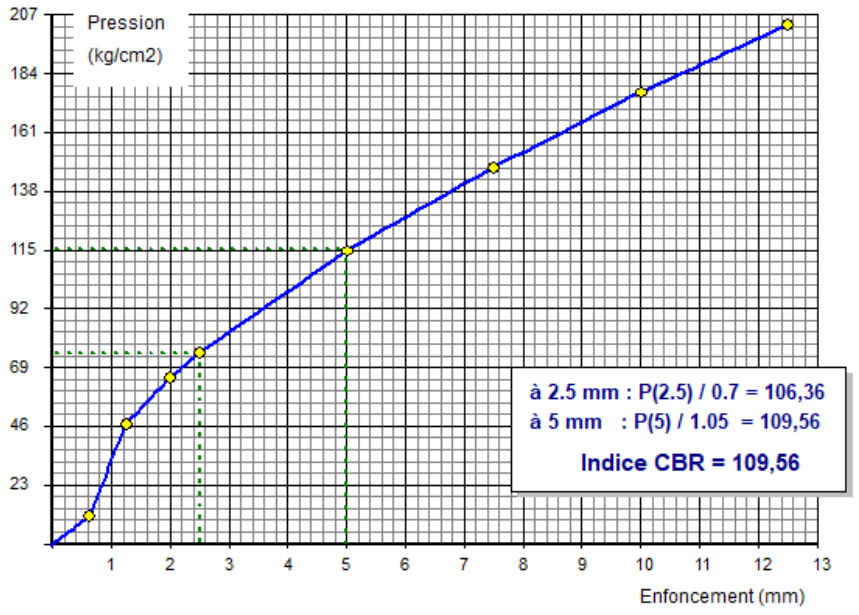
التقييم الأولي للتربة في المناطق الجافة.
مشاريع مؤقتة لا تتأثر بالمياه.

الجدول 4.II نتائج اختبار CBR الفوري

Temps	*30 s*	*1 mn*	*1mn 40s*	*2 mn*	*4 mn*	*6 mn*	*8 mn*	*10 mn*
Enf (mm)	*0,63*	*1,25*	*2,00*	*2,50*	*5,00*	*7,50*	*10,00*	*12,50*
Lecture	*2,07*	*9,03*	*12,53*	*14,40*	*22,07*	*28,36*	*34,01*	*39,11*
Pr(kg/cm2)	*10,76*	*46,93*	*65,12*	*74,84*	*114,71*	*147,40*	*176,77*	*203,27*

Coefficient de l'anneau = 102

Surface du piston = 19,625 cm2



الشكل 4.II منحنى CBR الفوري للتيف

النتائج المتحصل عليها تبين ان قيمة مؤشر الـ CBR الفوري هي 109.56، وهي أعلى من القيمة المطلوبة وفقًا للمواصفات الجزائرية.(انظر الجدول 5.II)

الجدول 5.II مقترحات المواصفات للجزائر من قبل ستروبيو وعلول (Struillou & Alloul)

				poids	lourd	/jour	
			< 130	130 300	300 600	600 1200	> 1200
Zone II sup-humide H=350 à 600 mm de pluie avec bon drainage exigé	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max. sur > 12,5 mm sec	B	100	55	35		
		F	100	100	100	100	100
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	10	10	10	10	10
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% $CaCO_3$ min. sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
	% $CaSO_4$ max .sur < 1 mm	BF	tr	tr	tr	tr	Tr
Zone III semi-aride H= 100 à 350 mm de pluie par an sans exigence-de bon drainage	% < 80 µm max	BF	30	30	30	30	30
	% > 4 mm min	BF	30	30	30	30	30
	% > 12,5 mm min	BF	10	10	10	10	10
	LA max. sur > 12,5 mm sec	B	100	100	55	35	
		F	100	100	100	100	35
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	13	13	13	13	13
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	40	70	80	90	100
	% $CaCO_3$ min. sur < 1 mm	B	70	70	70	70	
		F	60	60	60	60	60
	% $CaSO_4$ max .sur < 1 mm	BF	05	05	05	05	05
Zone IV aride H<100 mm de pluie par an sans exigences de bon drainage	Rc (MPa) min. sur < 5 mm ; (γd = 0,95. γd opm ; 48 h à 55°c)	B	2,5	03	3,5		
		F	1,5	02	2,5	03	3,5
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	16	16	16	16	16
	CBRe à 4 j d'immersion min	BF	30	60	70	80	90
	%($CaCO_3$ + $CaSO_4$) min Sur < 1 mm	B	70	70	70		
		F	60	60	60	60	60
	%NaCL max . sur < 1 mm	BF	03	03	03	03	03

Caractéristiques à viser si possible, en Algérie pour le choix des tufs d'encroûtements, suivant la zone climatique et le trafic prévu.

Tufs d'encroûtement déconseillés ; B : pour couche de Base ; F : pour couche de fondation ; traces ; Rc (Mpa) ; compression simple sur cylindres (5*10 cm) séchés 48 h à 55°c ; Ip indice de plasticité ; granulométrie sous eau après 48h dans l'eau : compactage CBR à 55 cops/couche à W_{opm} puis 4 jours d'immersion ; la Los Angeles sur granulométrie A.

أما قيمة الـ CBR بعد الغمر في الماء لمدة 4 أيام فهي 68.42، وهي أقل بكثير من تلك المحصلة في الـ CBR الفوري، كما أنها أقل من القيمة المطلوبة حسب المواصفات، وهذا ما يؤكد الحساسية العالية لهذا التيف (tuf) تجاه الماء.

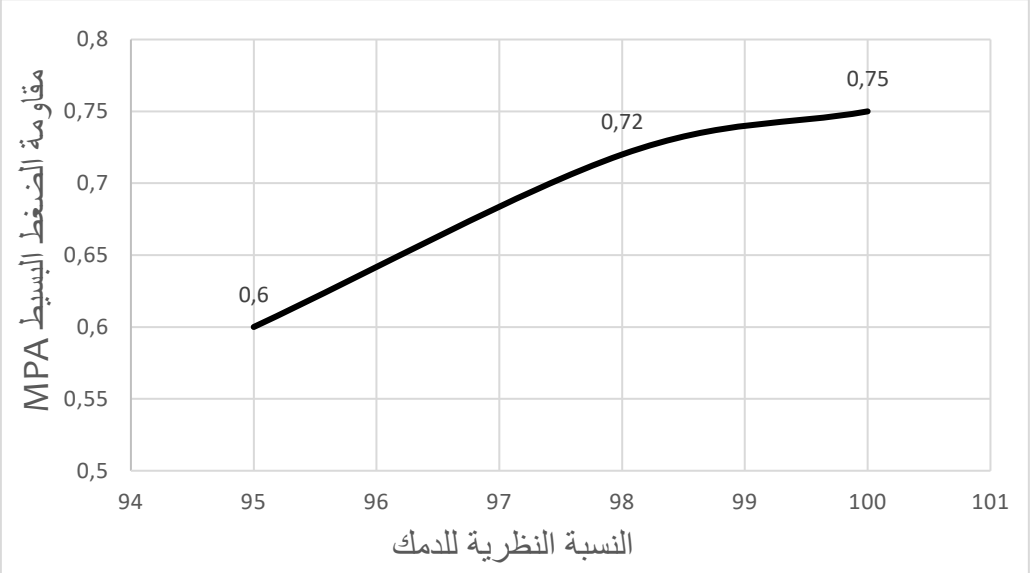
II-2-1-5 اختبارالضغط البسيط (ASTM D2166 / D2166M-16)

اختبار الضغط البسيط هو تجربة معملية تُستخدم لقياس مقاومة التربة للضغط من خلال تعريض عينة قياسية (قطر 5 سم وارتفاع 10 سم) لحمل محوري حتى الانهيار، حيث يتم تحديد قوة التماسك والاحتكاك بين حبيبات التربة، وغالباً ما يُجرى بعد اختبار بروكتور لضمان الظروف المثلى للكثافة والرطوبة، وتُجفف العينات إما في فرن عند 60°م لمدة 48 ساعة أو في الهواء الطلق قبل الاختبار، مما يساهم في تقييم قدرة تحمل التربة لأغراض التصميم الإنشائي. **[13]**

الصورة II.4 تجربة الضغط البسيط

الجدول II.6 نتائج اختبار الضغط البسيط

النسبة النظرية للدمك (%)	100	98	95
مقاومة الضغط البسيط (Mpa)	0.75	0.72	0.60

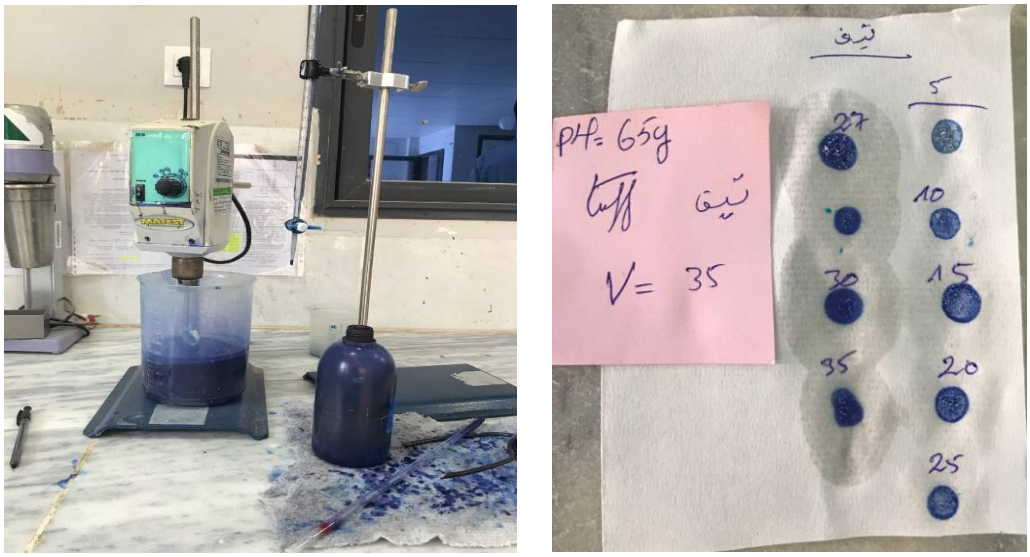


الشكل II.5 مقاومة الضغط البسيط للتيف عند مختلف نسب الدمك

تغيرات قيم مقاومة الضغط البسيط حسب طاقة الدمك ليست ذات دلالة كبيرة ، مما يدل على أن تماسك هذا التيف لا يتطلب طاقة دمك عالية لتحقيقه.و هذا راجع إلى النسبة العالية من الجزيئات الدقيقة التي يحتوي عليها هذا التيف.

