الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة البشير الإبراهيمي-برج بوعريريج

مذكرة تخرج

لنيل شهادة الماستر

قسم الهندسة المدنية

تخصص : مواد في الهندسة المدنية

من إعداد

لعلامي سامي ➢

تحت عنوان

ROADFIX

Soutenu le : 04 juillet 2026

Devant les Jurés composés de :

Nom & Prénom	*Qualité*	*Etablissement*
M. kessal oussama	*Encadreur*	*Univ-BBA*
M.Blmryoul farid	*Examinateur*	*Univ-BBA*
M. Maafi nabil	*Examinateur*	*Univ-BBA*

Année Universitaire 2025/2026

شكر وتقدير

الحمد لله رب العالمين، الذي أنعم علينا بنعمة العلم، ووفقنا ومنحنا القوة والصبر والإرادة لإتمام هذا العمل.

نتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى والدينا العزيزين، خاصة الى أمي التي كان لها الفضل الكبير في دعمي المادي والمعنوي طوال مسيرتي الجامعية، ولم تبخل علي بالنصح والتشجيع والدعاء، فكانت خير سند لي في تحقيق هذا الإنجاز.

كما نتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى أعضاء لجنة المناقشة، لتفضلهم بقبول مناقشة هذا العمل، ولما سيقدمونه من ملاحظات وتوجيهات قيمة من شأنها إثراء هذه الدراسة.

ونتقدم بخالص عبارات الشكر والعرفان إلى الأستاذ كسال أسامة، على إشرافه الكريم، وتوجيهاته السديدة، ونصائحه القيمة، ومرافقته لي طوال فترة إنجاز هذه المذكرة.

وفي الختام، نتقدم بالشكر الجزيل إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذه المذكرة، وقدم لي يد العون أو كلمة تشجيع أو نصيحة كان لها أثر في إتمام هذا العمل.

الإهداء

الحمد لله الذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل، والصلاة والسلام على سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

أهدي ثمرة جهدي المتواضع إلى:

إلى والديَّ العزيزين،

إلى من كانا سببًا في نجاحي بعد فضل الله تعالى، إلى من غرسا فيَّ حب العلم والعمل، وساندني بالدعاء والتشجيع والتضحية طوال سنوات الدراسة. أسأل الله أن يحفظكما، ويمتعكما بموفور الصحة والعافية، ويجزيكما عني خير الجزاء.

إلى إخوتي وعائلتي الكريمة،

شكرًا لكم على محبتكم، ووقوفكم إلى جانبي، ودعمكم المتواصل الذي كان خير معين لي في مسيرتي الجامعية.

إلى أساتذتي الأفاضل،

تقديرًا واحترامًا لكل ما قدمتموه لي من علم وتوجيه، فكان لكم الفضل بعد الله في تكويني العلمي والمهني.

إلى مؤطري،

تقديرًا وعرفانًا بجهوده، وبكل ما قدمه لي من توجيهات ونصائح قيمة، وعلى متابعته المستمرة ودعمه طوال فترة إنجاز هذه المذكرة، فله مني أسمى عبارات الشكر والاحترام والتقدير.

إلى أصدقائي وزملائي،

شكرًا لكم على كل لحظة جميلة، وعلى روح التعاون والمساندة التي جمعتنا طوال سنوات الدراسة.

إلى كل من دعمني، وشجعني، وآمن بقدراتي، من قريب أو بعيد،

أهدي هذا العمل المتواضع، راجيًا من الله أن يجعله بدايةً لمستقبل مليء بالنجاح والعطاء.

ملخص

تُعدّ صيانة وإصلاح الطرق من أهم العوامل التي تساهم في ضمان سلامة مستعملي الطريق، وتحسين جودة البنية التحتية، وتقليل التكاليف الاقتصادية الناتجة عن تدهور شبكات الطرق. ومع التطور التكنولوجي وظهور مفاهيم الاستدامة، أصبح من الضروري اعتماد حلول ذكية وحديثة تساهم في رفع كفاءة عمليات الصيانة وإطالة العمر الافتراضي للطرقات مع الحد من التأثيرات البيئية.

تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تحليل تقني واقتصادي لأهم تقنيات ومواد إصلاح وصيانة الطرق، مع التركيز على الحلول الذكية والمستدامة مثل استخدام المواد المعاد تدويرها، وتقنيات المراقبة الذكية، وأنظمة الصيانة الوقائية، إضافة إلى تقييم مردودها من الناحيتين التقنية والاقتصادية مقارنة بالطرق التقليدية.

اعتمدت الدراسة على مراجعة وتحليل مختلف المراجع العلمية والدراسات الحديثة، بهدف إبراز مزايا وعيوب كل تقنية، ودراسة مدى مساهمتها في تحسين جودة الطرق، وتقليل تكاليف الصيانة، والرفع من مستوى السلامة المرورية، مع المحافظة على الموارد الطبيعية والحد من الآثار البيئية.

وقد أظهرت نتائج الدراسة أن دمج التقنيات الذكية والمواد المستدامة في مشاريع صيانة الطرق يمثل حلاً فعالاً لتحقيق التوازن بين الأداء التقني، والجدوى الاقتصادية، والاستدامة البيئية، كما يساهم في تحسين استغلال الموارد، وتقليل تكاليف الصيانة على المدى الطويل، وتعزيز جودة البنية التحتية للطرقات.

الكلمات المفتاحية :

صيانة الطرق، إصلاح الطرق، الحلول الذكية، الاستدامة، إعادة التدوير، التحليل التقني، التحليل الاقتصادي، البنية التحتية للطرق.

Résumé

L'entretien et la réparation des routes constituent des éléments essentiels pour garantir la sécurité des usagers, améliorer la qualité des infrastructures routières et réduire les coûts économiques liés à la dégradation des réseaux routiers. Avec les progrès technologiques et l'émergence des concepts de développement durable, il est devenu indispensable d'adopter des solutions intelligentes et innovantes permettant d'améliorer l'efficacité des opérations de maintenance, de prolonger la durée de vie des chaussées et de limiter les impacts environnementaux.

Cette étude vise à réaliser une analyse technique et économique des principales techniques et matériaux utilisés dans la réparation et la maintenance des routes, en mettant l'accent sur les solutions intelligentes et durables, telles que l'utilisation de matériaux recyclés, les technologies de surveillance intelligente et les systèmes de maintenance préventive. Elle évalue également leurs performances techniques et économiques par rapport aux méthodes traditionnelles.

L'étude s'appuie sur une revue et une analyse de différentes références scientifiques et recherches récentes afin de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque technique, ainsi que leur contribution à l'amélioration de la qualité des routes, à la réduction des coûts de maintenance, au renforcement de la sécurité routière, tout en préservant les ressources naturelles et en limitant les impacts environnementaux.

Les résultats montrent que l'intégration des technologies intelligentes et des matériaux durables dans les projets de maintenance routière constitue une solution efficace permettant d'assurer un équilibre entre les performances techniques, la rentabilité économique et la durabilité environnementale. Elle contribue également à une meilleure gestion des ressources, à la réduction des coûts de maintenance à long terme et à l'amélioration de la qualité des infrastructures routières.

Mots-clés : Maintenance routière, réparation des routes, solutions intelligentes, développement durable, recyclage, analyse technique, analyse économique, infrastructures routières.

Abstract

Road maintenance and repair are among the most important factors in ensuring road user safety, improving the quality of transportation infrastructure, and reducing the economic costs resulting from the deterioration of road networks. With technological advancements and the emergence of sustainability concepts, it has become essential to adopt smart and innovative solutions that improve maintenance efficiency, extend pavement service life, and minimize environmental impacts.

This study aims to provide a technical and economic analysis of the main techniques and materials used in road repair and maintenance, with a particular focus on smart and sustainable solutions such as recycled materials, intelligent monitoring technologies, and preventive maintenance systems. It also evaluates their technical and economic performance compared with conventional methods.

The study is based on a review and analysis of various scientific references and recent research to highlight the advantages and limitations of each technique, as well as their contribution to improving road quality, reducing maintenance costs, enhancing road safety, while preserving natural resources and limiting environmental impacts.

The findings indicate that integrating smart technologies and sustainable materials into road maintenance projects represents an effective solution for achieving a balance between technical performance, economic efficiency, and environmental sustainability. It also contributes to better resource management, lower long-term maintenance costs, and improved road infrastructure quality.

Keywords: Road maintenance, road repair, smart solutions, sustainability, recycling, technical analysis, economic analysis, road infrastructure.

قائمة الأشكال

الشكل 1: صورة توضح أنواع الاسفلت 7
الشكل 2 : صورة توضح الخرسانة الاسمنتية .....8.
الشكل 3 : صورة توضح المدن الحديثة 15
الشكل 4 : صورة توضح تدهور الطرق 22
الشكل 5 : صورة توضح التشققات 24
الشكل 6 : صورة توضح الحفر 25

الفهرس

شكر وتقدير

الإهداء

الملخص

Résumé

Abstract

قائمة الأشكال

قائمة الجداول

المقدمة العامة.....5

الفصل الأول: مواد البناء وأنواع الأرصفة في إصلاح وصيانة الطرقات.....6

1.1مقدمة الفصل.....7

1.2أهم مواد البناء المستعملة في إصلاح الطرقات.....7

1.2.1 الإسفلت.....7

1.2.2 الخرسانة الأسمنتية.....8

1.2.3 المواد المعاد تدويرها.....8

1.2.4 المواد المضافة.....9

1.3أنواع الأرصفة.....9

1.3.1 التصنيف العام.....9

1.3.2 الأرصفة الخرسانية.....9

1.3.3 الأرصفة الأسفلتية.....11

1.3.4 الأرصفة المبلطة.....13

1.3.5 الأرصفة الحجرية.....14
1.3.6 مقارنة بين أنواع الأرصفة.....16
1.4خاتمة الفصل.....17

الفصل الثاني: الحلول الذكية والمستدامة في إصلاح الطرقات.....18

2.1مقدمة الفصل.....19
2.2المواد المستدامة المستعملة في إصلاح الطرقات.....20
2.2.1 إعادة تدوير الإسفلت(RAP) 20
2.2.2 البلاستيك المعاد تدويره.....21
2.2.3 الإطارات المطاطية المستعملة.....22
2.2.4 الخرسانة منخفضة الانبعاثات.....23
2.3التقنيات الذكية في مراقبة وإصلاح الطرقات.....23
2.3.1 أجهزة الاستشعار.....23
2.3.2 الذكاء الاصطناعي.....24
2.3.3 الطائرات بدون طيار.....25
2.3.4 التطبيقات الرقمية.....26
2.4مميزات الحلول الذكية والمستدامة.....26
2.5التحديات والقيود.....27
2.6دور مشروعROADFIX 28
2.7خاتمة الفصل.....29

الفصل الثالث: تدهور الطرقات وأسبابه.....31

3.1مقدمة الفصل.....32

3.2أسباب تدهور الطرقات.....32
3.2.1 العوامل المناخية.....32
3.2.2 حركة المرور والأحمال الثقيلة.....33
3.2.3 ضعف جودة المواد.....34
3.2.4 أخطاء التنفيذ.....35
3.2.5 نقص الصيانة.....35
3.3أنواع تدهور الطرقات.....36
3.3.1 التشققات.....36
3.3.2 الحفر.....37
3.3.3 التشوهات السطحية.....38
3.3.4 فقدان الالتصاق.....38
3.3.5 التآكل السطحي.....39
3.4آثار تدهور الطرقات.....39
3.5خاتمة الفصل.....39

الفصل الرابع: الدراسة التقنية لمشروعROADFIX 41

4.1مقدمة الفصل.....42
4.2فكرة المشروع.....42
4.3آلية عمل المشروع.....43
4.4الوسائل والتجهيزات المستعملة.....45
4.5الموارد البشرية.....46
4.6أهداف المشروع.....46
4.7أهمية المشروع.....47
4.8خاتمة الفصل.....48

الفصل الخامس: الدراسة الاقتصادية وتحليل السوق.....49

5.1مقدمة الفصل.....50
5.2فرضيات الدراسة.....50
5.3تكلفة المواد والتجهيزات.....50
5.4التكلفة الإجمالية للمشروع.....50
5.5مقارنة مع الطرق التقليدية.....51
5.6تحليل الجدوى الاقتصادية.....51
5.7دراسة السوق والمنافسة.....52
5.8الميزة التنافسية لمشروعROADFIX 53
5.9خاتمة الفصل.....54
5.10الموقع الإلكتروني لمشروعROADFIX 55

المقدمة العامة

تُعدّ شبكة الطرق من أهم مكونات البنية التحتية لأي دولة، لما لها من دور أساسي في تسهيل حركة الأشخاص والبضائع، ودعم النشاط الاقتصادي والاجتماعي، وربط مختلف المناطق. غير أن الطرقات تتعرض مع مرور الزمن إلى العديد من العوامل التي تؤدي إلى تدهورها، مثل الأحمال المرورية المتزايدة، والعوامل المناخية، وضعف بعض مواد الإنجاز، مما ينعكس سلبًا على مستوى السلامة المرورية ويؤدي إلى ارتفاع تكاليف الصيانة والإصلاح.

ولسنوات طويلة اعتمدت عمليات إصلاح وصيانة الطرق على أساليب تقليدية تحقق نتائج مقبولة، إلا أنها غالبًا ما تكون مكلفة على المدى الطويل، كما تستهلك كميات كبيرة من الموارد الطبيعية وتؤثر على البيئة. ومع التطور التكنولوجي وتزايد الاهتمام بمبادئ التنمية المستدامة، أصبح من الضروري البحث عن حلول حديثة تعتمد على التقنيات الذكية والمواد المستدامة، بما يسمح بتحسين أداء الطرق، وإطالة عمرها الافتراضي، وتقليل تكاليف الصيانة، والحد من الآثار البيئية.