II-1-2-6 اختبار أزرق الميثيلين (NF P 94-068)

يُستخدم اختبار أزرق الميثيلين لتحديد نسبة المحتوى الطيني في الرمل والركام والتربة، حيث يعتمد على قياس كمية الجزيئات الطينية الموجودة في العينة. يتم ذلك من خلال تفاعل كيميائي باستخدام صبغة أزرق الميثيلين التي تكشف عن وجود الطين ونسبته في المادة المختبرة. يُعد هذا الاختبار من الوسائل الفعّالة في تحليل مكونات التربة ومواد البناء. **[14]**



الصورة 5.II اختبار أزرق الميثيلين

قيمة أزرق الميثيلين للتيف المستعمل هي: **VBS = 0.50**, وبمقارنة هذه القيمة مع قيم تصنيف التربة (الجدول 7.II) يتبين ان هذا التيف ذو طبيعة لدنة.

الجدول 7.II: تصنيف التربة حسب قيم VBS **[15]**

التربة الرملية	$VBS \leq 0.2$
التربة اللدنة	$0.2 < VBS \leq 2.5$
تربة متوسطة اللدونة	$2.5 < VBS \leq 6$
تربة طينية	$6 < VBS \leq 8$
تربة طينية جداً	$VBS > 8$

II-2-2 خصائص مخلفات الطوب

II-2-2-1 التحليل الكيميائي

الصورة II.6 التحليل الكيميائي لمخلفات الطوب

الجدول II.8 نتائج التحليل الكيميائي لمخلفات الطوب

$CaCo_3$ (%)	Insoluble (%)	Cl^- (mg/L)	$CaSO_4\,2H_2O$ (%)	So_3 (%)	So_4 (mg/kg)
0.83	87.14	0.01	6.02	2.79	3350.02

النتائج تبين أن نفايات الطوب تحتوي على نسبة عالية من العناصر غير قابلة للذوبان(87.14%) وحسب العديد من الدراسات هذه العناصر هي السيليكا (SiO_2). هذه العناصر تعطي لبقايا الطوب خصائص بوزولانية ممتازة عند تفاعلها مع هيدروكسيد الكالسيوم.

هذه الخاصية البوزولانية تسهم بشكل فعّال في تكوين مركبات إسمنتية ثانوية مثل سيليكات الكالسيوم المميهة (C-S-H) التي تُحسن من المقاومة الميكانيكية. **[16]**

II-2-2-2 الكتلة الحجمية الظاهرية لمسحوق بقايا الطوب (NF P 18-554) [17]

خطوات التجربة

- نملئ الوعاء بمسحوق الطوب بواسطة اليد.
- ننزع العينة الزائدة بالمسطرة بحيث لا نترك فراغات على سطح الوعاء
- نقوم بوزن الوعاء + الطوب
- نقوم بإعادة التجربة ثلاث مرات و نسجل النتائج في الجدول.

✓ يتم تحديد هذا الاختبار بالصيغة التالية:

$$Pa = \frac{M}{V}$$

Pa: الكتلة الحجمية الظاهرية

M: كتلة العينة

V: حجم العينة

الصورة 7.II تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية على مسحوق الطوب

الجدول 9.II: نتائج تجربة الكتلة الحجمية الظاهرية لمسحوق الطوب

	رقم التجربة	كتلة العينة M(g)	حجم العينة V(cm^3)	الكتلة الحجمية الظاهرية Pa(g /cm^3)	القيمة المتوسطة (g /cm^3)
مسحوق بقايا الطوب (أقل من 0.08)	1	1212	1000	1.212	1.215
	2	1219	1000	1.219	
	3	1214	1000	1.214	

II-2-2-3 الكتلة الحجمية المطلقة لمسحوق بقايا الطوب (NF P 18-301) [18]

خطوات التجربة

- نقوم بوزن 100g من بقايا الطوب المسحوق.
- نملئ الأنبوب المدرج بالماء إلى غاية V1= 300 ml
- نفرغ ببطئ كمية الياجور في الأنبوب و نقرأ V2
- نقوم بتكرار العملية ثلاث مرات.

يتم تحديده بالصيغة التالية:

$$\mathbf{P_{abs}} = \frac{M}{V2-V1}$$

الصورة II.8 : تجربة الكتلة الحجمية المطلقة على مسحوق الطوب

الجدول II.10: نتائج تجربة الكتلة الحجمية المطلقة لمسحوق الطوب

	رقم التجربة	كتلة العينة M(g)	حجم العينة $V_1(cm^3)$	حجم العينة $V_2(cm^3)$	الكتلة الحجمية المطلقة $Pa(g/cm^3)$	القيمة المتوسطة (g/cm^3)
مسحوق بقايا الطوب (أقل من 0.08)	1	100	300	345	2.222	2.309
	2	100	300	343	2.325	
	3	100	300	342	2.380	

II-2-3 خصائص الجير المستعمل

الجير المستعمل في هذه الدراسة يأتي من مصنع سعيدة, والذي يتميز بتركيز منخفض من عناصر الأكسيد مثل سيليكات SiO_2 والألومنيوم Al_2O_3 وتركيز عال من العناصر الأساسية مثل الجير الحر CaO.
الجدول التالي يلخص الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للجير المستخدم.

الجدول II.11: الخصائص الفيزيائية والكيميائية لجير السعيدة

الخصائص	القيم	الخصائص	القيم
المظهر الفيزيائي	مسحوق أبيض جاف	ثلاثي أكسيد الكبريت **(%)**	< 0,5
الكتلة الحجمية المطلقة **(g/cm^3)**	2.4 ~ 2.2	ثلاثي أكسيد الكبريت **(%)**	0,5 ~ 0,4
الكتلة الحجمية الظاهرية **(g/cm^3)**	0.65 ~ 0.5	ثنائي اكسيد الكربون **(%)**	< 5
مساحة السطح المحددة **(g/cm^2)**	12000 ~ 8000	كربونات الكالسيوم **(%)**	< 10
الجير الحر **(%)**	> 73,3	كثافة النوعية	2
أكسيد المغنيسيوم **(%)**	< 0,5	أكثر من 90 ميكروميتر	< 5
ثلاثي أكسيد الحديد **(%)**	< 2	أكثر من 360 ميكروميتر **(%)**	0
الألومينات **(%)**	< 1,5	مادة غير قابلة قابلة للذوبان **(%)**	< 1
سيليكات **(%)**	< 2,5	الكثافة الظاهرية **(g/l)**	900 ~600

II-2-4 خصائص الاسمنت المستعمل

الإسمنت المستعمل في هذه الدراسة هو CEM II /A-L 42.5 N من مجموعة GICA بعين التوتة (باتنة) وهو إسمنت بور تلاندي بالحجر الكلسي (CPC) مُعتمد وفقًا للمتطلبات والمعايير المعمول بها.
يُستخدم هذا الإسمنت عادةً في أعمال الأساسات، المنشآت، الطرق، وأعمال البناء المختلفة.

الجدول 12.II يلخص مختلف الخصائص الفيزيائية , الميكانيكية و الكيميائية لهذا الاسمنت.

الجدول 12.II: خصائص الاسمنت المستعمل

التركيبة			
مركبات ثانوية	**الكلس**	**الكلينكر**	
5-0	20-6	94-80	النسبة (%)
الخصائص الفيزيائية			
استقرار الاسمنت		بدء التصلب	
$\leq$ **10**		$\geq$ 60	الزمن (دقيقة)
الخصائص الميكانيكية			
عند 28 يوم		عند 2 يوم	
42.5-62.5		$\geq$ 10	مقاومة الضغط (Mpa)
الخصائص الكيميائية			
Cl		So3	
$\leq$ **0. 1**		$\leq$ 3.5	النسبة (%)

3-II الخاتمة

استنادًا إلى النتائج المستخلصة من التجارب الفيزيائية والكيميائية المجراة على مادة التيف، تبيّن أن تركيبه الحبيبي يتكوّن من: 8% من الحصى،52% من الحبيبات الخشنة،35% من الحبيبات الناعمة.

أما التحاليل الكيميائية فقد أظهرت أن التيف يحتوي على نسبة مرتفعة من كبريتات الكالسيوم (73.23%) مما يدل على أن العينة تتكون بشكل رئيسي من حبيبات الجبس .كما سُجلت نسبة 08,42% من المواد غير القابلة للذوبان، مع محتوى منخفض جدًا من الكلوريدات. ووفقًا لقيمة VBS، صُنّف التيف ضمن الترب اللدنة.

من جهة أخرى، كشفت التجارب الكيميائية على مسحوق بقايا الطوب عن امتلاكه خصائص بوزولانية، مما يُعزز قدرته على التفاعل مع التيف، ويُسهم في تكوين مركبات متماسكة تُحسن من الخصائص الميكانيكية والجيوتقنية للتيف.