وفي هذا الإطار يهدف مشروع **RoadFix** إلى تقديم تصور متكامل يجمع بين الحلول التقنية الحديثة، والمواد الصديقة للبيئة، والتقنيات الرقمية، من أجل تطوير عمليات إصلاح وصيانة الطرق بطريقة أكثر كفاءة وفعالية. كما يسعى المشروع إلى المساهمة في تحسين جودة البنية التحتية الطرقية، وتعزيز السلامة المرورية، وترشيد استغلال الموارد، بما يتماشى مع التوجهات الحديثة في مجال الهندسة المدنية.

وتتمثل إشكالية هذه الدراسة في الإجابة عن التساؤل الآتي:

إلى أي مدى يمكن للحلول الذكية والمستدامة أن تساهم في تحسين عمليات إصلاح وصيانة الطرق، مع تحقيق جدوى تقنية واقتصادية مقارنة بالطرق التقليدية؟

وللإجابة عن هذه الإشكالية، اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي، من خلال مراجعة المراجع العلمية والدراسات الحديثة، وتحليل أهم مواد وتقنيات إصلاح الطرق، ثم تقديم دراسة تقنية واقتصادية لمشروع **RoadFix** باعتباره نموذجًا يعتمد على الحلول الذكية والمستدامة في مجال صيانة الطرقات.

وقد تم تقسيم هذا العمل إلى خمسة فصول رئيسية؛ حيث يتناول الفصل الأول أهم مواد البناء المستعملة في إصلاح الطرق وأنواع الأرصفة، بينما يعرض الفصل الثاني الحلول الذكية والمستدامة المعتمدة في هذا المجال. أما الفصل الثالث فيتطرق إلى أسباب تدهور الطرقات وأنواع الأضرار التي تصيبها، في حين يخصص الفصل الرابع للدراسة التقنية لمشروع **RoadFix**، ويختتم العمل بالفصل الخامس الذي يتضمن الدراسة الاقتصادية، وتحليل السوق والمنافسين، مع عرض الموقع الإلكتروني الخاص بالمشروع.

الفصل الأول

مواد البناء وأنواع الأرصفة في إصلاح وصيانة الطرقات

1.1مقدمة الفصل

تُعد مواد البناء وأنواع الأرصفة من الركائز الأساسية في تصميم وإنجاز وصيانة الطرقات، حيث تؤثر بشكل مباشر في جودة البنية التحتية وأدائها وعمرها الافتراضي. ويعتمد نجاح مشاريع إصلاح وصيانة الطرق على حسن اختيار المواد المستعملة، مع مراعاة خصائصها الميكانيكية والفيزيائية ومدى ملاءمتها لظروف الاستعمال المختلفة، بالإضافة إلى اختيار نوع الرصيف المناسب حسب طبيعة المرور والظروف المناخية والاقتصادية.

وتشهد تقنيات بناء وصيانة الطرق تطورًا مستمرًا بفضل ظهور مواد جديدة أكثر كفاءة واستدامة، إلى جانب تحسين خصائص المواد التقليدية بهدف رفع جودة الطرق وتقليل تكاليف الصيانة المستقبلية. كما تختلف أنواع الأرصفة من حيث مكوناتها وخصائصها التقنية ومجالات استعمالها، الأمر الذي يجعل فهم هذه الاختلافات ضروريًا لاختيار الحلول المناسبة لكل مشروع.

يهدف هذا الفصل إلى التعرف على أهم مواد البناء المستعملة في إصلاح وصيانة الطرقات، مع عرض خصائصها ومجالات استخدامها، ثم دراسة مختلف أنواع الأرصفة ومقارنة خصائصها ومميزاتها وعيوبها، من أجل إبراز دورها في تحسين أداء الطرق وضمان استدامتها.

1.2أهم مواد البناء المستعملة في إصلاح الطرقات

1.2.1 الاسفلت

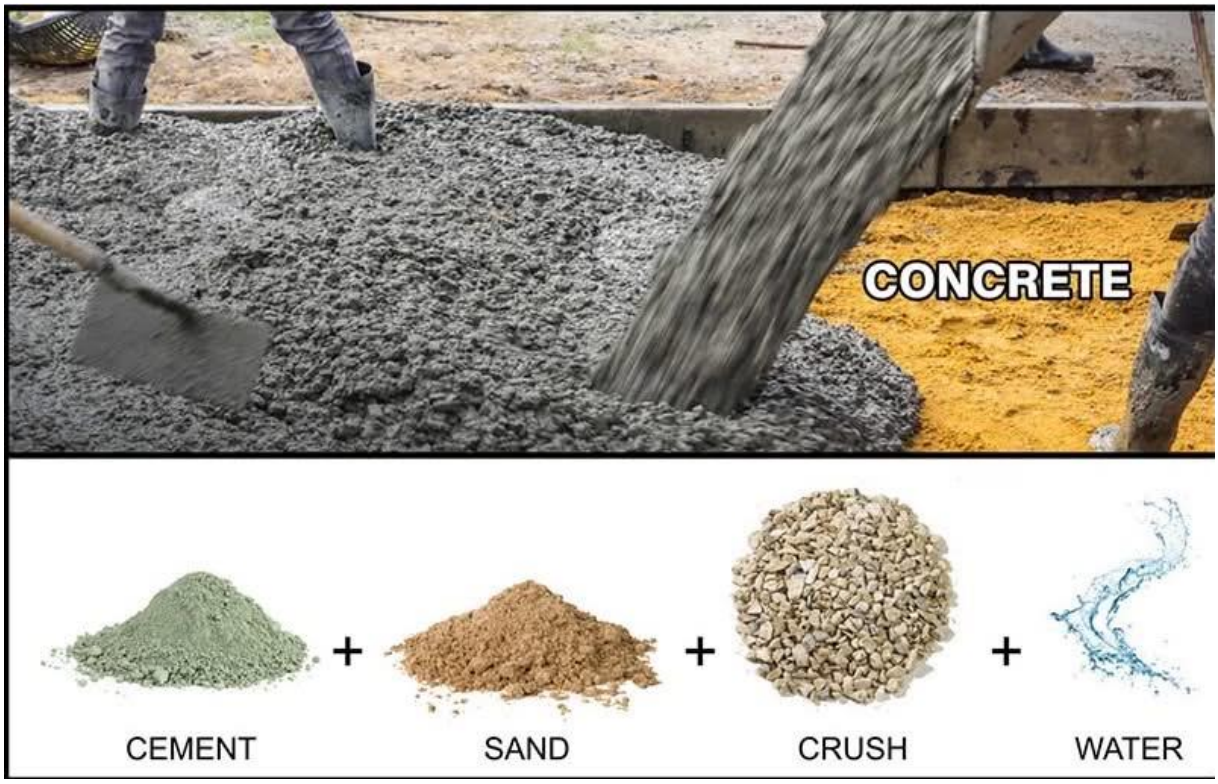
صورة 1 الاسفلت

يعد الاسفلت من اكثر المواد المستخدمة في تعبيد و اصلاح الطرقات حيث يتميز ب :

- مرونة عالية تسمح له بتحمل حركة المرور
- مقاومة جيدة للعوامل الجوية
- سهولة الإصلاح عند حدوث تشققات

يتم استعماله بشكل واسع في الطرق السريعة و الطرقات الحضرية .

1.2.2 الخرسانة اللأسمنتية



صورة 2 الخرسانة الاسمنتية

تستعمل الخرسانة في الطرق التي تتعرض لاحمال ثقيلة و تتميز ب :

مقاومة عالية للضغط

عمر خدمة طويل

صيانة اقل مقارنة بالاسفلت

لكنها اقل مرونة و قد تتشقق مع الزمن اذا لم تنفذ بشكل صحيح .

3.2.1 المواد المعاد تدويرها

اصبح الاتجاه الحديث في الهنسة المدنية يعتمد على إعادة تدوير المواد مثل :

الاسفلت القديم

بقايا الخرسانة

مواد صناعية معاد استخدامها

الهدف منها :

تقليل التكلفة

حماية البيئة

تحقيق استدامة في المشاريع

4.2.1 المواد المضافة

تستعمل بعض المواد لتحسين خصائص الاسفلت او الخرسانة مثل :

البوليمرات لتحسن المرونة

الالياف لزيادة المقاومة

مواد كيميائية لتحسين الالتساق

تلعب مواد البناء دورا أساسيا في نجاح عمليات اصلاح الطرقات حيث ان اختيار المادة المناسبة حسب نوع الطريق و ظروف الاستعمال يضمن جودة عالية و تقليل التكاليف المستقبلية.

3.1 أنواع الأرصفة

1.3.1 التصنيف العام

يمكن تصنيف الأرصفة حسب المواد المستعملة إلى عدة أنواع رئيسية، لكل نوع خصائص تقنية ومجال استعمال محدد

2.3.1 الأرصفة الخرسانية

الخصائص التقنية

تعتمد على مقاومة الضغط العالية للخرسانة
تُعتبر مقاومة الضغط من أهم الخصائص الميكانيكية التي تحدد جودة وأداء الرصيف الخرساني على المدى الطويل. فكلما ارتفعت هذه المقاومة، زادت قدرة الرصيف على تحمل الأحمال المتكررة الناتجة عن حركة المشاة والمركبات الخفيفة دون أن يظهر عليه أي تشوه أو انهيار. وتتراوح هذه المقاومة عادة ، ويتم التحكم فيها من خلال نسبة الخلط بين الإسمنت والحصى (MPa) بين 20 و30 ميغاباسكال .والرمل والماء

يمكن تنفيذها في شكل مصبوب في الموقع أو مسبق الصنع
مرونة كبيرة في التكيف مع أشكال الأرض غير (Béton coulé en place) يوفر التنفيذ في الموقع المنتظمة، إلا أنه يتطلب وقتًا أطول لضمان جودة الصب والتصلب. أما التنفيذ باستعمال عناصر مسبقة ، فيتميز بسرعة أكبر في التركيب وجودة تصنيع أفضل نظرًا لكونها (Béton préfabriqué) الصنع .تُنتج في ظروف مصنعية محكمة. ويختار المصمم بين الطريقتين حسب طبيعة المشروع والآجال المتاحة

سماكة الطبقة تختلف حسب الاستعمال
تتراوح سماكة الطبقة الخرسانية عادة بين 10 و20 سم، وتُحدَّد هذه السماكة بناءً على طبيعة الحمولة المتوقعة ونوع التربة الحاملة. ففي المناطق ذات الحركة الخفيفة يمكن الاكتفاء بسماكة أقل، بينما تتطلب

المناطق المعرضة لحمولات أثقل أو لحركة مركبات صيانة سماكة أكبر مصحوبة بطبقة أساس متينة من الحصى المدكوك لضمان توزيع جيد للأحمال.

المميزات

عمر افتراضي طويل

يمكن للرصيف الخرساني أن يستمر في الخدمة لمدة تتراوح بين 30 و40 سنة إذا ما تم تنفيذه وفق المعايير التقنية المطلوبة. وهذا العمر الطويل يجعله استثمارًا مربحًا على المدى البعيد رغم التكلفة الأولية المرتفعة، إذ يقلل من الحاجة إلى التدخلات المتكررة، ويوفر استقرارًا وظيفيًا وجماليًا للفضاء الحضري لعقود من الزمن.

مقاومة عالية للأحمال والتآكل

بفضل صلابة المادة الخرسانية، يستطيع هذا النوع من الأرصفة تحمل الاحتكاك المستمر الناتج عن حركة المشاة الكثيفة، وكذا مرور بعض المركبات الخفيفة أو آليات الصيانة دون أن يتأثر سطحه بسرعة. كما يبدي مقاومة جيدة للعوامل الجوية القاسية كالأمطار الغزيرة والصقيع، مما يجعله خيارًا مناسبًا للمناطق ذات المناخ المتقلب.

تحتاج إلى صيانة قليلة

مقارنة بالأنواع الأخرى من الأرصفة، فإن الرصيف الخرساني لا يتطلب تدخلات صيانة متكررة، مما ينعكس إيجابًا على التكلفة الإجمالية للمشروع على المدى الطويل (Coût global). فبمجرد إنجازه بشكل سليم، يمكن أن يبقى لسنوات طويلة دون الحاجة لأي إصلاحات جوهرية، سوى بعض أعمال التنظيف الدورية البسيطة.

العيوب

تكلفة إنجاز أولية مرتفعة

يتطلب إنجاز الرصيف الخرساني استثمارًا ماديًا كبيرًا مقارنة بالأنواع الأخرى كالإسفلت، وذلك بسبب تكلفة المواد الأولية (الإسمنت، التسليح المعدني) وكذا اليد العاملة المتخصصة اللازمة لضمان جودة الصب والمعالجة. وهذا ما يجعل هذا النوع أقل ملاءمة للمشاريع ذات الميزانية المحدودة، رغم ما يقدمه من عمر خدمة طويل يعوض هذه التكلفة على المدى البعيد.

قابلة للتشقق نتيجة التغيرات الحرارية

تتعرض الخرسانة لظاهرة التمدد والتقلص نتيجة التغيرات الحرارية اليومية والموسمية، وهو ما قد يؤدي إلى ظهور تشققات إذا لم يتم التحكم في هذه الظاهرة بشكل جيد. ولتفادي هذه المشكلة، يُلجأ عادة إلى تصميم فواصل تمدد (Joints de dilatation) بشكل دوري على طول الرصيف، تسمح بامتصاص هذه الحركة دون التأثير على سلامة البنية.