الفصل الثالث

النتائج والتفسيرات

III -1 مقدمة

يهدف هذا الفصل إلى عرض وتحليل نتائج التجارب المخبرية المنجزة لتقييم الخصائص الميكانيكية والجيوتقنية للتيف, وكذلك التيف المعالج بمسحوق الطوب، الجير، والإسمنت.
تركّز الدراسة على قياس مقاومة الضغط ومقاومة الشد، باعتبارهما مؤشرين أساسيين لمدى جودة المادة وقدرتها على تحمّل الأحمال والتشوهات.

كما يتناول الفصل تأثير مختلف الإضافات على سلوك التيف من الناحية الجيوتقنية، مع إبراز الفروقات في الأداء وبيان مزايا كل نوع من المعالجات.

III -2 منهجية الدراسة التجريبية

من أجل دراسة السلوك الجيوتقني والميكانيكي للتيف الطبيعي والمعالج، تم اعتماد أربع خلطات مختلفة في إطار هذه الدراسة، وذلك بهدف تقييم تأثير كل نوع من المعالجات على خصائص التيف.
تفاصيل هذه الخلطات موضحة في الجدول أدناه. الجدول III -1

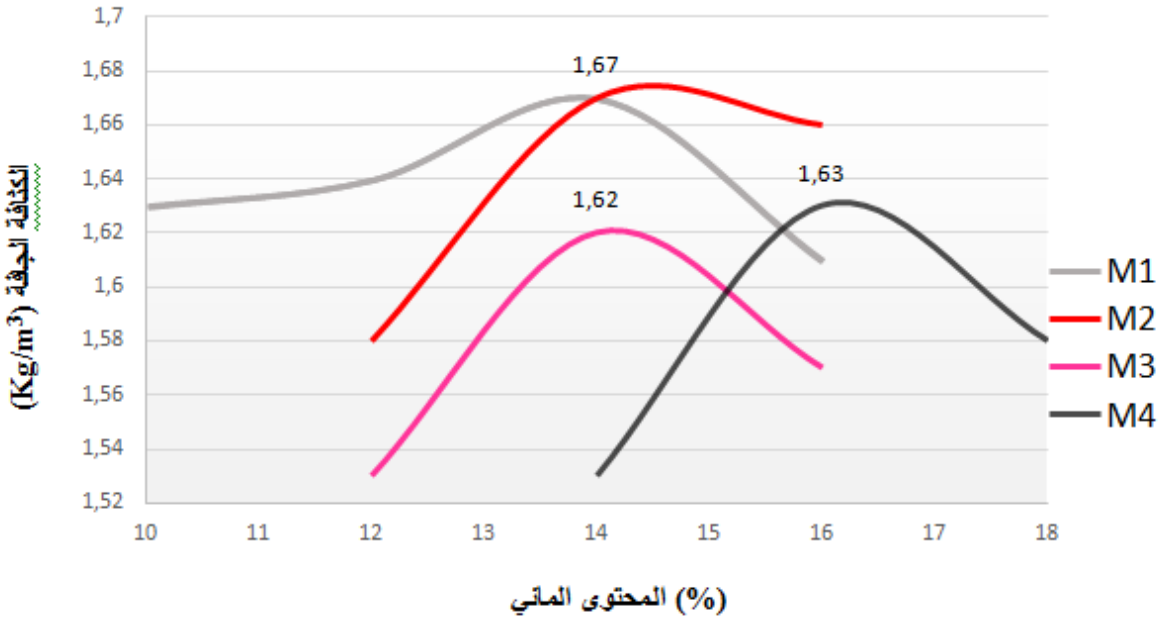
المحتوى	M1	M2	M3	M4
التيف	100%	85%	81%	81%
مخلفات الطوب	0%	15%	15%	15%
الجير	0%	0%	4%	0%
الإسمنت	0%	0%	0%	4%

الجدول III.1 الخلطات المعتمدة في الدراسة التجريبية

III-3- دراسة الخصائص الجيوتقنية

III-3-1 تأثير مختلف الاضافات على خصائص بروكتور.

قمنا في هذه التجربة بتحضير 4 خلطات مختلفة المذكورة في الجدول III-1 و اخضعناها لتجربة بروكتور المعدل من اجل تحديد و مقارنة المحتوى المائي الامثل لكل خليط الموافقة لأعلى كثافة ممكنة.



الشكل III.1 منحنى بروكتور المعدل لمختلف الخلطات

يعرض هذا المنحنى البياني نتائج اختبار بروكتور المعدل لأربعة خلطات مختلفة ، وذلك وفقًا لنسبة المحتوى المائي والكثافة الجافة العظمى.

من خلال المنحنى نلاحظ ان:

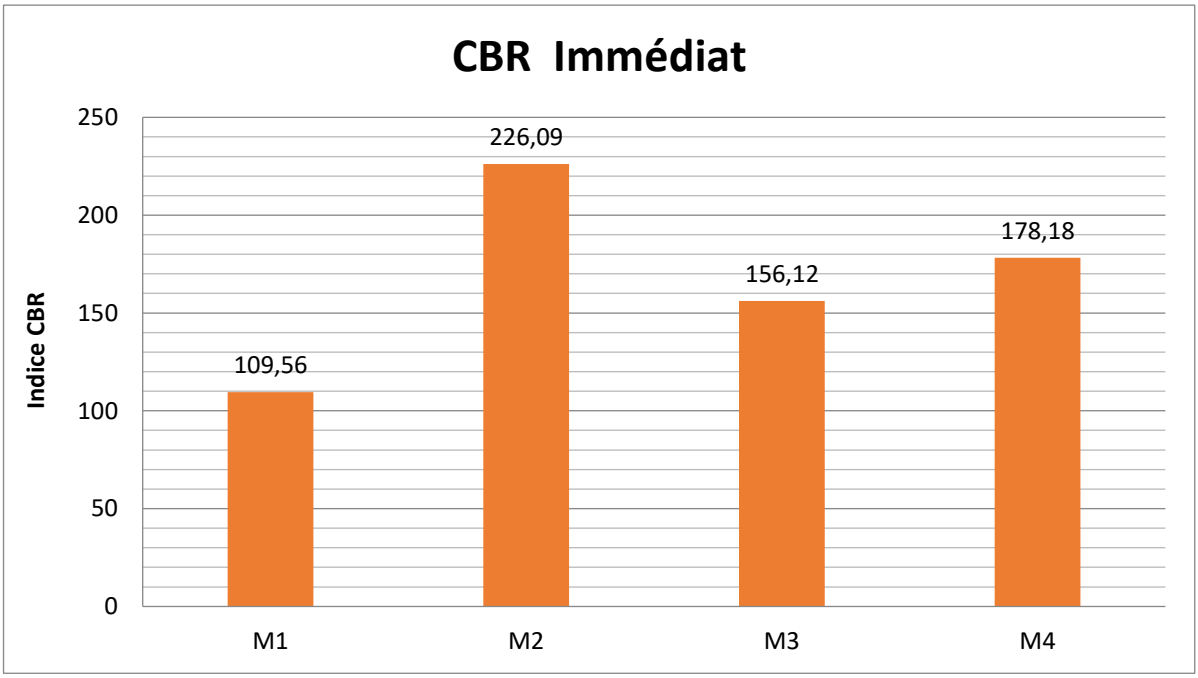
- إضافة مسحوق نفايات الطوب إلى التيف (M2) تؤدي إلى زيادة في الكثافة الجافة العظمى (1.67 كغ/م³ مقابل حوالي 1.65 كغ/م³ لـ M1)، مما يدل على تحسن في قابلية الدمك للمزيج. ويرجع ذلك إلى أن الجزيئات الدقيقة تملأ الفراغات بين الحبيبات، مما يسمح بترتيب أفضل للجسيمات.

- إدخال الجير (M3) مع مسحوق نفايات الطوب يؤدي إلى انخفاض في الكثافة الجافة العظمى لتصل إلى 1.62 كغ/م³. قد يتسبب الجير في تكتل الجزيئات الدقيقة ، مما يزيد من المسامية ويقلل من الكثافة العظمى الممكن تحقيقها.

- إضافة الإسمنت (M4) إلى خليط التيف + مسحوق نفايات الطوب تتيح الوصول إلى كثافة جافة عظمى تبلغ 1.63 كغ/م³، وهي أعلى من M3 لكنها أقل من M2. يعمل الإسمنت على تحسين التماسك والكثافة، إلا أن تأثيره يبقى أقل من تأثير مسحوق الطوب بمفرده.
- لكل خليط نسبة رطوبة مثلى تختلف عن الأخرى، تؤدي إضافة المواد المحسنة إلى تغيير هذه النسبة، وغالبًا ما تتسبب في زيادتها، لا سيما عند استخدام الإسمنت.

III-3-2 تأثير مختلف الاضافات على مؤشر CBR.

لأجل معرفة مدى تأثير مختلف الاضافات على مؤشر CBR للتيف قمنا بإخضاع أربعة عينات مختلفة (M4 , M3 , M2 , M1) لاختبار مؤشرCBR الفوري و اربعة عينات اخرى لنفس الخلطات لاختبار مؤشر CBR بعد الغمر في الماء لمدة 4 أيام , النتائج موضحة في الشكلين III.2 و III.3.