إصلاحها صعب نسبياً

على عكس الأرصفة المبلطة التي يسهل فيها استبدال الأجزاء التالفة، فإن إصلاح الرصيف الخرساني يتطلب غالبًا إزالة الجزء المتضرر بالكامل باستعمال معدات خاصة، ثم إعادة الصب من جديد. وهذه العملية تستغرق وقتًا أطول وتكلفة إضافية، كما قد تؤدي إلى اختلاف لوني أو ملمسي بين الجزء المُصلح والجزء الأصلي.

المشاكل الشائعة

(Fissuration) التشققات السطحية

تظهر هذه التشققات غالبًا نتيجة ضعف في تصميم أو تنفيذ فواصل التمدد، أو بسبب استعمال خلطة خرسانية غير متجانسة أثناء الصب. كما يمكن أن تنتج عن الانكماش الطبيعي للخرسانة أثناء مرحلة التصلب الأولى، خاصة في الظروف المناخية الحارة والجافة التي تسرّع من فقدان الرطوبة.

الهبوط نتيجة ضعف التربة

عندما لا يتم تحضير طبقة الأساس بشكل كافٍ، أو عندما تكون التربة الحاملة ضعيفة أو غير مستقرة، فإن الرصيف الخرساني قد يتعرض لظاهرة الهبوط الموضعي (Tassement). وهذه الظاهرة تؤدي إلى عدم استواء السطح، وقد تشكل خطرًا على سلامة المشاة إذا لم يتم رصدها وإصلاحها في الوقت المناسب.

تآكل السطح مع الزمن

رغم متانة الخرسانة، فإن الاحتكاك المستمر والمتكرر الناتج عن حركة المشاة الكثيفة، إضافة إلى تأثير العوامل الجوية كالأمطار الحمضية أو دورات التجمد والذوبان، قد يؤدي مع مرور الوقت إلى تآكل تدريجي في الطبقة السطحية، مما يستدعي أحيانًا أعمال تجديد أو معالجة سطحية.

3.3.1 الأرصفة الأسفلتية

الخصائص التقنية

طبقة مرنة مقارنة بالخرسانة

تتميز الخلطة البيتومينية بمرونة نسبية تسمح لها بامتصاص الاهتزازات الطفيفة وحركة التربة دون أن يظهر عليها تشقق فوري، على عكس الخرسانة التي تتصرف كمادة صلبة وهشة نسبيًا. وهذه المرونة تجعل الرصيف الأسفلتي أكثر تكيفًا مع الحركات الأرضية البسيطة الناتجة عن التغيرات الحرارية أو الرطوبة.

سهلة التنفيذ والصيانة

يمكن إنجاز الرصيف الأسفلتي بسرعة كبيرة باستعمال معدات متخصصة، كما يمكن إصلاح الأجزاء التالفة منه بشكل موضعي دون الحاجة إلى إزالة الطبقة بأكملها، وهو ما يميزه عن الرصيف الخرساني. وهذه السهولة في التدخل تقلل من مدة الأشغال وتكلفتها، وتجعله خيارًا عمليًا للمناطق ذات الحركة المستمرة.

تستعمل بكثرة في المشاريع السريعة

نظرًا لسرعة إنجازها وانخفاض تكلفتها، تُعتمد الأرصفة الأسفلتية بشكل واسع في المشاريع التي تتطلب آجال تنفيذ قصيرة، كالمشاريع المؤقتة أو تلك ذات الميزانية المحدودة. كما تُستعمل في المناطق التي تشهد حركة مرورية وراجلة متوسطة، حيث لا تستدعي الحاجة إلى متانة الخرسانة أو جمالية البلاط.

المميزات

تكلفة منخفضة نسبياً

تُعتبر التكلفة المنخفضة من أبرز أسباب انتشار الأرصفة الأسفلتية، سواء من حيث ثمن المواد الأولية (البيتومين والحصى) أو من حيث تكلفة اليد العاملة والمعدات اللازمة للتنفيذ. وهذا ما يجعلها خيارًا مفضلاً لدى الجماعات المحلية ذات الميزانيات المحدودة، خاصة في المشاريع واسعة النطاق.

سرعة الإنجاز

يمكن فتح الرصيف الأسفلتي للاستعمال بعد مدة زمنية قصيرة نسبيًا من التبريد والتصلب، على عكس (Cure) الخرسانة التي تتطلب فترة معالجة قد تمتد لعدة أيام. وهذه السرعة في الإنجاز تجعله مناسبًا جدًا للمشاريع التي تخضع لضغط زمني، أو التي تتطلب تقليل مدة إغلاق المسالك أمام المستعملين.

سطح مريح للمشي

بفضل مرونته النسبية وملمسه الناعم، يوفر الرصيف الأسفلتي إحساسًا مريحًا أثناء المشي مقارنة بالأسطح الصلبة كالخرسانة أو الحجر. وهذه الراحة تجعله خيارًا مفضلاً في المناطق ذات الحركة الراجلة الكثيفة، كالممرات الطويلة أو المناطق التجارية.

العيوب

عمر خدمة متوسط

مقارنة بالخرسانة أو الحجر، يتميز الرصيف الأسفلتي بعمر افتراضي أقصر، يتراوح عادة بين 10 و15 سنة فقط قبل أن تظهر عليه علامات التدهور الواضحة. وهذا العمر المحدود ناتج عن طبيعة المادة البيتومينية التي تفقد تدريجيًا خصائصها الميكانيكية تحت تأثير العوامل الجوية والاحتكاك المستمر.

تتأثر بالحرارة العالية

تُعتبر الحساسية للحرارة من أبرز نقاط الضعف في هذا النوع من الأرصفة، إذ تلين المادة البيتومينية في درجات الحرارة المرتفعة، مما قد يؤدي إلى تشوهات في الشكل أو انطباع آثار على السطح. وهذه الظاهرة تتفاقم في المناطق ذات المناخ الحار والجاف، مما يستدعي اختيار خلطات بيتومينية مقاومة للحرارة في مثل هذه الحالات.

تحتاج إلى صيانة دورية متكررة

على عكس الخرسانة، يتطلب الرصيف الأسفلتي تدخلات صيانة منتظمة للحفاظ على استوائه ومظهره، سواء من خلال ترميم الحفر الصغيرة أو إعادة تسوية السطح بشكل دوري. وهذه الصيانة المتكررة تزيد من التكلفة الإجمالية على المدى الطويل، رغم انخفاض التكلفة الأولية للإنجاز.

المشاكل الشائعة

التشوهات السطحية

غالبًا في المناطق ذات الحركة الكثيفة أو تحت تأثير الأحمال (Déformations) تظهر هذه التشوهات المتكررة، حيث تفقد المادة البيتومينية تدريجيًا قدرتها على استعادة شكلها الأصلي. وتتفاقم هذه الظاهرة في فترات الحرارة المرتفعة، حين تصبح الخلطة أكثر ليونة وعرضة للتشوه تحت الضغط.

ظهور الحفر الصغيرة

عادة عن تسرب مياه الأمطار إلى الطبقات السفلى للرصيف، مما (Nids-de-poule) تنتج هذه الحفر يضعف طبقة الأساس ويؤدي إلى انهيار موضعي في السطح. وإذا لم يتم رصد هذه الحفر وإصلاحها في وقت مبكر، فإنها تتوسع بسرعة وتشكل خطرًا على سلامة المشاة والمركبات على حد سواء.

الذوبان في فترات الحرارة المرتفعة

في المناطق ذات المناخ الحار جدًا، قد تصل درجة حرارة سطح الرصيف الأسفلتي إلى مستويات تجعل المادة البيتومينية شبه سائلة، مما يؤدي إلى انطباع آثار الأحذية أو العجلات على السطح. وهذه الظاهرة لا تؤثر فقط على المظهر الجمالي، بل قد تضعف أيضًا البنية الميكانيكية للرصيف على المدى الطويل.

4.3.1 الأرصفة المبلطة

الخصائص التقنية

نظام وحدات صغيرة (Éléments modulaires)
يعتمد هذا النوع من الأرصفة على تجميع عدد كبير من الوحدات الصغيرة (البلاط) بدل استعمال طبقة متجانسة واحدة كما هو الحال في الخرسانة أو الإسفلت. وهذا النظام المعياري يمنح المصمم حرية كبيرة في اختيار الأشكال والأحجام والألوان، كما يسهل عملية التركيب والتفكيك عند الحاجة.

يسمح بإعادة الترتيب بسهولة
من أبرز مميزات النظام المعياري للبلاط هو إمكانية تفكيك وإعادة تركيب الوحدات دون إتلافها، وهو ما يسهل كثيرًا التدخل عند الحاجة لأشغال الشبكات تحت الأرضية كالمياه والكهرباء والاتصالات. وبعد الانتهاء من هذه الأشغال، يمكن إعادة وضع نفس البلاط في مكانه الأصلي دون التأثير على المظهر العام للرصيف.

يعتمد على طبقة رملية للتثبيت
تسمح بتوزيع منتظم للأحمال وتسهل عملية (Lit de pose) يُوضع البلاط فوق طبقة رملية دقيقة التسوية، وتُوضع هذه الطبقة بدورها فوق طبقة أساس من الحصى المدكوك لضمان استقرار الرصيف على المدى الطويل. وتُعتبر جودة تحضير هاتين الطبقتين عاملاً حاسمًا في استقرار البلاط ومنع تحركه مستقبلاً.

المميزات

مظهر جمالي عالي
يوفر البلاط إمكانيات تصميمية واسعة من حيث الألوان والأشكال الهندسية والترتيبات، مما يسمح بإنشاء تكوينات بصرية جذابة تتناسب مع الطابع المعماري للمكان. وهذا التنوع الجمالي يجعله خيارًا مفضلاً في المشاريع التي تولي أهمية كبيرة للمظهر العام والهوية البصرية للفضاء الحضري.

سهولة استبدال الأجزاء التالفة
على عكس الخرسانة أو الإسفلت اللذين يتطلبان تدخلات واسعة عند التلف، يمكن في حالة البلاط استبدال الوحدات المتضررة بشكل موضعي وسريع دون التأثير على باقي الرصيف. وهذه الخاصية تقلل بشكل كبير من تكلفة ومدة أعمال الصيانة، وتحافظ في نفس الوقت على المظهر الجمالي العام.

مناسب للمناطق السياحية والمراكز الحضرية
بفضل جماليته وتنوعه، يُعتبر البلاط خيارًا مثاليًا للفضاءات التي تستقطب حركة كبيرة من الزوار، كالساحات العمومية والمراكز التاريخية والمناطق التجارية. فهو يساهم في خلق هوية بصرية مميزة للمكان، ويعزز من جاذبيته السياحية والعمرانية.

العيوب

احتمال تحرك البلاط مع الزمن
قد يتعرض البلاط لظاهرة الانزلاق أو التحرك التدريجي عن موضعه الأصلي، خاصة إذا كانت طبقة التثبيت الرملية غير كافية أو إذا تعرض الرصيف لحمولات متكررة تفوق قدرته التصميمية. وهذه الظاهرة تتطلب تدخلات صيانة دورية لإعادة ضبط البلاط المتحرك ومنع تفاقم المشكلة.

عدم استواء السطح إذا لم يتم التنفيذ بشكل جيد
يتطلب تركيب البلاط دقة عالية في التسوية والمحاذاة، وأي خلل في هذه المرحلة قد يؤدي إلى وجود فروقات في مستوى السطح بين الوحدات المتجاورة. وهذا عدم الاستواء لا يؤثر فقط على المظهر الجمالي، بل قد يشكل أيضًا خطرًا حقيقيًا على سلامة المشاة، خاصة كبار السن وذوي الاحتياجات الخاصة.

يحتاج إلى صيانة دورية
رغم سهولة استبدال الأجزاء التالفة، فإن الرصيف المبلط يتطلب متابعة دورية للتأكد من استقرار الوحدات ونظافة الفواصل بينها. وإهمال هذه الصيانة قد يؤدي إلى تراكم مشاكل متعددة كتحرك البلاط وتجمع الأوساخ، مما يزيد من تكلفة التدخل لاحقًا.

المشاكل الشائعة

تجمع مياه الأمطار بين الفواصل
نتيجة وجود فواصل بين وحدات البلاط، قد تتجمع مياه الأمطار في هذه الفراغات إذا لم يتم تصميم انحدار كافٍ لتصريف المياه أو إذا انسدت فتحات التصريف بمرور الوقت. وهذا التجمع قد يؤدي إلى تكون برك مائية تشكل إزعاجًا للمشاة، وقد يساهم أيضًا في إضعاف طبقة التثبيت الرملية تدريجيًا.

انفصال بعض الحجارة
قد تنفصل بعض وحدات البلاط عن موضعها نتيجة ضعف التثبيت الأولي أو تحت تأثير الحمولات المتكررة والعوامل الجوية كالتجمد والذوبان. وهذا الانفصال يترك فراغات في سطح الرصيف قد تشكل خطر تعثر للمشاة، ويستدعي تدخلاً سريعًا لإعادة وضع الوحدات المتضررة.

عدم الاستقرار مع الزمن
في حال عدم تحضير طبقات الأساس والتثبيت بشكل سليم منذ البداية، فإن الرصيف المبلط قد يفقد استقراره تدريجيًا مع مرور الوقت، وتظهر عليه علامات عدم الانتظام كالتموجات الطفيفة أو الفروقات في المستوى. وهذه الظاهرة تتطلب أعمال إعادة تسوية شاملة قد تكون مكلفة إذا تُركت دون معالجة لفترة طويلة.