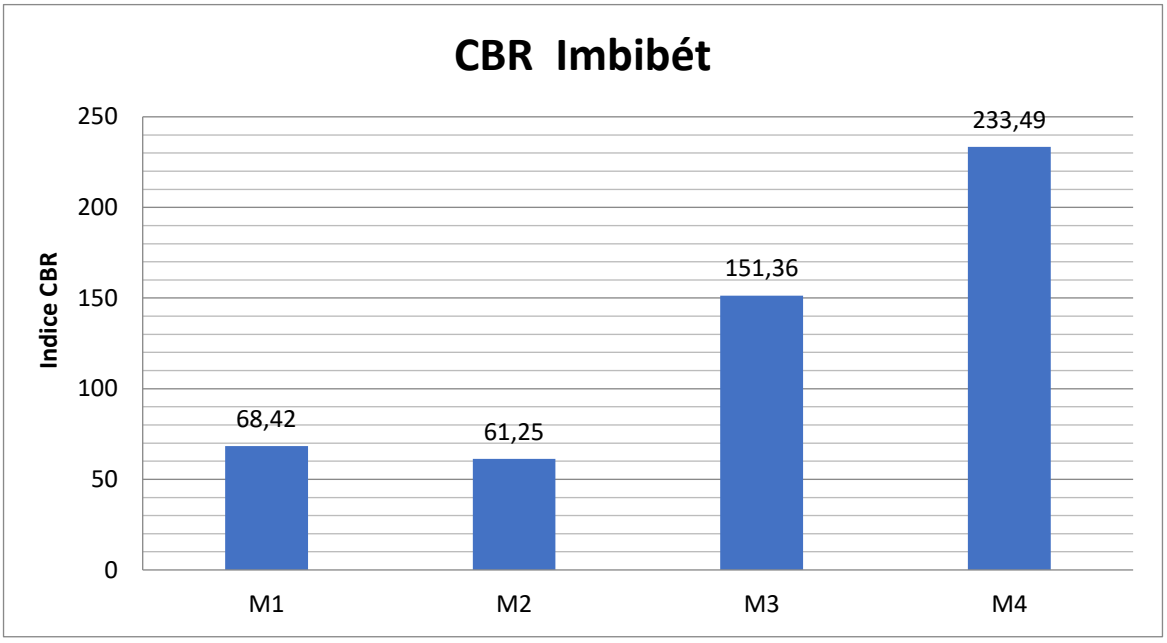


الشكل III.2 قيم CBR الفوري لمختلف الخلطات

الشكل III.2 يمثّل قيم اختبار CBR الفوري لأربعة خلطات مختلفةM1 ، M2، M3، .M4, حيث يظهر ان:

- التيف الطبيعي فقط يُظهر أقل قيمة لمؤشر(109.56) CBR ، مما يشير إلى قدرة تحمل محدودة. وهذا يعني أن التيف الطبيعي، بدون أي تحسين، يقدم حاملية متوسطة

- تيف + مسحوق نفايات الطوب يُظهر تحسنًا كبيرًا في مؤشر CBR (226.09) ، أي أكثر من ضعف القيمة المسجلة في التيف الطبيعي ,مما يدل على أن إضافة مسحوق نفايات الطوب تُحسن بشكل كبير قدرة التيف على التحمل.
- تيف + مسحوق نفايات الطوب + الجير سجل مؤشر CBR قدره 156.12. وعلى الرغم من أن الجير يُحسن قدرة التحمل مقارنة بالتيف الطبيعي، فإن النتيجة تبقى أقل من تيف + مسحوق نفايات الطوب ، ما يشير إلى أن الجير، في هذه الخلطة تحديدًا، لا يقدم تحسينًا بنفس كفاءة مسحوق نفايات الطوب وحده.
- تيف + مسحوق نفايات الطوب + إسمنت وصل إلى مؤشر CBR قدره 178.18. يُظهر هذا أن إضافة الإسمنت تُحسن قدرة التحمل مقارنة بالتيف الطبيعي والخلطة مع الجير، لكنها تبقى أقل من التحسين الذي توفره إضافة مسحوق الطوب وحده.



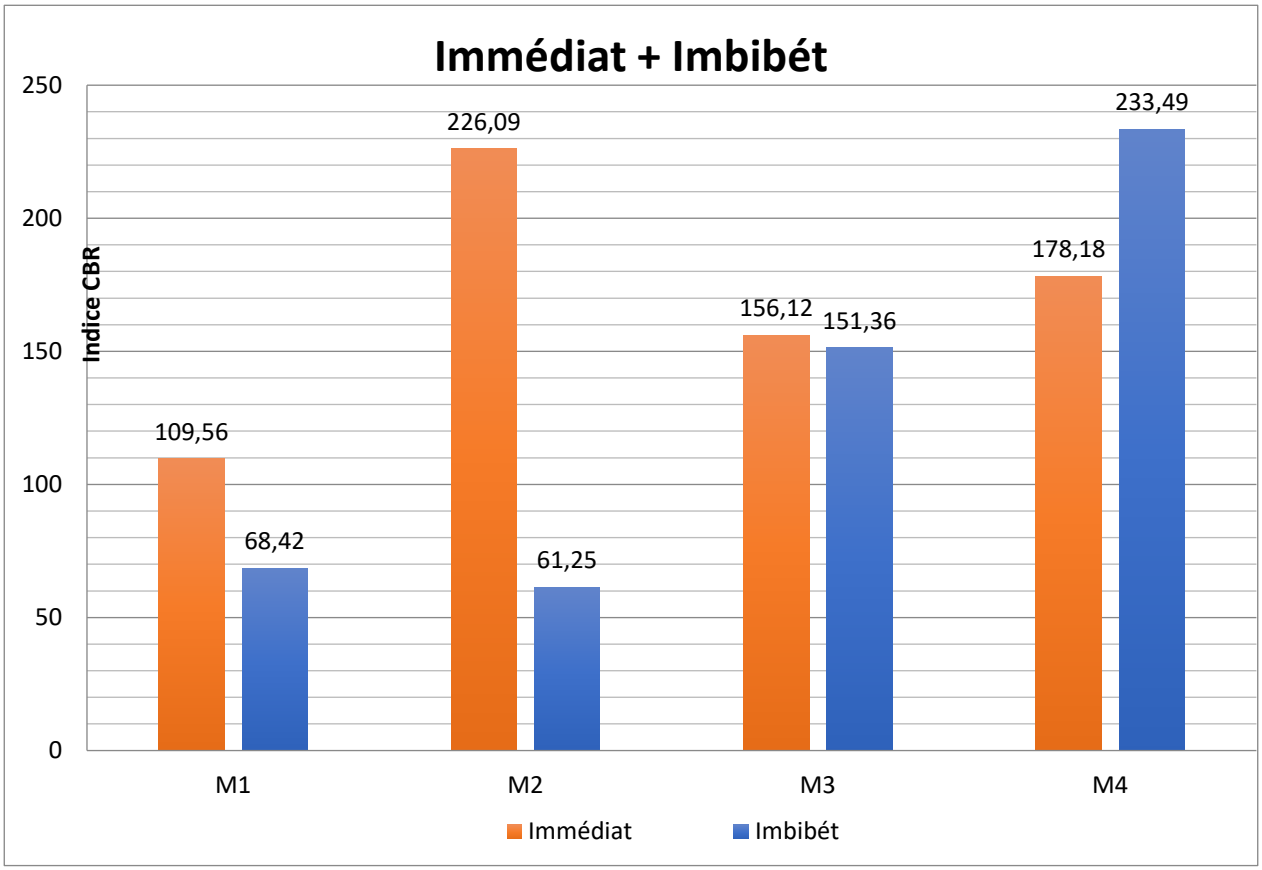
الشكل 3.III قيم CBR بعد الغمر

الشكل 3.III يمثّل قيم اختبار CBR المشبع لأربعة خلطات مختلفة M1 ، M2، M3، M4 حيث يظهر ان:

- عند التيف فقط :سجل مؤشر CBR قيمة 68.42، وهي قيمة متوسطة تعكس قدرة تحمل التيف وحده للماء والضغط.
- التيف + مسحوق نفايات الطوب :انخفض مؤشر CBR إلى 61.25 مقارنة بـ التيف ، ما يشير إلى أن إضافة مسحوق نفايات الطوب وحده لم تُحسِّن من مقاومة التربة بل ربما أثرت سلبًا على تماسكها تحت ظروف التشبع.

➢التيف + مسحوق نفايات الطوب + الجير :ارتفع مؤشر CBR بشكل ملحوظ إلى 151.36، ما يدل على أن إضافة الجير حسّنت بشكل كبير من خصائص الخليط، حيث يعمل الجير على تفاعل كيميائي مع مكونات الخليط، مما يزيد من تماسكها وصلابتها.

➢التيف + مسحوق نفايات الطوب + الإسمنت :سجل أعلى قيمة لمؤشر(233.49) CBR ، ما يوضح أن الإسمنت هو الأكثر فعالية في تحسين مقاومة الخليط، إذ يمنحه تماسكًا وصلابة أكبر بكثير من باقي التركيبات.



الشكل .4:III. مقارنة قيم CBR الفوري و المشبع لمختلف الخلطات

يمثل الرسم البياني(الشكل .4:III) مقارنة لقيم مؤشر التحمل كاليفورنيا (CBR) لأربع عينات عند حالتين :فورية (Immédiat)ومشبعة بالماء .(Imbibé) , من خلال الرسم البياني يظهر ان:

➢بالنسبة للتيف فقط : قيمة CBR الفوري متوسطة (109.56)، وتنخفض عند التشبع (68.42)، ما يدل على ضعف مقاومة التيف للماء وفقدانه للصلابة و الحاملية عند التشبع بالماء.

- التيف + مسحوق بقايا الطوب : ارتفاع كبير في CBR الفوري (226.09)، ما يعني تحسن الحاملية الجافة بشكل واضح. ثم انخفاض ملحوظ في CBR المشبع (61.25)، أي أن إضافة مسحوق الطوب لا تحسّن مقاومة الماء بل قد تضعفها مقارنة بالتيف وحده.
- التيف + مسحوق بقايا الطوب + الجير : تحسن في CBR الفوري (156.12) مقارنة بالتيف فقط.

تقارب كبير بين القيمتين الفورية والمشبعة (151.36)، ما يشير إلى أن إضافة الجير حسّنت بشكل كبير مقاومة الخليط للماء وحافظت على صلابته و حامليته حتى عند التشبع بفضل الخصائص الهيدرلوليكية الموجودة في الجبر.حيث بوجود الماء تشكل روابط قوية.

- التيف + مسحوق بقايا الطوب + الإسمنت : ارتفاع في CBR الفوري (178.18) والمشبعة (233.49)، مع تفوق القيمة المشبعة على الفورية، ما يدل على أن الإسمنت حسّن مقاومة الخليط للماء بشكل كبير، وجعلها أكثر صلابة و حاملية عند التشبع وهذا راجع اساسا للخصائص الهيدروليكية التي يتمتع بها الاسمنت في وجود الماء مشكلا روابط هيدروليكية و بوزولانية عند تفاعله مع مسحوق بقايا الطوب.
- و كخلاصة لهذه المقارنة , أفضل تحسن في حاملية الخليط يتحقق عند إضافة الإسمنت , يليه اضافة الجير .إضافة مسحوق بقايا الطوب وحده تحسن الحاملية الجافة فقط، لكنها تضعف عند وجود الماء. التيف وحده أقل مقاومة و حاملية، خاصة عند التشبع.

III-3-3 تأثير مختلف الاضافات على مقاومة القص المباشر (cisaillement directe).

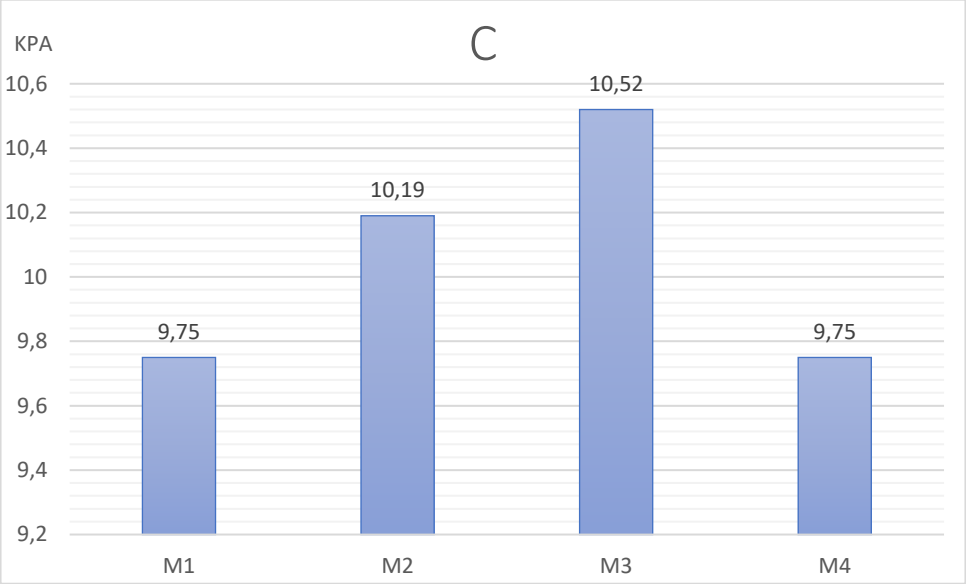
من خلال تجربة القص المباشر نهدف الى معرفة سلوك التيف الطبيعي و التيف المعالج بمختلف الاضافات تحت تأثير القص و ذالك من خلال تحديد زاوية الاحتكاك الداخلي (φ) و التماسك (c).

نتائج تجربة القص المباشر مبينة في الجدول الجدول III.2 والشكلين III.5 و III.6

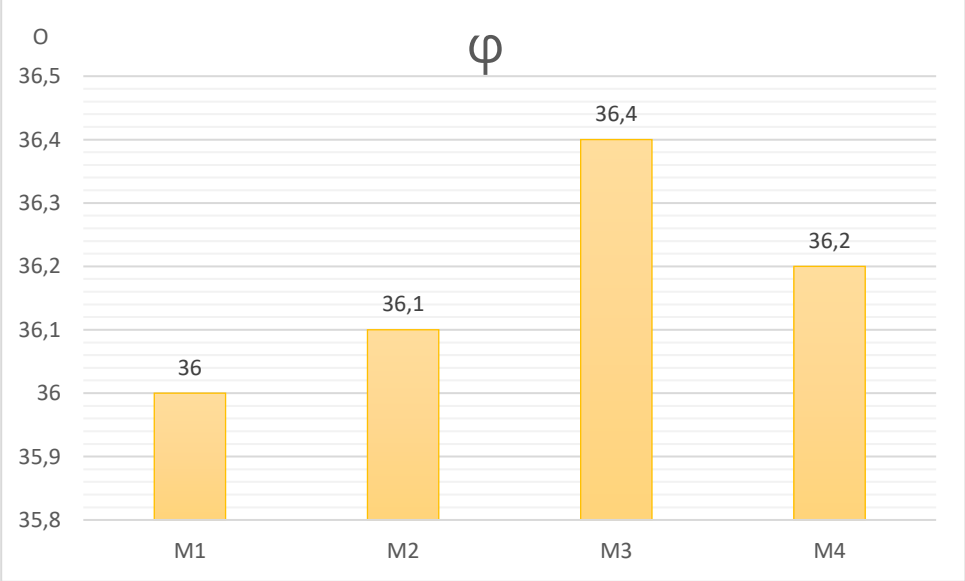
الصورة III.1 تجربة القص المباشر

الجدول 2.III نتائج القص المباشر

زاوية الاحتكاك الداخلي (°)	التماسك (KPa)	
36	9.75	**M1**
36.1	10.19	**M2**
36.4	10.52	**M3**
36.2	9.75	**M4**



الشكل 5.III قيم التماسك لمختلف الخلطات



الشكل 6.III قيم زاوية الإحتكاك الداخلي لمختلف الخلطات

من خلال هذه النتائج يظهر ان التيف الطبيعي يسجل زاوية احتكاك داخلي قدرها 36° وتماسكًا مقداره 9.75 كيلو باسكال.

يؤدي إضافة مسحوق نفايات الطوب إلى زيادة طفيفة في زاوية الاحتكاك الداخلي (36.1°) والتماسك (10.19 كيلو باسكال). يشير ذلك إلى تحسّن معتدل في المقاومة الميكانيكية للتيف، ويرجع ذلك على الأرجح إلى تحسين التدرج الحبيبي وتأثير ملء الفراغات.

اضافة الجير الى خليط التيف و مسحوق بقايا الطوب ادى الى تسجيل أفضل أداء ميكانيكي: أعلى زاوية احتكاك داخلي (36.4°) وأقصى تماسك (10.52 كيلو باسكال). إضافة الجير يؤدي إلى حدوث تفاعلات كيميائية (تكوين مركبات إسمنتية) تُحسّن بشكل كبير التماسك ومقاومة القص.

عند اضافة الاسمنت الى خليط التيف و مسحوق بقايا الطوب ادى الى الحصول على زاوية االحتكاك داخلي (36.2°) أعلى قليلاً من تلك الخاصة بالتيف الطبيعي، لكن التماسك يبقى مساويًا لـ 9.75 كيلو باسكال. وعلى عكس الجير، لم يؤدِّ الإسمنت إلى زيادة التماسك في هذه الحالة، وقد يُعزى ذلك إلى جرعة غير كافية أو تفاعل أقل فعالية مع المكونات الأخرى في الخليط.

III-4 دراسة الاداء الميكانيكي

III-4-1 مقاومة الضغط البسيط

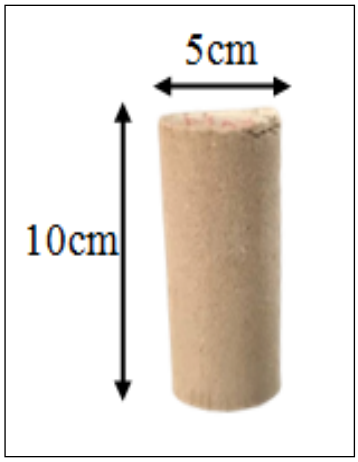
لاجل دراسة مقاومة الضغط البسيط للتيف الطبيعي و التيف المعالج بمختلف الاضافات تم تحضير عينات اسطوانية (ϕ=5cm,H=10cm) لكل خلطة.

تم تشكيل العينات بواسطة ضاغطة هيدروليكية و بطاقة دمك نظرية قدرها 95%.

تم تخزين العينات المشكلة , في الظروف المناخية للمخبر (35° ± 5°) بفترات زمنية مختلفة (7, 14،21يوم).