5.3.1 الأرصفة الحجرية

الخصائص التقنية

مواد طبيعية (Granite, Basalte…)
تُستعمل في هذا النوع من الأرصفة أحجار طبيعية صلبة كالغرانيت والبازلت، وهي مواد معروفة بمقاومتها الميكانيكية العالية وثباتها عبر الزمن. وعلى عكس المواد المصنعة كالخرسانة أو الإسفلت، فإن هذه الأحجار لا تخضع لعمليات كيميائية معقدة، بل تُستخرج وتُشكَّل مباشرة من الطبيعة، مما يمنحها خصائص فريدة من حيث المتانة والمظهر.

مقاومة عالية جداً للعوامل الجوية
تتميز الأحجار الطبيعية بقدرة استثنائية على تحمل التقلبات المناخية القاسية، بما فيها دورات التجمد والذوبان المتكررة، والتعرض المستمر للأشعة الشمسية والأمطار الحمضية. وهذه المقاومة العالية تجعلها

الخيار الأمثل للمناطق ذات المناخ القاسي أو المتقلب، حيث تفشل المواد الأخرى في الصمود لفترات طويلة.

تركيب يدوي دقيق
يتطلب تركيب الأحجار الطبيعية مهارة يدوية عالية ومعرفة تقنية دقيقة، إذ يجب على العامل المتخصص ضبط كل حجرة بشكل فردي لضمان استواء السطح وتناسق الفواصل. وهذه العملية اليدوية المعقدة تستغرق وقتًا أطول بكثير مقارنة بالطرق الآلية المستعملة في إنجاز الأرصفة الخرسانية أو الأسفلتية.

المميزات

متانة كبيرة جداً
تُعتبر الأرصفة الحجرية من أكثر الأنواع متانة على الإطلاق، إذ يمكن لهذه الأحجار أن تصمد لعقود بل قرون دون أن تفقد خصائصها الأساسية، كما تشهد على ذلك العديد من الأرصفة التاريخية التي لا تزال قائمة حتى اليوم. وهذه المتانة الاستثنائية تجعلها استثمارًا طويل الأمد رغم التكلفة المرتفعة.

مقاومة عالية للتآكل
بفضل صلابتها الطبيعية، تُظهر الأحجار مقاومة قوية للاحتكاك المستمر الناتج عن حركة المشاة الكثيفة على مر السنين، دون أن تفقد شكلها أو ملمسها بسهولة. وهذه الخاصية تجعلها مناسبة جدًا للفضاءات ذات الحركة العالية والاستعمال المكثف على المدى الطويل.

طابع جمالي تقليدي
تضفي الأرصفة الحجرية طابعًا جماليًا أصيلاً وتراثيًا على الفضاء الحضري، إذ ترتبط في الذاكرة الجماعية بالمناطق التاريخية والعمارة التقليدية. وهذا الطابع الجمالي المميز يجعلها خيارًا مفضلاً في المشاريع التي تهدف إلى الحفاظ على الهوية المعمارية للمكان أو إبراز قيمته التراثية.

العيوب

تكلفة مرتفعة جداً
تُعتبر الأرصفة الحجرية الأكثر تكلفة بين جميع الأنواع، سواء من حيث ثمن المادة الأولية التي تتطلب استخراجًا وتشكيلاً دقيقًا، أو من حيث اليد العاملة المتخصصة اللازمة للتركيب اليدوي. وهذه التكلفة المرتفعة تجعلها خيارًا محدودًا للمشاريع ذات الطابع الخاص أو التراثي، وليس للاستعمال الواسع في المناطق الحضرية العادية.

صعوبة في التنفيذ
يتطلب إنجاز الرصيف الحجري وقتًا طويلاً ومهارة تقنية عالية، نظرًا لضرورة ضبط كل حجرة يدويًا لضمان استواء السطح وتناسق الفواصل بينها. وهذه الصعوبة في التنفيذ تجعل هذا النوع أقل ملاءمة للمشاريع التي تخضع لضغط زمني، أو التي تتطلب إنجازًا سريعًا وواسع النطاق.

سطح غير مريح أحيانًا للمشي
في بعض الأنواع التقليدية من الأحجار، قد يكون السطح غير منتظم أو خشنًا نسبيًا، مما يجعل المشي عليه أقل راحة مقارنة بالأسطح الملساء كالإسفلت أو الخرسانة الناعمة. وهذا الأمر قد يشكل تحديًا خاصًا بالنسبة لكبار السن أو ذوي الاحتياجات الخاصة، مما يستدعي دراسة دقيقة عند اختيار نوع الحجر ومعالجته.

6.3.1 مقرنة بين أنواع الأرصفة

بعد استعراض خصائص ومميزات وعيوب كل نوع من أنواع الأرصفة، يمكن استخلاص أهم الفروقات الجوهرية بينها، والتي تُشكل أساسًا يعتمد عليه المصمم عند اختيار النوع الأنسب لكل مشروع:

الخرسانة: الأفضل من حيث المتانة
تتصدر الأرصفة الخرسانية باقي الأنواع من حيث المتانة الميكانيكية والقدرة على تحمل الأحمال المتكررة والعوامل الجوية القاسية على المدى الطويل. فبفضل مقاومة الضغط العالية للخرسانة، وإمكانية تسليحها عند الحاجة، يمكن لهذا النوع أن يخدم لعقود دون أن يفقد خصائصه الأساسية، مما يجعله الخيار الأمثل في المشاريع التي تُعطي الأولوية للاستقرار والمقاومة على حساب التكلفة الأولية المرتفعة.

الإسفلت: الأفضل من حيث التكلفة والسرعة
يتفوق الرصيف الأسفلتي على باقي الأنواع من حيث انخفاض التكلفة وسرعة الإنجاز، وهو ما يجعله الخيار الأكثر عملية في المشاريع ذات الميزانية المحدودة أو التي تخضع لضغط زمني. فبفضل سهولة تنفيذه وصيانته الموضعية، يمكن فتحه للاستعمال في مدة قصيرة نسبيًا، رغم أن هذا يأتي على حساب العمر الافتراضي الذي يبقى أقل مقارنة بالخرسانة أو الحجر.

البلاط: الأفضل من حيث الجمالية
يمتاز الرصيف المبلط بقدرته الكبيرة على تحقيق تناسق بصري وجمالي عالٍ، وذلك بفضل النظام المعياري لوحداته الذي يسمح بالتنويع في الألوان والأشكال والترتيبات الهندسية. وهذه الخاصية تجعله الخيار المفضل في الفضاءات التي تُولي أهمية خاصة للمظهر العام، كالساحات العمومية والمراكز التجارية والمناطق ذات الطابع السياحي، رغم أنه يتطلب صيانة دورية أكبر مقارنة بالخرسانة.

الحجر: الأفضل من حيث العمر الطويل
يُعتبر الرصيف الحجري الأكثر تفوقًا من حيث طول العمر الافتراضي، إذ يمكن للأحجار الطبيعية كالغرانيت والبازلت أن تصمد لقرون دون أن تفقد خصائصها الميكانيكية أو مظهرها الجمالي، كما تشهد على ذلك الأرصفة التاريخية القائمة حتى اليوم. غير أن هذا العمر الطويل يأتي بمقابل تكلفة إنجاز مرتفعة جدًا وصعوبة كبيرة في التنفيذ، مما يجعله خيارًا محدودًا للمشاريع ذات الطابع التراثي أو الخاص.

وعليه، يتبين أن كل نوع من هذه الأنواع يتميز بنقطة قوة محورية تجعله الأنسب في سياق معين، في حين قد يكون أقل ملاءمة في سياقات أخرى. وهذا التباين في الأداء بين الأنواع الأربعة هو ما يفرض على المصمم إجراء دراسة مقارنة دقيقة لكل مشروع على حدة، مع الأخذ بعين الاعتبار طبيعة الموقع والميزانية المتاحة والأهداف الوظيفية والجمالية المرجوة.

الخاتمة 4.1

من خلال الدراسة المفصلة لمختلف أنواع الأرصفة، يتضح جليًا أن اختيار النوع المناسب لا يمكن أن يخضع لمعيار واحد أو قرار عشوائي، بل يستدعي موازنة دقيقة ومدروسة بين عدة عوامل متداخلة. فمن جهة، تفرض التكلفة الأولية وتكلفة الصيانة على المدى الطويل قيودًا مالية يجب أخذها بعين الاعتبار، خاصة في المشاريع ذات الميزانيات المحدودة. ومن جهة أخرى، تلعب المتانة ومقاومة العوامل الجوية والحمولات المرورية دورًا حاسمًا في ضمان استدامة المنشأة وتقليل الحاجة إلى التدخلات المتكررة.

كما لا يمكن إغفال البعد الجمالي، الذي يكتسي أهمية خاصة في الفضاءات ذات الطابع السياحي أو التاريخي أو التجاري، حيث يساهم اختيار النوع المناسب من الرصيف في إبراز الهوية البصرية والمعمارية للمكان. وأخيرًا، تبقى ظروف الاستعمال، من حيث كثافة الحركة الراجلة والمرورية، طبيعة التربة، والمناخ السائد في المنطقة، عوامل حاسمة تحدد مدى ملاءمة كل نوع من الأرصفة .لموقع معين

لذلك، فإن دراسة كل مشروع على حدة تبقى الخطوة الأساسية والضرورية قبل اتخاذ القرار النهائي بشأن نوع الرصيف المعتمد، إذ لا يوجد نوع "مثالي" بشكل مطلق، بل يوجد نوع مناسب لكل سياق وكل مجموعة من المعطيات التقنية والمالية والجمالية الخاصة بالمشروع. وهذا ما يفرض على المصمم والمخطط العمراني اعتماد مقاربة شمولية ومتكاملة، تأخذ بعين الاعتبار جميع هذه الأبعاد لضمان تحقيق التوازن الأمثل بين الأداء الوظيفي، الاستدامة الاقتصادية، والقيمة الجمالية للفضاء الحضر

الفصل الثانى

الحلول الذكية والمستدامة في اصلاح الطرقات

1.2مقدمة الفصل

شهد قطاع البنية التحتية والطرقات في السنوات الأخيرة تطورًا كبيرًا نتيجة التقدم التكنولوجي والزيادة المستمرة في حركة المرور والنقل. وقد أصبحت الطرقات عنصرًا أساسيًا في التنمية الاقتصادية والاجتماعية، مما جعل صيانتها وتحسين جودتها أمرًا ضروريًا لضمان سلامة مستعملي الطريق وتقليل الخسائر الاقتصادية الناتجة عن تدهور الشبكات الطرقية.

تعتمد الطرق التقليدية في الصيانة والإصلاح على أساليب قديمة تستهلك كميات كبيرة من المواد والطاقة، كما أنها تؤدي في كثير من الأحيان إلى تكاليف مرتفعة وتأثيرات سلبية على البيئة. ومع تزايد الاهتمام العالمي بالتنمية المستدامة، ظهرت الحاجة إلى اعتماد حلول ذكية ومستدامة تسمح بتحسين جودة الطرقات مع تقليل الأضرار البيئية والاقتصادية.

تشمل هذه الحلول استخدام مواد صديقة للبيئة وتقنيات حديثة تعتمد على التكنولوجيا الرقمية والذكاء الاصطناعي وأجهزة الاستشعار، بهدف الكشف المبكر عن الأعطال وتحسين عمليات الصيانة. كما تسمح هذه التقنيات بإطالة العمر الافتراضي للطرقات وتقليل استهلاك الموارد الطبيعية، مما يساهم في تحقيق تنمية عمرانية أكثر استدامة.

وتعتبر الطرق الذكية من أهم الابتكارات الحديثة في مجال الهندسة المدنية، حيث تعتمد على أنظمة متطورة لمراقبة حالة الطريق وتحليل البيانات الخاصة بحركة المرور والظروف المناخية. وتساعد هذه الأنظمة في اتخاذ قرارات دقيقة وسريعة تخص عمليات الإصلاح والصيانة، مما يرفع من مستوى السلامة المرورية ويقلل من التكاليف المستقبلية.

في هذا الفصل سيتم التطرق إلى أهم الحلول الذكية والمستدامة المستخدمة في إصلاح الطرقات، مع دراسة مختلف التقنيات الحديثة والمواد المستعملة، إضافة إلى إبراز دور مشروع "RoadFix" في تقديم حلول مبتكرة لتحسين جودة البنية التحتية الطرقية بطريقة اقتصادية وصديقة للبيئة.

الصورة 3 طرق حديثة

1.2 المواد المستدامة المستعملة في اصلاح الطرقات

تُعتبر المواد المستدامة من أهم العناصر التي ساهمت في تطوير قطاع إصلاح وصيانة الطرقات، حيث تهدف هذه المواد إلى تقليل التأثير البيئي الناتج عن استعمال الموارد الطبيعية التقليدية، مع الحفاظ على جودة وأداء عالي للطرقات. وقد أصبح الاتجاه العالمي اليوم يركز على إعادة التدوير واستعمال مواد بديلة أكثر كفاءة وأقل تكلفة.

1.2.2إعادة تدوير الإسفلت(RAP)

يُعد إعادة تدوير الإسفلت (Recyclage de l'Asphalte, RAP) من أكثر الحلول استعمالًا في مجال صيانة الطرقات والأرصفة، حيث يتم استرجاع الطبقات الإسفلتية القديمة المتضررة أو المزالة أثناء أشغال الترميم، ثم إعادة معالجتها ميكانيكيًا وحراريًا لاستعمالها من جديد كمادة أولية في مشاريع الإصلاح أو الإنجاز الجديد. ويندرج هذا الأسلوب ضمن التوجه العالمي نحو اقتصاد دائري (Économie circulaire)في قطاع الأشغال العمومية، يهدف إلى تقليل الاعتماد على الموارد الطبيعية غير المتجددة.