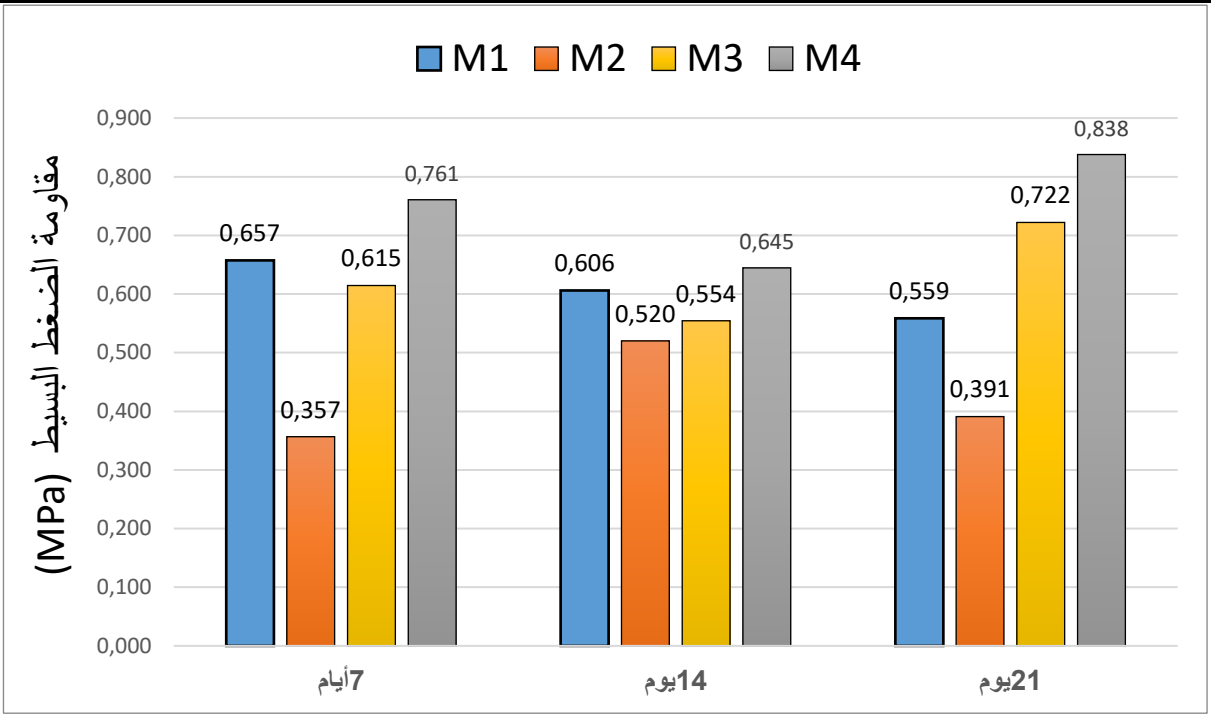
عند نهاية كل فترة تخزين تم قياس مقاومة الضغط البسيط لكل عينية عن طريق جهاز التكسير بسرعة ثابتة قدرها 1.60mm/s .

الصورة III.2 ضاغطة هيدروليكية



الصورة III.3 عينة للضغط البسيط

الصورة III.4 جهاز التكسير



الشكل 7.III تطور مقاومة الضغط بدلالة الزمن لمختلف الخلطات

الشكل 7.III يمثل تطور مقاومة الضغط البسيط بدلالة الزمن لمختلف الخلطات, حيث بقراة بيانية نلاحظ ان:

- مقاومة الضغط البسيط للتيف الطبيعي , تبدأ بقوة ضغط 0.657 MPa عند 7 أيام وتنخفض تدريجيًا إلى 0.559 MPa عند 21 يومًا. هذا يشير إلى أن مقاومة الضغط تتناقص مع الزمن، ما قد يدل على ضعف التماسك أو تدهور التماسك مع الوقت.
- مقاومة الضغط البسيط للتيف + مسحوق نفايات الطوب, تظهر أقل مقاومة ضغط بين جميع الخلطات في جميع الأعمار، حيث تبدأ بـ 0.357 MPa عند 7 أيام وتصل إلى 0.391 MPa عند 21 يومًا. إضافة مسحوق نفايات الطوب وحده لم يحسن مقاومة الضغط بشكل ملحوظ، بل قللها مقارنة بالتيف الطبيعي.
- التيف + مسحوق نفايات الطوب + الجير أظهرت تحسنًا ملحوظًا في مقاومة الضغط مع الزمن، حيث ارتفعت من 0.615 MPa عند 7 أيام إلى 0.722 MPa عند 21 يومًا. إضافة الجير ساعدت في تحسين التماسك والتصلب التدريجي.وهذا راجع لكون أن الجير يساهم في التفاعلات الكيميائية (مثل التفاعل البوزولاني) مما يعزز من تماسك الخلطة مع الوقت.
- التيف + مسحوق نفايات الطوب + الإسمنت حققت أعلى مقاومة ضغط في جميع الأعمار، حيث بدأت بـ 0.761 MPa عند 7 أيام وارتفعت إلى 0.838 MPa عند 21 يومًا. إضافة الإسمنت عززت بشكل واضح مقاومة الضغط، خاصة مع مرور الوقت.وهذا راجع اساسا الى التفاعلات الهيدروليكية الفعالة للاسمنت مشكلا روابط قوية تعمل على تماسك الخليط.

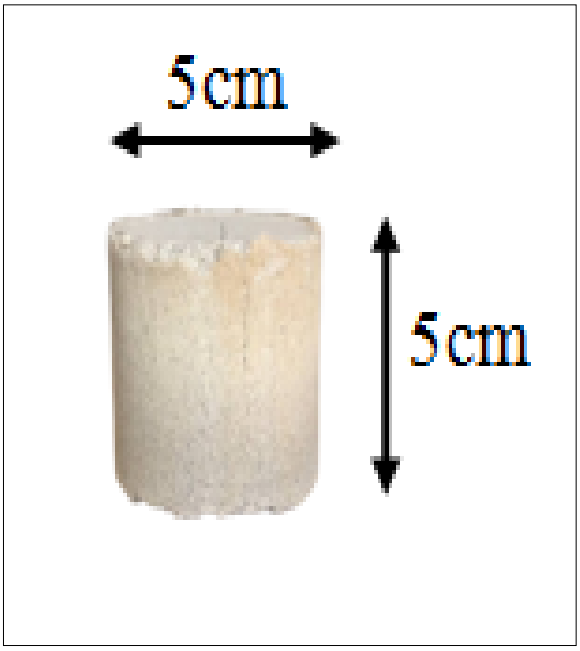
III-4-2 مقاومة الشد

لاجل دراسة مقاومة الشد غير المباشر للتيف الطبيعي و التيف المعالج بمختلف الاضافات تم تحضير عينات اسطوانية (ϕ=5cm,H=5cm) لكل خلطة.

تم تشكيل العينات بواسطة ضاغطة هيدروليكية و بطاقة دمك نظرية قدرها 95%.

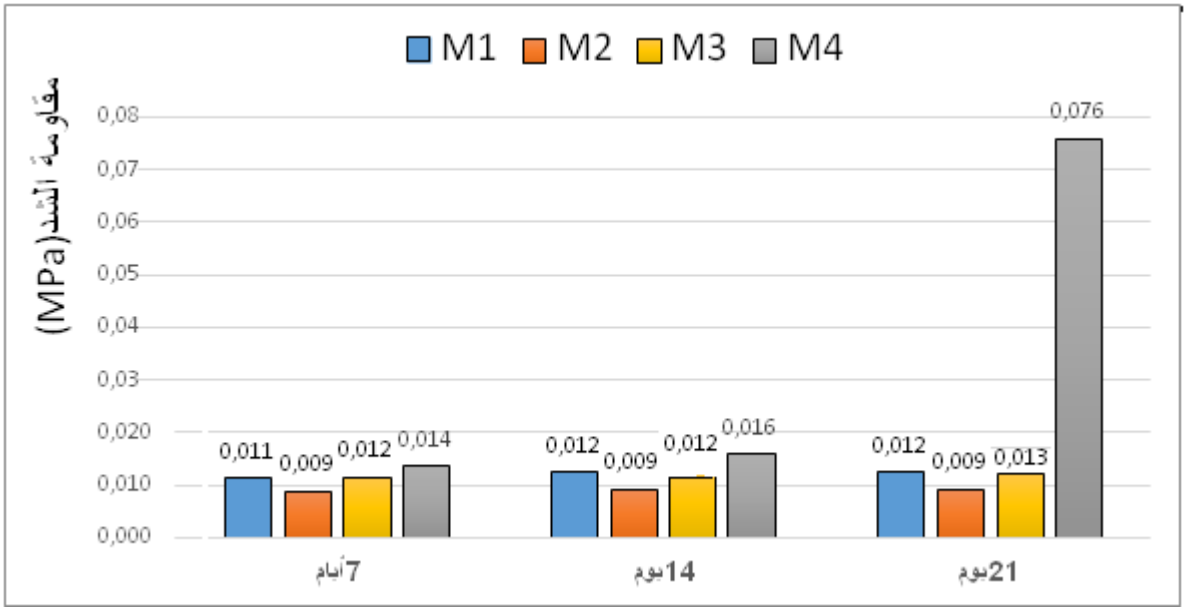
تم تخزين العينات المشكلة , في الظروف المناخية للمخبر ($35° \pm 5°$) بفترات زمنية مختلفة (7, 14 و 21 يوم).

عند نهاية كل فترة تخزين تم قياس مقاومة الضغط البسيط لكل عينية عن طريق جهاز التكسير بسرعة ثابتة قدرها 1.60mm/s .



الصورة III.5 عينة خاصة بتجربة الشد غير المباشر

الصورة III.6 عينة اثناء التكسير



الشكل 8.III تطور مقاومة الشد لمختلف الخلطات بدلالة الزمن

الشكل 8.III يمثل تطور مقاومة الشد بدلالة الزمن لمختلف الخلطات, حيث نلاحظ ان:

بعد 7 أيام

- جميع الخلطات تظهر مقاومة شد منخفضة بين 0.009 و0.014MPa
- عند اضافة الإسمنت الى الخليط نسجل قيم أعلى قليلاً من البقية 0.014MPa تليها الخلطات المضاف اليها الجير .

بعد 14 يوم

- ارتفاع طفيف في مقاومة الشد لجميع الخلطات.
- الخلطات المضاف اليها الإسمنت تستمر في التفوق 0.016MPa تليها الخلطات المضاف اليها الجير.