تقليل استهلاك المواد الأولية مثل الحصى والبيتومين
يسمح استعمال الإسفلت المعاد تدويره بتقليص الكميات المستخرجة من المقالع والمصانع لإنتاج مواد جديدة، وذلك من خلال إعادة إدماج نفس المواد المستعملة سابقًا في الخلطة الجديدة. وهذا التقليل في استهلاك الموارد الطبيعية غير المتجددة كالحصى والبيتومين يساهم بشكل مباشر في الحفاظ على البيئة وتقليل الضغط على المقالع، كما يقلل من الحاجة لعمليات النقل الطويلة للمواد الأولية.

خفض التكاليف الإجمالية للمشاريع
بما أن المواد المعاد تدويرها تتوفر غالبًا في موقع الأشغال نفسه أو بالقرب منه، فإن تكلفة الحصول عليها ونقلها تكون أقل بكثير مقارنة بشراء مواد جديدة من مصادر بعيدة. وهذا الانخفاض في التكلفة الإجمالية يجعل من إعادة التدوير خيارًا اقتصاديًا جذابًا، خاصة بالنسبة للجماعات المحلية والمشاريع ذات الميزانيات المحدودة التي تسعى لتحقيق أقصى استفادة من مواردها المالية.

تقليل النفايات الناتجة عن إزالة الطبقات القديمة
بدلًا من التخلص من الطبقات الإسفلتية القديمة في مطارح النفايات، وهو ما يستدعي مساحات تخزين كبيرة ويشكل عبئًا بيئيًا، يتم إعادة توظيف هذه المواد بشكل مباشر في مشاريع جديدة. وهذه الممارسة تنسجم مع مبادئ التنمية المستدامة، وتقلل بشكل ملحوظ من حجم النفايات الصلبة الناتجة عن قطاع البناء والأشغال العمومية.

الحفاظ على نفس مستوى الجودة في بعض الحالات
أظهرت العديد من الدراسات التقنية أنه عند اتباع بروتوكولات معالجة دقيقة، يمكن للخلطات المعاد تدويرها أن تحافظ على خصائص ميكانيكية مماثلة لتلك المصنوعة من مواد جديدة بالكامل، خاصة عند دمجها بنسب محسوبة مع نسبة معينة من المواد الجديدة. وهذا ما يفتح المجال لاستعمال هذه التقنية في مشاريع ذات أهمية دون التنازل عن معايير الجودة والمتانة المطلوبة.

2.2.2البلاستيك المعاد تدويره

أصبح إدخال البلاستيك المعاد تدويره في صناعة الطرقات من الابتكارات الحديثة التي تشهد اهتمامًا متزايدًا على المستوى العالمي، حيث يتم طحن النفايات البلاستيكية إلى حبيبات دقيقة ثم دمجها مع الخلطة الإسفلتية بنسب محسوبة أثناء عملية التصنيع، وذلك بهدف تحسين الخصائص التقنية للطريق مع الاستفادة من هذه النفايات بدل التخلص منها.

تحسين مقاومة الطريق للتشققات

تساهم إضافة البلاستيك المعاد تدويره في تعزيز البنية الداخلية للخلطة الإسفلتية، حيث تعمل الجزيئات البلاستيكية كرابط إضافي يحسن من تماسك المكونات ويقلل من احتمالية ظهور التشققات الناتجة عن الإجهادات المتكررة. وهذا التحسن في المقاومة يطيل من فترة صلاحية الطريق قبل ظهور أولى علامات التدهور.

زيادة المرونة والمتانة

يمنح البلاستيك الخلطة الإسفلتية مرونة إضافية تسمح لها بامتصاص الحركات الطفيفة والاهتزازات الناتجة عن حركة المرور دون أن تتشوه بسرعة، كما يزيد من متانتها العامة أمام العوامل الجوية المختلفة. وهذه الخاصية تجعل الطرق المعالجة بهذه التقنية أكثر قدرة على تحمل الظروف المناخية القاسية والتغيرات الحرارية المتكررة.

تقليل التلوث البلاستيكي في البيئة

يساهم استعمال هذه التقنية في معالجة إحدى أخطر المشاكل البيئية المعاصرة، وهي تراكم النفايات البلاستيكية التي تستغرق مئات السنين للتحلل الطبيعي. فمن خلال توظيف هذه النفايات في قطاع الطرقات، يتم تحويلها من مصدر تلوث إلى مورد نافع، مما يساهم في تخفيف الضغط على البيئة والمطارح العمومية.

رفع العمر الافتراضي للطريق

نتيجة التحسينات التي يُدخلها البلاستيك على الخصائص الميكانيكية للخلطة الإسفلتية، من مقاومة للتشقق ومرونة أعلى، يرتفع العمر الافتراضي للطريق بشكل ملحوظ مقارنة بالخلطات التقليدية. وهذا الارتفاع في العمر الافتراضي ينعكس إيجابًا على التكلفة الإجمالية للصيانة على المدى الطويل، رغم أن التكلفة الأولية قد تكون أعلى بقليل بسبب معالجة البلاستيك.

3.2.2الإطارات المطاطية المستعملة

يتم إعادة تدوير الإطارات القديمة من خلال طحنها إلى حبيبات مطاطية دقيقة (Granulats de caoutchouc)، ثم إدخالها إما في الخلطة الإسفلتية نفسها أو استخدامها في طبقات معينة من الطريق، كطبقة عازلة للاهتزازات أو طبقة سطحية مضادة للضجيج. وتُعرف هذه التقنية عالميًا باسم "الإسفلت المطاطي.(Asphalte caoutchouté) "

تحسين امتصاص الصدمات

تعمل الجزيئات المطاطية المدمجة في الخلطة كممتص طبيعي للصدمات والاهتزازات الناتجة عن مرور المركبات، مما يقلل من الإجهادات المنقولة إلى الطبقات السفلى للطريق. وهذا الامتصاص الجيد للصدمات يساهم في إطالة عمر البنية التحتية ويقلل من سرعة ظهور التشققات والتشوهات السطحية.

تقليل الضجيج المروري

من أبرز الفوائد التي أثبتتها الدراسات الميدانية هي القدرة على تقليل مستوى الضجيج الناتج عن احتكاك الإطارات بسطح الطريق، وذلك بفضل الخصائص الماصة للصوت التي يتميز بها المطاط. وهذه الخاصية تجعل هذه التقنية مفيدة بشكل خاص في المناطق الحضرية الكثيفة السكان، حيث يشكل الضجيج المروري مصدر إزعاج كبير للسكان.

رفع مقاومة التآكل

يضفي المطاط المعاد تدويره مرونة إضافية على سطح الطريق تجعله أكثر مقاومة للتآكل الناتج عن الاحتكاك المستمر مع عجلات المركبات، خاصة في المناطق ذات الحركة المرورية الكثيفة. وهذه المقاومة العالية للتآكل تقلل من الحاجة إلى تدخلات صيانة متكررة، مما ينعكس إيجابًا على التكلفة الإجمالية للمشروع.

حل لمشكل النفايات المطاطية

تُعتبر الإطارات المستعملة من أكثر أنواع النفايات صعوبة في المعالجة، نظرًا لحجمها الكبير ومقاومتها للتحلل الطبيعي، مما يجعل تراكمها في المطارح مشكلة بيئية حقيقية. ومن خلال إعادة توظيف هذه الإطارات في قطاع الطرقات، يتم إيجاد حل عملي ومستدام لهذه المشكلة، بدل ترك هذه الكميات الهائلة من المطاط تتراكم دون فائدة.

4.2.2الخرسانة منخفضة الانبعاثات

هي نوع من الخرسانة يتم إنتاجها باستعمال مواد ومكونات بديلة تقلل من انبعاث ثاني أكسيد الكربون مقارنة بالخرسانة التقليدية، وذلك من خلال استبدال جزء من الإسمنت البورتلاندي (المسؤول عن نسبة كبيرة من الانبعاثات أثناء تصنيعه) بمواد أخرى أقل تأثيرًا على البيئة، كالرماد المتطاير أو خبث الأفران العالية.

تقليل الأثر البيئي

يُعتبر قطاع صناعة الإسمنت من أكثر القطاعات الصناعية إصدارًا لغازات ثاني أكسيد الكربون على مستوى العالم، نظرًا للعمليات الحرارية المكثفة اللازمة لإنتاجه. ومن خلال اعتماد الخرسانة منخفضة الانبعاثات، يمكن تقليص هذا الأثر البيئي بشكل ملموس، مما يساهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة والحد من الاحتباس الحراري على المستوى المحلي والعالمي.

قوة تحمل جيدة

رغم التعديل في التركيبة الكيميائية للخرسانة، أثبتت الدراسات أن هذا النوع يمكن أن يحافظ على قوة تحمل جيدة تضاهي في كثير من الحالات الخرسانة التقليدية، شريطة اتباع النسب الصحيحة في الخلط والمعالجة السليمة أثناء التصلب. وهذا يجعلها بديلاً موثوقًا يمكن اعتماده في مشاريع الأرصفة والطرقات دون التنازل عن المتطلبات الهيكلية الأساسية.

استعمال مواد بديلة للإسمنت التقليدي

يعتمد إنتاج هذا النوع من الخرسانة على دمج مواد صناعية ثانوية كالرماد المتطاير الناتج عن محطات الطاقة الحرارية، أو خبث الأفران العالية الناتج عن صناعة الحديد والصلب، وهي مواد كانت تُعتبر سابقًا نفايات صناعية. وهذا التوظيف الذكي لهذه المخلفات الصناعية يحقق فائدة مزدوجة: تقليل الانبعاثات من جهة، والاستفادة من نفايات صناعية أخرى من جهة ثانية.

3.2التقنيات الذكية في مراقبة وإصلاح الطرقات

أصبح تطوير البنية التحتية الطرقية يعتمد بشكل متزايد على إدماج التقنيات الذكية والرقمية، التي تسمح بمراقبة حالة الطرقات بشكل مستمر ودقيق في الزمن الحقيقي، مما يساعد الجهات المسؤولة على التدخل المبكر قبل تفاقم الأضرار، وبالتالي تقليل تكاليف الصيانة على المدى الطويل وتحسين جودة الخدمة المقدمة للمستعملين. وتندرج هذه التقنيات ضمن مفهوم "الطرق الذكية (Routes intelligentes) " الذي يشهد تطورًا متسارعًا في السنوات الأخيرة.

1.3.2أجهزة الاستشعار

تُعتبر أجهزة الاستشعار (Capteurs) من أهم التقنيات الحديثة المستخدمة في الطرق الذكية، حيث يتم تثبيتها إما داخل طبقات الطريق أثناء الإنجاز أو على سطحه بعد التركيب، بهدف جمع بيانات مستمرة ودقيقة حول حالته الفيزيائية والميكانيكية، ثم إرسال هذه البيانات إلى مراكز التحليل المختصة.

قياس درجة الحرارة داخل الطريق
تسمح هذه الوظيفة برصد التغيرات الحرارية التي تتعرض لها طبقات الطريق على مدار اليوم والفصول المختلفة، وهي معلومة بالغة الأهمية نظرًا لتأثير الحرارة المباشر على سلوك المواد المستعملة، خاصة الخلطات البيتومينية التي تلين في الحرارة المرتفعة وتتصلب في البرودة. ومن خلال هذه القياسات المستمرة، يمكن للمهندسين فهم سلوك المادة بشكل أدق واتخاذ قرارات صيانة استباقية.

كشف التشققات الدقيقة قبل ظهورها
تعتمد أجهزة الاستشعار المتطورة على تقنيات دقيقة قادرة على رصد الإجهادات الداخلية والتشوهات الطفيفة في بنية الطريق قبل أن تتحول إلى تشققات ظاهرة على السطح. وهذا الكشف المبكر يمنح الجهات المسؤولة هامشًا زمنيًا للتدخل الوقائي، مما يمنع تفاقم المشكلة ويقلل بشكل كبير من تكلفة الإصلاح مقارنة بالتدخل بعد ظهور الضرر بشكل واضح.

مراقبة الضغط الناتج عن حركة المرور
تسجل هذه الأجهزة الضغط الفعلي الذي تمارسه المركبات المختلفة على سطح الطريق، وهي بيانات مفيدة لفهم مدى تحمل البنية التحتية للأحمال الحقيقية مقارنة بالتصاميم النظرية الأولية. وتساعد هذه المعلومات أيضًا في تحديد المناطق الأكثر عرضة للإجهاد الزائد، والتي قد تحتاج إلى تعزيز أو إعادة تصميم مستقبلاً.

إرسال بيانات في الوقت الحقيقي
بفضل الاتصال اللاسلكي أو الشبكي، تستطيع هذه الأجهزة نقل البيانات المجمعة بشكل فوري إلى مراكز المراقبة والتحليل، دون الحاجة إلى تدخل بشري مباشر لجمع المعلومات ميدانيًا. وهذه السرعة في نقل البيانات تسمح باتخاذ قرارات سريعة ومبنية على معطيات دقيقة ومحدثة باستمرار.

الفائدة العامة
تسمح هذه التقنية مجتمعة بالانتقال من نمط الصيانة التقليدية التفاعلية، التي تنتظر ظهور الضرر لتتدخل، إلى نمط الصيانة الاستباقية (Maintenance prédictive) التي تتنبأ بالمشاكل قبل حدوثها وتتدخل في الوقت المناسب. وهذا التحول يشكل نقلة نوعية في إدارة البنية التحتية الطرقية، حيث يقلل من التكاليف ويحسن من مستوى الخدمة والسلامة المرورية.

2.3.2الذكاء الاصطناعي

يلعب الذكاء الاصطناعي دورًا مهمًا ومتناميًا في تحليل البيانات الضخمة التي يتم جمعها من الطرقات عبر مختلف أجهزة الاستشعار والمصادر الأخرى، حيث يتم استخدام خوارزميات متقدمة قادرة على معالجة كميات كبيرة من المعطيات بسرعة ودقة تفوق القدرات البشرية، بهدف توقع أماكن حدوث الأعطال والتدهور قبل وقوعها.

تحليل صور الطرقات

تعتمد خوارزميات الذكاء الاصطناعي، خاصة تقنيات التعلم العميق(Deep Learning) ، على معالجة الصور الملتقطة للطرقات سواء من كاميرات ثابتة أو متحركة أو طائرات بدون طيار، للكشف التلقائي عن العيوب والتشققات والحفر دون الحاجة لفحص بصري بشري مكلف وبطيء. وهذا التحليل الآلي يسمح بمسح مساحات واسعة من الشبكة الطرقية في وقت قصير جدًا.

التنبؤ بتدهور الطبقات

من خلال معالجة البيانات التاريخية والحالية المتعلقة بحالة الطرق، تستطيع نماذج الذكاء الاصطناعي بناء توقعات دقيقة حول سرعة تدهور كل قطعة من الطريق، بناءً على عوامل متعددة كحجم الحركة المرورية والظروف المناخية وعمر البنية. وهذه التوقعات تساعد المسؤولين على التخطيط المسبق لأعمال الصيانة بدل انتظار ظهور المشكلة فعليًا.

تحديد الأولويات في الصيانة

بفضل قدرته على معالجة كميات هائلة من البيانات المتعلقة بحالة الشبكة الطرقية بأكملها، يستطيع الذكاء الاصطناعي مساعدة الجهات المسؤولة على ترتيب أولويات التدخل بناءً على معايير موضوعية كخطورة الضرر وأهمية المحور المعني وحجم الحركة عليه. وهذا الترتيب العلمي للأولويات يضمن استغلالًا أمثل للموارد المالية والبشرية المتاحة.

تحسين قرارات التدخل

لا يقتصر دور الذكاء الاصطناعي على الكشف والتنبؤ فقط، بل يمتد إلى اقتراح أنسب أساليب وتقنيات التدخل لكل حالة على حدة، بناءً على تحليل مقارن لتجارب سابقة مشابهة وفعاليتها. وهذا الدعم في اتخاذ القرار يرفع من جودة التدخلات ويقلل من احتمالية اختيار حلول غير مناسبة أو غير فعالة على المدى الطويل.

النتيجة

إن الاعتماد على الذكاء الاصطناعي في هذا المجال يساهم بشكل كبير في تقليل الأخطاء البشرية الناتجة عن التقدير اليدوي أو الفحص البصري المحدود، كما يسرّع بشكل ملحوظ من عملية اتخاذ القرار، مما ينعكس إيجابًا على كفاءة إدارة الشبكة الطرقية بأكملها وعلى مستوى الخدمة المقدمة للمواطنين.

3.3.2الطائرات بدون طيار

تُستخدم الطائرات بدون طيار (Drones) بشكل متزايد في مراقبة الطرقات وتصويرها بدقة عالية من الجو، خاصة في المناطق الواسعة التي يصعب الوصول إليها ميدانيًا، أو في المناطق الخطيرة التي يشكل التدخل البشري فيها خطرًا على سلامة الأعوان، كالطرق السريعة ذات الحركة الكثيفة أو المناطق الجبلية الوعرة.

سرعة في جمع المعلومات

تستطيع الطائرات بدون طيار مسح مسافات طويلة من الشبكة الطرقية في وقت قصير جدًا مقارنة

بالطرق التقليدية للفحص الميداني التي تتطلب تنقل فرق كاملة من التقنيين. وهذه السرعة الكبيرة في جمع البيانات تجعلها أداة فعالة جدًا خاصة بعد الكوارث الطبيعية أو الحوادث الكبرى التي تستدعي تقييمًا سريعًا لحالة البنية التحتية.

تغطية مساحات كبيرة

بفضل قدرتها على التحليق لمسافات طويلة وارتفاعات مختلفة، يمكن لهذه الطائرات تغطية مساحات واسعة من الشبكة الطرقية في رحلة واحدة، بما في ذلك المناطق النائية أو صعبة الوصول التي يستحيل أو يصعب فحصها بالطرق التقليدية. وهذه القدرة على التغطية الشاملة تجعلها مكملة مثالية لأجهزة الاستشعار الثابتة التي تغطي نقاطًا محددة فقط.

تقليل خطر التدخل البشري

في المناطق الخطيرة كالطرق ذات الحركة المرورية الكثيفة أو غير المستقرة جيولوجيًا، يشكل إرسال فرق ميدانية للفحص خطرًا حقيقيًا على سلامة الأعوان. ومن خلال استعمال الطائرات بدون طيار، يمكن الحصول على نفس المعلومات دون تعريض أي شخص للخطر، مما يحسن من ظروف العمل والسلامة المهنية بشكل عام.

دقة عالية في اكتشاف العيوب

تُجهز هذه الطائرات بكاميرات عالية الدقة وأحيانًا بتقنيات تصوير حراري أو ليزري، مما يمكنها من رصد أدق التفاصيل والعيوب على سطح الطريق التي قد يصعب ملاحظتها بالعين المجردة من مستوى الأرض. وهذه الدقة العالية في الكشف تحسن من جودة التشخيص وتقلل من احتمالية إغفال أضرار مهمة.

4.3.2التطبيقات الرقمية

تعتمد بعض الدول والجماعات المحلية على تطبيقات هاتفية وإلكترونية تسمح للمواطنين بالمساهمة المباشرة في عملية مراقبة الطرقات، من خلال الإبلاغ عن الحفر والتشققات والأضرار الأخرى التي يلاحظونها أثناء تنقلاتهم اليومية، وذلك في إطار مقاربة تشاركية بين الإدارة والمواطن.

إرسال موقع العطب عبر الهاتف

تستعمل هذه التطبيقات تقنية تحديد الموقع الجغرافي (GPS) المدمجة في الهواتف الذكية، مما يسمح للمواطن بالإشارة بدقة إلى الموقع الجغرافي للضرر المُبلغ عنه دون الحاجة لوصف مطول أو معقد. وهذه الدقة في تحديد الموقع تسهل كثيرًا على فرق التدخل الوصول السريع إلى مكان العطب دون إضاعة وقت في البحث.

رفع صور للأضرار

بالإضافة إلى تحديد الموقع، تسمح هذه التطبيقات للمواطن برفق صور فوتوغرافية للضرر الملاحظ، مما يمنح الجهات المسؤولة فكرة بصرية واضحة عن حجم وطبيعة المشكلة قبل إرسال فريق للمعاينة الميدانية. وهذه الصور تساعد أيضًا في تصنيف درجة خطورة الضرر وتحديد أولوية التدخل بشكل أكثر موضوعية.

تتبع حالة الإصلاح

توفر بعض هذه التطبيقات المتقدمة إمكانية متابعة المواطن لحالة تقدم معالجة البلاغ الذي قدمه، من مرحلة الاستلام إلى التخطيط ثم التنفيذ والإنجاز النهائي. وهذه الشفافية في المتابعة تعزز من ثقة المواطن في الإدارة، وتزيد من إقباله على المساهمة في هذه المبادرات التشاركية مستقبلاً.

الفائدة

يساهم استعمال هذه التطبيقات الرقمية في تحسين التواصل والتفاعل بين المواطن والجهات المسؤولة عن صيانة الطرقات، حيث يتحول المواطن من مجرد مستفيد سلبي من الخدمة إلى شريك فعلي في عملية المراقبة. وهذا التفاعل المباشر يسرّع بشكل كبير من عملية التدخل والإصلاح، خاصة في الحالات التي قد لا تكتشفها أجهزة الاستشعار أو الفحوصات الدورية الرسمية بسرعة كافية.

4.2مميزات الحلول الذكية والمستدامة

تقليل تكاليف الصيانة على المدى الطويل

من خلال التدخل المبكر والاستباقي بدل الانتظار حتى تفاقم الأضرار، تسمح هذه التقنيات بتوفير مبالغ مالية معتبرة كانت ستُصرف على إصلاحات واسعة النطاق لو تُرك الضرر يتفاقم دون معالجة. وهذا التوفير يتراكم بشكل ملحوظ على المدى الطويل، مما يجعل الاستثمار الأولي في هذه التقنيات مربحًا اقتصاديًا رغم تكلفته المرتفعة في البداية.

تحسين جودة الطرقات

بفضل المراقبة المستمرة والدقيقة التي توفرها هذه التقنيات، يمكن الحفاظ على مستوى جودة أعلى للشبكة الطرقية بشكل عام، إذ يتم رصد ومعالجة أي خلل بمجرد ظهوره بدل تراكم المشاكل مع مرور الوقت. وهذا التحسن المستمر في الجودة ينعكس إيجابًا على تجربة المستعملين وعلى الصورة العامة للبنية التحتية في المنطقة.

رفع مستوى السلامة المرورية

يساهم الكشف المبكر عن الحفر والتشققات والعيوب الأخرى في تقليل احتمالية وقوع حوادث مرورية ناتجة عن سوء حالة الطريق، سواء بالنسبة للمركبات أو للمشاة. وهذا الرفع في مستوى السلامة يُعتبر من أهم الفوائد غير المباشرة لهذه التقنيات، إذ يحمي أرواح المستعملين ويقلل من التكاليف الاجتماعية والاقتصادية المرتبطة بالحوادث.

تقليل التأثير البيئي

من خلال الجمع بين تقنيات المراقبة الذكية والمواد المعاد تدويرها كالإسفلت والبلاستيك والمطاط، يمكن تقليص الأثر البيئي لقطاع الطرقات بشكل شامل، سواء من حيث استهلاك الموارد الطبيعية أو من حيث الانبعاثات الناتجة عن عمليات الإنتاج والصيانة المتكررة. وهذا التقليل ينسجم مع التوجهات العالمية نحو بنية تحتية أكثر استدامة وصداقة للبيئة.

إطالة عمر البنية التحتية

بفضل الصيانة الاستباقية والدقيقة المبنية على بيانات حقيقية، يمكن إطالة العمر الافتراضي للطرقات بشكل ملحوظ، حيث يتم التدخل في الوقت المناسب قبل أن تتفاقم الأضرار وتؤثر على البنية العميقة للطريق. وهذه الإطالة في العمر الافتراضي تقلل من الحاجة إلى إعادة الإنجاز الكامل، مما يوفر موارد مالية وبيئية معتبرة.

الانتقال من الصيانة العشوائية إلى الصيانة المخططة

تُمكّن هذه التقنيات مجتمعة الجهات المسؤولة من الانتقال من نمط إدارة تفاعلي وعشوائي، يعتمد على ردود الفعل بعد وقوع الضرر، إلى نمط إدارة مخطط ومبني على بيانات وتوقعات دقيقة. وهذا التحول

المنهجي في طريقة إدارة الصيانة يحسن بشكل جذري من كفاءة استغلال الموارد المتاحة، ويرفع من جودة الخدمة المقدمة على المدى الطويل.

5.2التحديات والقيود

رغم المزايا الكبيرة التي تقدمها هذه التقنيات الذكية والمستدامة، إلا أنها تواجه في الواقع عددًا من التحديات والقيود التي تحد من انتشارها وتعميمها، خاصة في بعض السياقات الاقتصادية والتقنية المحددة:

ارتفاع التكلفة الأولية للتجهيز
يتطلب اقتناء وتركيب أجهزة الاستشعار وأنظمة الذكاء الاصطناعي والطائرات بدون طيار استثمارات مالية أولية كبيرة، قد تشكل عائقًا حقيقيًا أمام الجماعات المحلية أو الدول ذات الموارد المالية المحدودة. وهذا الارتفاع في التكلفة الأولية يستدعي دراسة اقتصادية دقيقة لتقييم مدى جدوى الاستثمار مقارنة بالفوائد المتوقعة على المدى الطويل.

الحاجة إلى خبراء وتقنيين متخصصين
لا يقتصر تطبيق هذه التقنيات على مجرد اقتناء المعدات، بل يتطلب أيضًا توفر كوادر بشرية مؤهلة قادرة على تركيب وتشغيل وصيانة هذه الأنظمة، وكذا تحليل البيانات الناتجة عنها بشكل صحيح. وهذه الحاجة إلى تكوين متخصص قد تشكل عائقًا إضافيًا في المناطق التي تعاني من نقص في الكفاءات التقنية في هذا المجال الحديث نسبيًا.

ضعف البنية التكنولوجية في بعض الدول
يتطلب تشغيل هذه التقنيات بشكل فعال توفر بنية تحتية رقمية متطورة، كشبكات الاتصال عالية السرعة وأنظمة تخزين ومعالجة البيانات الضخمة، وهي بنية قد تكون غير متوفرة أو ضعيفة في بعض الدول النامية. وهذا الضعف في البنية التكنولوجية الأساسية يحد من إمكانية الاستفادة الكاملة من هذه الحلول الذكية، حتى في حال توفر الموارد المالية اللازمة لاقتنائها.

صعوبة تعميم هذه الأنظمة على كامل الشبكات الطرقية
نظرًا للتكلفة المرتفعة والمتطلبات التقنية المعقدة، يصعب في الواقع تعميم هذه التقنيات على كامل الشبكة الطرقية دفعة واحدة، مما يستدعي اعتماد مقاربة تدريجية تبدأ بالمحاور الأكثر أهمية أو الأكثر عرضة للأضرار. وهذا التعميم الجزئي والتدريجي، رغم ضرورته الواقعية، قد يحد من الفعالية الشاملة لهذه الحلول على المدى القصير والمتوسط.