بعد 21 يوم

- الخلطات المضاف اليها الاسمنت تشهد طفرة كبيرة في مقاومة الشد (0.076MPa بينما تبقى باقي الخلطات مستقرة نسبيا مع زيادة طفيفة للخلطات المعالجة بالجير.

تفسير النتائج

التيف + مسحوق الطوب فقط:

مقاومة الشد تبقى منخفضة على مدى الزمن، مما يدل على أن إضافة مسحوق نفايات الطوب وحده لا يحسن خواص التيف بشكل ملحوظ في مقاومة الشد.و هو ما يؤكد النتائج المتحصل عليها عن مقاومة الضغط البسيط.

التيف + مسحوق الطوب + الجير:

هناك تحسن طفيف مقارنة بـ التيف + مسحوق الطوب فقط ، لكن يبقى محدودًا. الجير يساعد في بعض التفاعلات الكيميائية (تفاعل بوزولاني)، لكن تأثيره ليس كبيرًا في مقاومة الشد خلال 21 يوم.ممكن يحتاج الى وقت اكبر لاتمام التفاعلات البوزولانية المعروفة ببطئها نسبيا.

التيف + مسحوق الطوب + الإسمنت:

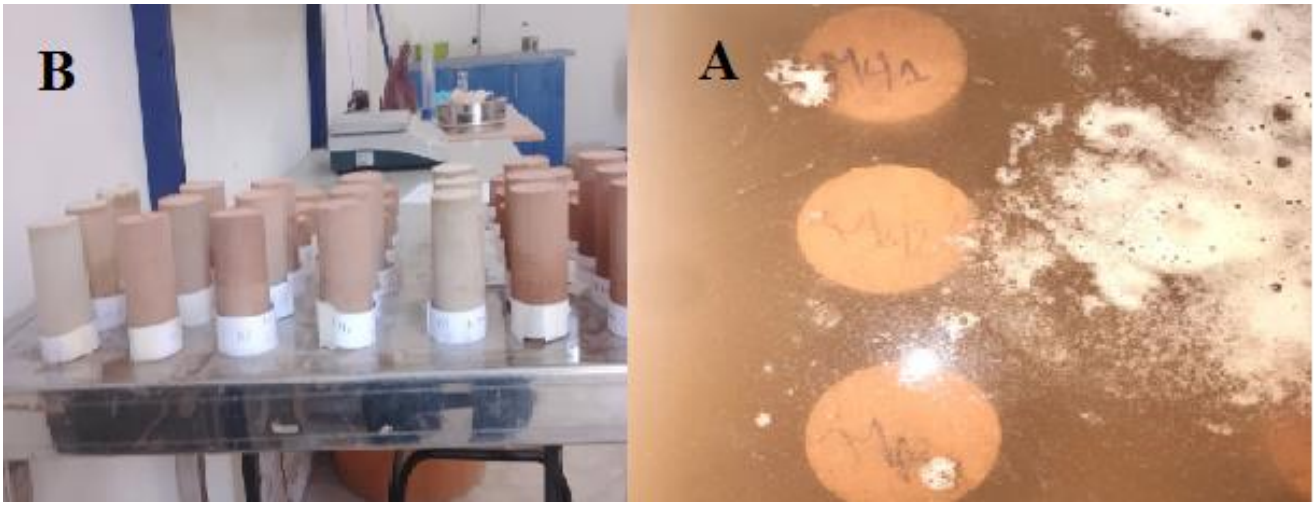
تظهر نتائج مميزة، خاصة بعد 21 يومًا، حيث ترتفع مقاومة الشد بشكل كبير. هذا يعود إلى دور الإسمنت كمادة رابطة فعالة، حيث يكوّن مركبات إسمنتية قوية تعزز تماسك الخلطة وتزيد مقاومتها بشكل واضح مع الزمن.

III-4-3 دراسة سلوك مختلف الخلطات تحت تأثير دورة الاماهة تجفيف

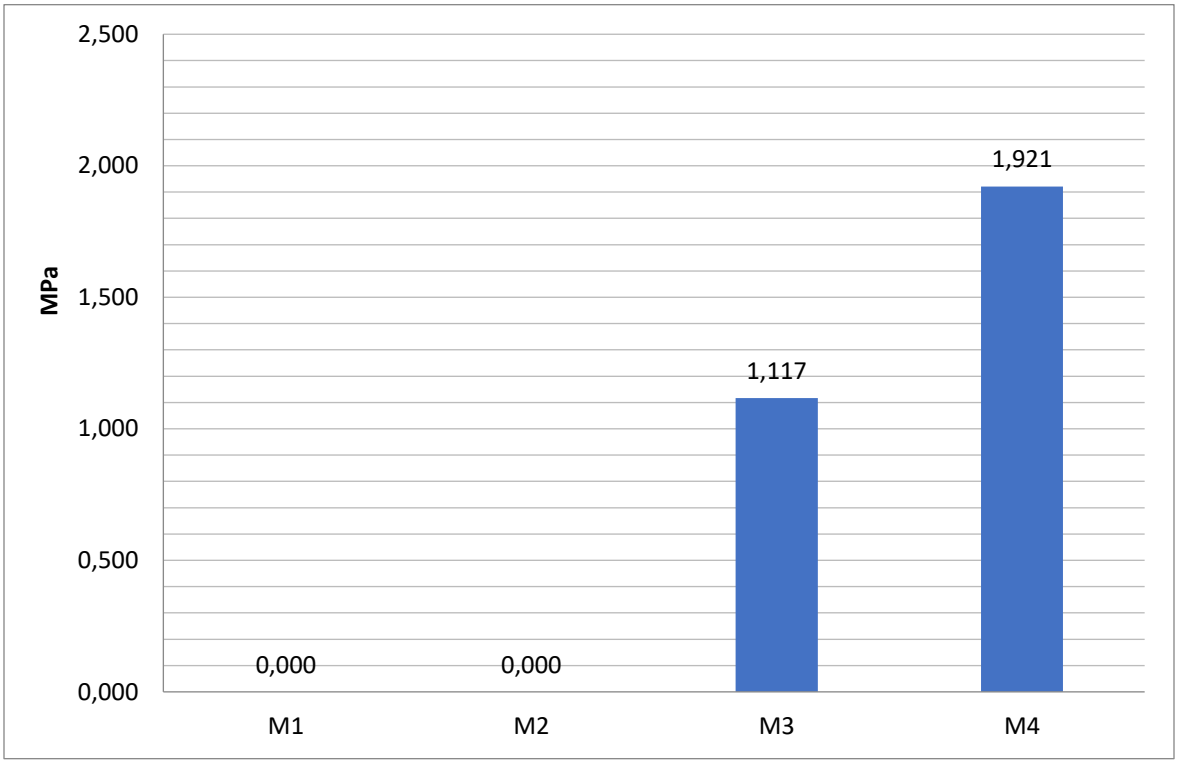
نهدف في هذه التجربة إلى دراسة تأثير التغيرات الدورية في الرطوبة و الجفاف على الخصائص الميكانيكية و الجيوتقنية للتيف و التيف المعالج بمختلف الاضافات، خصوصًا التماسك، ، مقاومة الضغط، والاستقرار البنيوي. لاجل ذالك قمنا بتحضير عينات من مختلف الخلطات . بعد اسبوع من تشكيل العينات و تخزينها ضمن الظروف الجوية للمخبر($35°\pm5°$) عرضنا العينات لدورة من الاماهة تجفيف لمدة اسبوع اخر بحيث تغمر العينات في الماء لمدة 24ساعة تليها 24ساعة اخرى خارج الماء.

تم وزن العينات قبل بداية دورة الاماهة تجفيف وبعدها ثم تعريض العينات للتكسير من اجل قياس مقاومة الضغط لكل خلطة.

نتائج التجربة موضحة في الشكل III.9 .



الصورة III.:7 تجربة الاماهة تجفيف.A- العينات داخل الماء . B- العينات خارج الماء.



الشكل 9.III: مقاومة الضغط البسيط لدورة الاماهة تجفيف.

الشكل 9.III يمثل قيم مقاومة الضفط البسيط لمختلف الخلطات بعد دورة الاماهة تجيف , حيث نلاحظ ان:

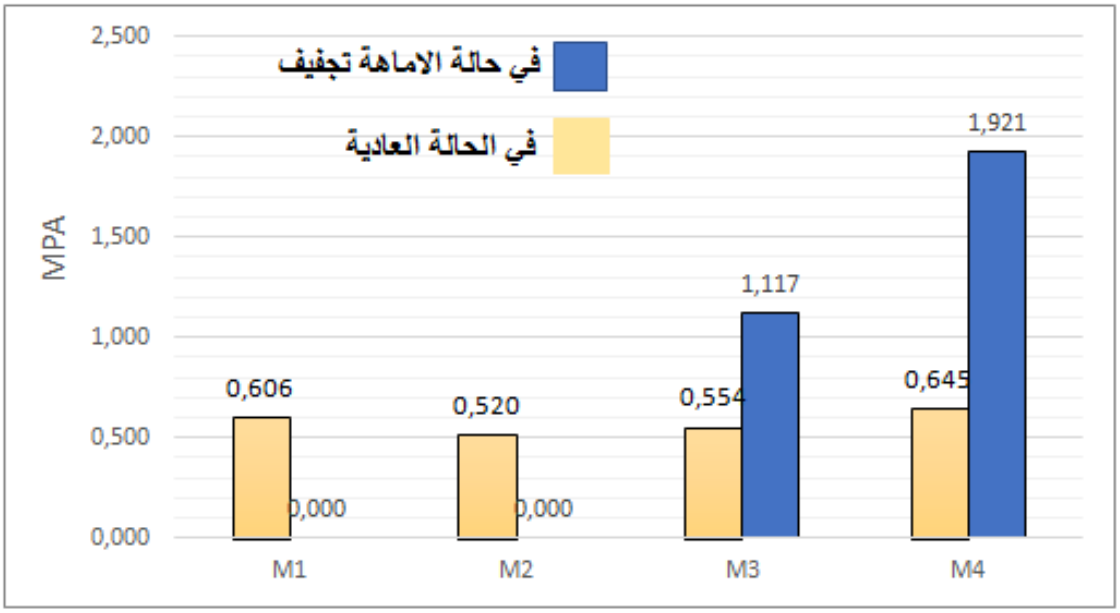
العينات المشكلة من التيف الطبيعي و من التيف+مسحوق بقايا الطوب **(M1 و M2)** تعرضت للتحلل خلال ساعات قليلة من غمرها في الماء، مما يدل على أن التيف بمفرده أو مع إضافة مسحوق بقايا الطوب لا يشكلان بنية مترابطة ومقاومة للماء. ويرجع هذا الانهيار إلى غياب رابط هيدروليكي أو مادة بوزولانية، ما يجعل هذه المواد شديدة الهشاشة أمام تأثير الماء.