6.2دور مشروع ROADFIX في تطبيق الحلول الذكية

يسعى مشروع ROADFIX إلى تقديم حل متكامل يجمع بين أساليب الصيانة التقليدية والتقنيات الحديثة الذكية، من أجل تحسين جودة الطرقات والأرصفة بطريقة فعالة ومستدامة تستجيب لاحتياجات المستعملين وتراعي في نفس الوقت الجانب الاقتصادي والبيئي. ويأتي هذا المشروع كاستجابة عملية للتحديات التي تواجهها الجماعات المحلية في تسيير وصيانة شبكاتها الطرقية، من خلال اعتماد مقاربة تدريجية تجمع بين ما هو متاح حاليًا وما يمكن تطويره مستقبلاً.

أهداف المشروع

إصلاح الحفر والتشققات بسرعة

يهدف المشروع في المقام الأول إلى تقليص المدة الزمنية الفاصلة بين اكتشاف الضرر والتدخل لإصلاحه، وذلك من خلال تنظيم فرق ميدانية قادرة على التحرك السريع نحو المناطق المتضررة. فكلما قلت المدة الزمنية للتدخل، كلما قلت احتمالية تفاقم الضرر وتحوله إلى مشكلة أكبر تتطلب تكلفة أعلى ووقتًا أطول للمعالجة، وهو ما ينعكس إيجابًا على استمرارية وسلامة حركة المرور.

تحسين مراقبة حالة الطرق

يسعى المشروع إلى إرساء نظام مراقبة أكثر انتظامًا ودقة لحالة الطرقات، بدل الاعتماد فقط على الفحص العشوائي أو ردود فعل المواطنين بعد وقوع الضرر. وهذا التحسين في المراقبة يسمح برصد المشاكل في مراحلها الأولى، مما يمنح الجهات المسؤولة القدرة على التخطيط المسبق لأعمال الصيانة بدل التعامل معها بشكل طارئ وغير منظم.

تقليل التكاليف

من خلال الجمع بين التدخل السريع والمراقبة المنتظمة واستعمال مواد مستدامة، يسعى المشروع إلى تحقيق توفير ملموس في التكاليف الإجمالية للصيانة على المدى الطويل. فالتدخل المبكر يجنب الجماعات المحلية تكاليف الإصلاحات الواسعة النطاق، كما أن استعمال المواد المعاد تدويرها يقلل من مصاريف اقتناء المواد الأولية الجديدة.

توفير خدمات رقمية للإبلاغ عن الأعطال

يولي المشروع أهمية خاصة لإشراك المواطن في عملية المراقبة والصيانة، من خلال توفير منصة رقمية تسمح له بالإبلاغ المباشر عن أي عطب يلاحظه في الطرقات. وهذا الإشراك يخلق نوعًا من الشراكة بين المواطن والإدارة، ويسرّع من عملية اكتشاف الأضرار خاصة في المناطق التي قد لا تغطيها أجهزة المراقبة الآلية بشكل كافٍ.

آلية العمل

يعتمد مشروع ROADFIX في تنفيذ أهدافه على مجموعة من الآليات المتكاملة التي تجمع بين البعد الميداني والبعد الرقمي والبعد البيئي، وذلك على النحو التالي:

فرق ميدانية للصيانة

يرتكز المشروع على وجود فرق تقنية ميدانية مؤهلة، مكلفة بالتدخل المباشر لإصلاح الحفر والتشققات وباقي الأضرار التي تصيب الطرقات والأرصفة. وتتميز هذه الفرق بقدرتها على التحرك السريع والتدخل الموضعي والفعال، مما يضمن استمرارية الخدمة ويقلل من مدة تعطل الحركة المرورية والراجلة في المناطق المتضررة.

منصة رقمية للإبلاغ

يوفر المشروع منصة أو تطبيقًا رقميًا يتيح للمواطنين إرسال بلاغات فورية عن الأضرار التي يلاحظونها، مرفقة بموقعها الجغرافي الدقيق وصور توضيحية عند الإمكان. وتشكل هذه المنصة حلقة وصل مباشرة بين المواطن والجهات المسؤولة، مما يسرّع من عملية الكشف عن الأعطال ويحسن من مستوى الشفافية والتواصل بين الطرفين.

استعمال مواد مستدامة

يحرص المشروع على دمج المواد المعاد تدويرها والمستدامة، كالإسفلت المعاد تدويره أو المطاط أو البلاستيك المعاد تدويره، ضمن عمليات الصيانة والإصلاح التي يقوم بها. وهذا الاختيار ينسجم مع

التوجهات البيئية الحديثة، ويسمح في نفس الوقت بتقليل التكاليف والحفاظ على الموارد الطبيعية، بما يجعل المشروع نموذجًا للصيانة المسؤولة بيئيًا.

إمكانية التطوير نحو نظام ذكي مستقبلاً

لا يقتصر تصور المشروع على الحلول الحالية فقط، بل يترك المجال مفتوحًا للتطور المستقبلي نحو دمج تقنيات أكثر تقدمًا، كأجهزة الاستشعار والذكاء الاصطناعي والطائرات بدون طيار، بما يتماشى مع التوجه العالمي نحو الطرق الذكية. وهذه المرونة في التصور تضمن للمشروع قدرة على التكيف مع التطورات التكنولوجية المستقبلية، وتجعله قابلاً للتوسع والتحسين المستمر حسب الإمكانيات المتاح

خاتمة الفصل

في ختام هذا الفصل، يتضح أن اعتماد الحلول الذكية والمستدامة في مجال إصلاح وصيانة الطرقات يمثل توجهًا حديثًا يهدف إلى تحسين جودة البنية التحتية الطرقية ورفع كفاءة عمليات الصيانة. فقد ساهمت المواد المستدامة، مثل المواد المعاد تدويرها والخرسانة منخفضة الانبعاثات، في تقليل استهلاك الموارد الطبيعية والحد من التأثيرات البيئية، في حين مكّنت التقنيات الذكية، كأجهزة الاستشعار والذكاء الاصطناعي والطائرات بدون طيار، من تحسين مراقبة حالة الطرق والكشف المبكر عن الأعطال، مما يساعد على تقليل تكاليف الصيانة وإطالة العمر الافتراضي للطرقات.

ورغم التحديات المرتبطة بارتفاع تكاليف التجهيزات والحاجة إلى كفاءات متخصصة، إلا أن هذه الحلول تُعد استثمارًا واعدًا يساهم في تحقيق تنمية مستدامة وتحسين مستوى السلامة المرورية. ومن هذا المنطلق، يُعد مشروع **ROADFIX** نموذجًا يجسد إمكانية توظيف هذه التقنيات والمواد الحديثة لتقديم حلول فعالة واقتصادية في مجال إصلاح وصيانة الطرقات، وهو ما سيتم التطرق إليه بصورة أكثر تفصيلًا في الفصل الموالي.

الفصل الثالث

تدهور الطرقات وأسبابه

1.3 مقدمة الفصل

تُعد الطرقات من أهم عناصر البنية التحتية، إلا أنها تتعرض خلال فترة استغلالها إلى العديد من العوامل التي تؤدي إلى تدهور حالتها مع مرور الزمن، مما يؤثر سلبًا على جودة الخدمة التي تقدمها ومستوى السلامة المرورية. ويختلف نوع وشدة هذا التدهور باختلاف الظروف المناخية، وحجم حركة المرور، وجودة المواد المستعملة، إضافة إلى طرق التنفيذ والصيانة المعتمدة.

ويُعد التعرف على أسباب تدهور الطرقات وأنواع الأضرار التي تصيبها خطوة أساسية لاختيار أساليب الإصلاح والصيانة المناسبة، إذ إن التشخيص الدقيق للمشكلة يساهم في تقليل تكاليف الصيانة وإطالة العمر الافتراضي للطريق.

يهدف هذا الفصل إلى دراسة أهم العوامل المسببة لتدهور الطرقات، مع توضيح أبرز أنواع الأضرار التي تصيبها، والآثار الناتجة عنها، من أجل تكوين رؤية شاملة تساعد على اختيار الحلول التقنية المناسبة لمعالجة هذه المشكلات.

.الصورة 4 تدهور الطرقات

أسباب تدهور الطرقات

1.2.3 العوامل المناخية

تلعب الظروف المناخية دورًا كبيرًا في تدهور الطرقات، خاصة التغيرات الحرارية والأمطار، حيث تتعرض مواد الطريق بشكل مستمر لتقلبات جوية متعددة على مدار السنة، مما يؤثر بشكل تراكمي على خصائصها الميكانيكية ويسرّع من وتيرة تدهورها إذا لم تُؤخذ هذه العوامل بعين الاعتبار عند التصميم .والتنفيذ

الحرارة المرتفعة تؤدي إلى ليونة الإسفلت وتشوه السطح
عند ارتفاع درجات الحرارة بشكل كبير، خاصة في فصل الصيف، تفقد المادة البيتومينية المكونة للخلطة الإسفلتية جزءًا من صلابتها وتصبح أكثر ليونة، مما يجعلها عرضة للتشوه تحت وطأة الأحمال المتكررة كعجلات المركبات. وهذه الظاهرة تتفاقم في المناطق ذات الحركة المرورية الكثيفة أو البطيئة، حيث .تترك العجلات آثارًا واضحة على سطح الطريق، مما يؤثر على استوائه وراحة السير عليه

البرودة تسبب تشققات نتيجة التمدد والانكماش
في المقابل، تتسبب درجات الحرارة المنخفضة في انكماش مواد الطريق، وهو ما يولد إجهادات داخلية قد تؤدي إلى ظهور تشققات، خاصة عندما تتكرر دورات التمدد والانكماش بشكل يومي أو موسمي. وهذه التشققات، وإن بدت صغيرة في البداية، تشكل نقطة ضعف تسمح لاحقًا بتسرب المياه إلى الطبقات .الداخلية، مما يسرّع من عملية التدهور الشامل للطريق

تسرب مياه الأمطار يؤدي إلى ضعف الطبقات الداخلية للطريق
تُعتبر مياه الأمطار من أخطر العوامل المناخية على البنية التحتية الطرقية، إذ تتسرب عبر الشقوق

والفواصل إلى الطبقات السفلى، مما يضعف تماسك التربة الحاملة ويقلل من قدرتها على توزيع الأحمال بشكل سليم. وإذا لم يتم تصريف هذه المياه بشكل فعال عبر نظام صرف مناسب، فإنها قد تتسبب في هبوطات موضعية أو انهيارات جزئية في بنية الطريق.

التجمد والذوبان يسرّعان تفتت المواد

في المناطق ذات المناخ البارد، تتعرض المياه المتسربة داخل الطريق لدورات متكررة من التجمد والذوبان، حيث يؤدي تجمد الماء إلى زيادة حجمه وممارسة ضغط إضافي على المواد المحيطة به، مما يوسع الشقوق الموجودة ويخلق أخرى جديدة. وهذه الدورة المتكررة من التجمد والذوبان تُعد من أكثر الأسباب تدميرًا لبنية الطرقات في المناطق ذات الشتاء القارس.

2.2.3حركة المرور والأحمال الثقيلة

تُعتبر حركة المرور الكثيفة والشاحنات الثقيلة من أهم أسباب تدهور الطرقات، إذ تتعرض البنية التحتية بشكل يومي ومستمر لأحمال متفاوتة الشدة، وكلما زادت كثافة هذه الحركة أو وزن المركبات المستعملة، كلما تسارعت وتيرة التدهور وقلت المدة الفاصلة بين عمليات الصيانة الضرورية.

الضغط المتكرر يؤدي إلى تآكل الطبقات

كل مرور لمركبة، خاصة الثقيلة منها، يمارس ضغطًا معينًا على طبقات الطريق، وهذا الضغط وإن كان بسيطًا في المرة الواحدة، فإنه يتراكم بشكل تدريجي مع تكرار المرور آلاف المرات يوميًا، مما يؤدي في النهاية إلى إجهاد وتآكل تدريجي في المواد المكونة للطريق. وهذا التآكل التراكمي يفسر لماذا تتدهور الطرق ذات الحركة الكثيفة بسرعة أكبر مقارنة بالطرق الأقل استعمالاً.

ظهور الحفر

عندما يتضافر الضغط المتكرر مع عوامل أخرى كتسرب المياه أو ضعف طبقة الأساس، تبدأ نقاط ضعف موضعية في الظهور على شكل حفر صغيرة تتوسع تدريجيًا إذا لم تُعالج بسرعة. وتشكل هذه الحفر خطرًا مباشرًا على سلامة المركبات والمشاة، كما أنها تتسع بسرعة أكبر كلما استمر مرور المركبات الثقيلة فوقها دون إصلاح.

تشوه سطح الطريق

ينتج هذا التشوه عن مرور متكرر للعجلات في نفس المسارات، مما يخلق أخاديد أو تجاويف طولية على طول مسار حركة المرور، خاصة في الطرق ذات الحركة الثقيلة والمتكررة كطرق الشاحنات. وهذه الأخاديد لا تؤثر فقط على راحة القيادة، بل تشكل أيضًا خطرًا حقيقيًا يتمثل في تجمع المياه داخلها، مما يزيد من خطر الانزلاق خاصة في الأيام الممطرة.

انخفاض العمر الافتراضي للطريق

نتيجة تراكم كل هذه التأثيرات الناتجة عن حركة المرور الكثيفة والأحمال الثقيلة، ينخفض العمر الافتراضي المتوقع للطريق بشكل ملحوظ مقارنة بالتصاميم النظرية الأولية. وهذا الانخفاض يفرض على الجهات المسؤولة إعادة تقييم دورية لحالة الطرق ذات الحركة الكثيفة، وتخصيص ميزانيات صيانة أكبر لها مقارنة بالطرق الأقل استعمالاً.