إضافة الجير (M3) حسّنت من مقاومة المادة بشكل واضح بعد دورة الترطيب–التجفيف، حيث بلغت المقاومة حوالي 1.117 ميغاباسكال. ويُعزى ذلك إلى تفاعل الجير مع المكونات السيليسية والألومينية في التيف ومسحوق الطوب، مكوّناً هيدرات الكالسيوم التي تعزز التماسك حتى بعد تعرض المادة للتغيرات الرطوبية.

الخليط M4 أظهر أعلى مقاومة ميكانيكية (1.921 ميغاباسكال)، وذلك بفضل التفاعلات الإماهنية للإسمنت التي تنتج عنها مركبات (C-S-H سيليكات الكالسيوم المميهة)، المعروفة بصلابتها ومقاومتها للماء والجفاف. هذه النتائج تؤكد أن هذا الخليط يوفر أفضل استقرار ومتانة بعد دورات الترطيب والتجفيف المتكررة.

III-4-4 مقارنة الاداء الميكانيكي لمختلف الخلطات في الحالة العادية وفي حالة تعرضها لدورة الاماهة تجفيف.

لاجل مقارنة الاداء الميكانيكي لمختلف الخلطات بين الحالة العادية و اثناء تعرضها لعوامل الرطوبة و الجفاف قمنا بتشكيل عينات من نفس الخلطات , في الحالة الاولى قمنا بتخزين العينات لمدة 14 يوم ضمن الشروط الجوية للمخبر ($35°\pm5°$) وفي الحالة الثانية عرضنا العينات لدورة متكررة من الاماهة تجيف لنفس المدة (14 يوم).
النتائج موضحة في الشكل III.10



الشكل III.10: مقاومة الضغط البسيط في الحالة العادية
وفي حالة دورة الاماهة تجفيف.

تشير النتائج إلى أن العينات المكوّنة من التيف فقط أو من التيف مع مسحوق بقايا الطوب تُظهر تماسكاً مقبولاً في الحالة الجافة، لكنها تنهار فور تشبعها بالماء. هذا السلوك يبرز حساسيتها العالية للرطوبة ويفسر ضعف البنية نتيجة غياب روابط داخلية فعّالة قادرة على مقاومة تأثير الماء.
في المقابل، تُظهر العينات المعالجة بالجير أو بالإسمنت تحسناً ملحوظاً في مقاومة الضغط البسيط بعد تعرضها لدورة الإماهة والتجفيف. ويُعزى هذا التطور إلى استمرار التفاعلات الهيدروليكية والبوزولانية بفضل توفر الماء أثناء الدورة، مما يؤدي إلى تكوّن روابط داخلية جديدة تعزز التماسك وتزيد من متانة الخليط بشكل ملحوظ.

5.III الخاتمة

بناءً على ما تم عرضه وتحليله في هذا الفصل من نتائج تجريبية وتفسيرات علمية، يمكن تلخيص أهم الاستنتاجات كما يلي:

- أظهرت الدراسة أن التيف الطبيعي يتمتع بخصائص ميكانيكية وجيوتقنية متوسطة، إذ أن مقاومته للضغط والشد ومؤشر CBR محدودة، وتضعف بشكل ملحوظ عند تعرضه للماء أو دورات الترطيب والتجفيف.
- إضافة مسحوق نفايات الطوب إلى التيف حسّنت من قابلية الدمك ورفعت الكثافة الجافة العظمى، كما عززت مؤشر CBR في الحالة الجافة، إلا أن مقاومة الخليط للماء بقيت ضعيفة، بل انخفضت قدرة التحمل تحت ظروف التشبع، كما لم يتحسن الأداء في مقاومة الضغط والشد بشكل ملحوظ.
- دمج الجير مع التيف ومسحوق الطوب أدى إلى تحسن ملحوظ في التماسك ومقاومة القص، كما حسّن من ثبات الخليط عند التشبع بالماء، وذلك بفضل التفاعلات الكيميائية التي ينتج عنها تكوين مركبات إسمنتية تعزز البنية الداخلية. ومع ذلك، يبقى تأثير الجير في مقاومة الشد محدودًا خلال الفترات الزمنية القصيرة.
- أظهرت إضافة الإسمنت إلى الخليط أفضل النتائج من حيث مقاومة الضغط والشد ومؤشرCBR ، خاصة في ظروف التشبع ودورات الترطيب والتجفيف، حيث وفرت التفاعلات الهيدروليكية روابط قوية منحت الخليط صلابة واستقرارًا عاليين، ما يجعله الخيار الأكثر فعالية لتحسين خصائص التيف.

الخاتمة العامة

خلصت هذه الدراسة إلى أن التيف الطبيعي، رغم توفره الواسع واستخدامه التقليدي في مشاريع الطرق، يعاني من محدودية في الخصائص الميكانيكية والجيوتقنية، خاصة عند تعرضه للماء أو دورات الترطيب والتجفيف. أظهرت نتائج التجارب أن إضافة مسحوق نفايات الطوب حسّنت بعض الخصائص مثل الكثافة الجافة ومؤشر CBR في الحالة الجافة، لكنها لم تعالج ضعف مقاومة الخليط للماء أو تحسن بشكل ملموس مقاومة الضغط والشد. أما دمج الجير مع التيف ومسحوق الطوب، فقد أدى إلى تحسن ملحوظ في التماسك ومقاومة القص وثبات الخليط في ظروف التشبع، إلا أن تأثيره على مقاومة الشد بقي محدودًا على المدى القصير. في المقابل، جاءت إضافة الإسمنت كأفضل الحلول، حيث عززت بشكل كبير مقاومة الضغط والشد ومؤشر CBR، ووفرت استقرارًا عاليًا حتى في الظروف البيئية القاسية، مما يجعلها الخيار الأمثل لتحسين خواص التيف في أعمال الطرق.

التوصيات

1. يُوصى باستخدام الإسمنت لتحسين خواص التيف في مشاريع الطرق، خاصة في المناطق المعرضة للرطوبة أو دورات الترطيب والتجفيف المتكررة.
2. يُنصح بإجراء دراسات جدوى اقتصادية لمقارنة تكلفة تحسين التيف بالإسمنت مع بدائل أخرى، لضمان تحقيق أفضل عائد مقابل الكلفة.
3. يمكن الاستفادة من الجير ومسحوق نفايات الطوب لتحسين التيف في المشاريع ذات المتطلبات الميكانيكية و الجيوتقنية المتوسطة ، مع الأخذ بعين الاعتبار محدودية أدائهما تحت ظروف التشبع.
4. يُوصى بإجراء المزيد من الدراسات حول تأثير نسب الخلط المختلفة وفترات المعالجة على أداء الخليط، وكذلك استكشاف مواد محلية أو نفايات صناعية أخرى قد تساهم في تحسين خواص التيف بطرق أكثر استدامة وفعالية.

قائمة المراجع

قائمة المراجع

[1] كتاب "Engineering Geology"لـ F.G. Bell
كتاب "Geomaterials Under the Microscope"لـ Jeremy Ingham

[2] وزارة الطاقة والمناجم الجزائرية

[3] كتاب "Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks"لـ Donald W. Hyndman

[4] "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials" – P.K. Mehta & P.J.M. Monteiro (2017) الناشر: McGraw-Hill

[5] "Lea's Chemistry of Cement and Concrete" – Peter Hewlett & Martin Liska (2019)
(الفصل 3 والفصل 10)

[6] Tchobanoglous (2002)

[7] LaGrega (2010)

[8] "Lea's Chemistry of Cement and Concrete" – Peter Hewlett (2019)

[9] (Norme françaises, Analyse granulométrique par tamisage, NF P 18-560 Septembre 1990).

[10] document de Pr. Baheddi Mohamed T P. N 3ESSAI DE COMPACTAGE DES SOLS. (ESSAI PROCTOR).

Norme françaises, Sols: reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. **[11]** Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans .le moule CBR., NF P94-078

[12] المواصفات الأمريكية (ASTM D1883) توصي بغمر العينة في الماء مدة 96 ساعة (4 أيام) لضمان التشبع التام للعينة

Principles of Geotechnical Engineering" - Braja M. Das. **[13]**

"Soil Mechanics and Foundations" - B.M. Das **[14]**

[15] مذكرة سابقة للطالبتين "جيلي يمنى – غرمة فتيحة" 2023\2024

Norme françaises, "Détermination des constituants chimiques (insolubles, sulfates, **[16]** carbonates, chlorures) dans les matériaux de construction", NF P 15-461

Norme francaises, Masse volumique apparente, NF P94-061 **[17]**

Norme francaises, Masse volumique absolue, NFP 18-301 **[18]**