3.2.3ضعف جودة المواد

إذا لم تكن المواد المستعملة في إنجاز الطريق ذات جودة عالية ومطابقة للمعايير التقنية المطلوبة، فإن الطريق يتدهور بسرعة أكبر بكثير مما هو متوقع، بغض النظر عن جودة التصميم أو دقة التنفيذ، إذ تبقى المادة الأولية هي الأساس الذي تُبنى عليه متانة واستدامة أي بنية طرقية.

إسفلت ضعيف الجودة

عندما تكون الخلطة البيتومينية المستعملة غير مطابقة للمواصفات التقنية المطلوبة، سواء من حيث نوعية البيتومين أو نسبة خلطه، فإن الطريق الناتج يكون أقل مقاومة للحرارة والأحمال والعوامل الجوية بشكل عام. وهذا الضعف في الجودة يظهر عادة بسرعة على شكل تشوهات أو تشققات مبكرة، حتى قبل مرور فترة زمنية طويلة على الإنجاز.

حصى غير مناسب

يلعب نوع وحجم وشكل حبيبات الحصى المستعملة دورًا محوريًا في تماسك ومتانة الخلطة النهائية، فاستعمال حصى ذي خصائص غير مناسبة، كضعف المقاومة أو عدم انتظام الحجم، يضعف من التماسك الداخلي للطريق ويجعله أكثر عرضة للتفتت والتآكل السريع تحت تأثير الحركة المرورية والعوامل المناخية.

خلط غير متوازن

حتى في حال توفر مواد أولية جيدة، فإن عدم احترام النسب الصحيحة أثناء عملية الخلط بين الإسمنت أو البيتومين والحصى والماء يؤدي إلى الحصول على مادة نهائية ضعيفة الخصائص الميكانيكية. وهذا الخلل في التوازن قد يكون غير ملحوظ بصريًا في البداية، لكنه يظهر بوضوح مع مرور الوقت من خلال تسارع وتيرة التدهور مقارنة بالمعايير المتوقعة.

عدم احترام معايير التنفيذ

تخضع عملية إنجاز الطرقات لمعايير ومواصفات تقنية دقيقة، سواء من حيث نوعية المواد أو طريقة تركيبها، وأي تجاوز أو تهاون في احترام هذه المعايير، سواء بدافع تقليل التكلفة أو نقص الرقابة، ينعكس سلبًا وبشكل مباشر على جودة ومتانة الطريق النهائي، ويقصر بشكل كبير من عمره الافتراضي المتوقع.

4.2.3أخطاء التنفيذ

تؤثر الأخطاء التي تحدث أثناء مرحلة الإنجاز بشكل مباشر وحاسم على عمر الطريق، إذ إن أفضل تصميم وأجود المواد لا يمكن أن يعوضا عن سوء التنفيذ، الذي يبقى عاملاً حاسمًا في تحديد مدى نجاح المشروع على المدى الطويل.

عدم ضغط الطبقات بشكل جيد

دقيقة لضمان تماسك المواد (Compactage) تتطلب كل طبقة من طبقات الطريق عملية دك وضغط وطرد الفراغات الهوائية بينها، وأي تقصير في هذه العملية يترك الطبقة أقل كثافة وأكثر عرضة للتشوه والهبوط تحت تأثير الأحمال المستقبلية. وهذا الخطأ، رغم كونه غير ظاهر مباشرة بعد الإنجاز، يظهر تأثيره السلبي بوضوح خلال الأشهر أو السنوات الأولى من استعمال الطريق.

عدم احترام السماكات المطلوبة

يتم تحديد سماكة كل طبقة من طبقات الطريق بناءً على دراسات تقنية دقيقة تأخذ بعين الاعتبار طبيعة الحمولة المتوقعة ونوعية التربة، وأي تقليص في هذه السماكات، سواء بقصد تقليل التكلفة أو بسبب سوء التنفيذ، يضعف من قدرة الطريق على تحمل الأحمال المصممة من أجلها، مما يسرّع من ظهور علامات التدهور المبكر.

سوء تحضير التربة الأساسية
تُشكل التربة الحاملة الأساس الذي تُبنى عليه جميع الطبقات العلوية للطريق، وأي نقص في تحضيرها، كعدم إزالة المواد العضوية أو عدم ضمان استقرارها وتصريفها الجيد، ينعكس سلبًا على جميع الطبقات فوقها، مهما كانت جودتها. فالطريق الذي يُبنى فوق أساس ضعيف يبقى عرضة للهبوطات والتشققات مهما بُذل من جهد في الطبقات العلوية.

تنفيذ في ظروف غير مناسبة (حرارة/رطوبة)
يتطلب إنجاز الطرقات، خاصة الخرسانية والإسفلتية، ظروفًا جوية ملائمة من حيث درجة الحرارة ونسبة الرطوبة، إذ يؤثر التنفيذ في ظروف قاسية كالحرارة المفرطة أو الرطوبة العالية سلبًا على عملية التصلب أو التماسك الجيد للمواد. وهذا التنفيذ في ظروف غير مناسبة، وإن بدا حلاً عمليًا لتسريع الإنجاز، فإنه يضعف الجودة النهائية للطريق ويقلل من عمره الافتراضي.

5.2.3 نقص الصيانة

غياب الصيانة الدورية يؤدي إلى تفاقم الأضرار الصغيرة وتحولها إلى مشاكل كبيرة ومكلفة، إذ إن أغلب أضرار الطرقات تبدأ بشكل بسيط وموضعي، ويمكن معالجتها بتكلفة منخفضة إذا تم التدخل في الوقت المناسب، لكن إهمالها يجعلها تتوسع وتتعمق بشكل يستدعي تدخلات أكبر وأكثر تكلفة.

تأخر إصلاح التشققات
عندما تُترك التشققات الصغيرة دون معالجة لفترة طويلة، فإنها تتوسع تدريجيًا تحت تأثير حركة المرور والعوامل المناخية، كما تسمح بتسرب مياه الأمطار إلى الطبقات الداخلية للطريق. وهذا التأخر في التدخل يحول مشكلة بسيطة وقليلة التكلفة إلى ضرر أعمق وأوسع نطاقًا، يتطلب أحيانًا إعادة إنجاز جزء كامل من الطريق بدل مجرد ترميم سطحي بسيط.

عدم معالجة الحفر في الوقت المناسب
تبدأ الحفر عادة بحجم صغير، لكنها تتوسع بسرعة كبيرة إذا استمر مرور المركبات فوقها دون إصلاح، خاصة في ظل هطول الأمطار الذي يسرّع من عملية التفتت والتوسع. وعدم معالجة هذه الحفر في وقتها المناسب لا يزيد فقط من تكلفة الإصلاح لاحقًا، بل يشكل أيضًا خطرًا متزايدًا على سلامة المركبات والمشاة الذين يستعملون الطريق يوميًا.

إهمال تنظيف وتصريف المياه
يُعتبر نظام تصريف المياه جزءًا أساسيًا من البنية التحتية للطريق، وإهمال صيانته وتنظيفه بشكل دوري، كإزالة الأوساخ المتراكمة في المزاريب وقنوات الصرف، يؤدي إلى تجمع المياه فوق سطح الطريق أو تسربها إلى الطبقات الداخلية. وهذا التجمع للمياه غير المصرَّفة يسرّع بشكل كبير من عمليات التدهور المختلفة التي سبق ذكرها، من تشققات وحفر وضعف في التربة الحاملة، مما يجعل صيانة أنظمة التصريف عاملاً وقائيًا بالغ الأهمية.

3.3 أنواع تدهور الطرقات

1.3.3 التشققات

الصورة 5 التشققات

تُعد التشققات أول علامة ظاهرة على تدهور الطريق، وقد تكون سطحية بسيطة تقتصر على الطبقة العلوية، أو عميقة تمتد إلى الطبقات الداخلية للطريق، مما يؤثر على البنية الهيكلية بأكملها. وتختلف أنواع هذه التشققات من حيث الشكل والسبب والخطورة، كما يلي:

تشققات طولية

تظهر هذه التشققات بشكل موازٍ لمحور الطريق، وتنتج عادة عن عوامل متعددة كضعف الالتحام بين حارات الرصف المتجاورة، أو الإجهادات الناتجة عن حركة المرور المتكررة في نفس المسارات، أو حتى عن ظاهرة الانكماش الحراري في الظروف الباردة. وإذا لم تُعالج هذه التشققات في وقت مبكر، فإنها تسمح بتسرب مياه الأمطار إلى الطبقات السفلى، مما يسرّع من تدهور الطريق بشكل عام.

تشققات عرضية

تمتد هذه التشققات بشكل عمودي على محور الطريق، وتنتج غالبًا عن التمدد والانكماش الحراري المتكرر للمواد، خاصة في المناطق ذات التقلبات الحرارية الكبيرة بين الليل والنهار أو بين الفصول. وتُعتبر هذه التشققات من أكثر الأنواع انتشارًا في الطرق الإسفلتية القديمة، إذ تتكرر بشكل منتظم على طول الطريق كلما تقدم عمره وزادت دورات التمدد والانكماش التي تعرض لها.

تشققات شبكية(Alligator Cracking)

تُعتبر هذه التشققات من أخطر أنواع التشققات، إذ تأخذ شكل شبكة متداخلة تشبه جلد التمساح، وتنتج عادة عن إجهاد متكرر ومتراكم في الطبقات السفلى للطريق، خاصة تحت تأثير الأحمال الثقيلة المتكررة أو ضعف طبقة الأساس. وتشير هذه الظاهرة عادة إلى تدهور متقدم في البنية الهيكلية للطريق، يتطلب تدخلاً عميقًا وشاملاً بدل مجرد الترميم السطحي، نظرًا لأنها تعكس ضعفًا جوهريًا في القدرة الحاملة للطري

2.3.3 الحفر

الصورة 6 الحفر

تظهر الحفر نتيجة تفتت طبقة الإسفلت ودخول المياه إلى الطبقات السفلية، حيث تبدأ عادة كتشقق صغير أو نقطة ضعف موضعية، ثم تتوسع تدريجيًا تحت تأثير حركة المرور والعوامل الجوية المتكررة حتى تتحول إلى حفرة واضحة المعالم تشكل خطرًا حقيقيًا على مستعملي الطريق.

تؤثر على سلامة المركبات

يؤدي مرور المركبات فوق الحفر بسرعة عالية إلى أضرار ميكانيكية مباشرة، كتلف الإطارات أو نظام التعليق، وقد تتسبب في بعض الحالات في فقدان السائق السيطرة المؤقتة على المركبة، خاصة إذا كانت الحفرة عميقة أو غير مرئية بوضوح. وهذه الأضرار تتحول مع الوقت إلى تكاليف إضافية يتحملها مستعملو الطريق نتيجة إصلاح مركباتهم المتضررة.

تسبب حوادث أحيانًا

في الحالات الأكثر خطورة، قد تتسبب الحفر العميقة أو غير المرئية في وقوع حوادث مرورية حقيقية، خاصة عند محاولة السائقين تفاديها بشكل مفاجئ، مما قد يؤدي إلى تصادمات جانبية أو خروج عن المسار. وتزداد هذه المخاطر في الليل أو في ظروف الرؤية الضعيفة، حيث يصعب على السائق ملاحظة الحفرة في الوقت المناسب لتجنبها بأمان.

تتوسع مع مرور الوقت

إذا لم يتم التدخل السريع لإصلاح الحفر بمجرد ظهورها، فإنها تتوسع بشكل متسارع تحت تأثير استمرار مرور المركبات فوقها وتسرب المياه إلى داخلها، خاصة في فترات هطول الأمطار. وهذا التوسع التدريجي يحول مشكلة كان يمكن معالجتها بتكلفة زهيدة في البداية إلى ضرر أكبر يتطلب تدخلاً أوسع نطاقًا وتكلفة أعلى بكثير كلما طال أمد الإهمال.

التشوهات السطحية 3.3.3

تشمل هذه الفئة من التدهور مجموعة من الظواهر التي تؤثر على استواء وانتظام سطح الطريق، دون أن تصل بالضرورة إلى مرحلة التشقق أو التفتت الكامل، ومن أبرزها:

التموجات

تظهر هذه الظاهرة على شكل تعرجات متكررة وغير منتظمة على طول سطح الطريق، وتنتج عادة عن ضعف في التماسك الداخلي للخلطة الإسفلتية أو عن تكرار الفرملة المفاجئة للمركبات في نفس النقاط، كما هو الحال عند تقاطعات الطرق أو إشارات المرور. وتؤثر هذه التموجات سلبًا على راحة القيادة، كما قد تشكل خطرًا على استقرار المركبات في السرعات العالية.

الأخاديد (Orniérage)

تتشكل هذه الأخاديد نتيجة مرور متكرر للعجلات في نفس المسارات على مدى فترة طويلة، مما يخلق تجاويف طولية عميقة تتبع مسار حركة المرور الرئيسي، خاصة في الطرق ذات الحركة الثقيلة والمتكررة. وتشكل هذه الأخاديد خطرًا مضاعفًا، إذ تجمع مياه الأمطار داخلها مما يزيد من خطر الانزلاق المائي (Aquaplaning)، كما تصعّب من عملية التحكم في اتجاه المركبة أثناء القيادة.

الهبوط غير المنتظم

ينتج هذا النوع من التدهور عن ضعف موضعي في طبقة الأساس أو التربة الحاملة، مما يؤدي إلى انخفاض جزء معين من سطح الطريق مقارنة بمحيطه، دون أن يكون بالضرورة مصحوبًا بتشققات ظاهرة في البداية. وهذا الهبوط غير المنتظم يخلق فروقات في مستوى السطح تؤثر على انسيابية حركة المرور، وقد يتطور لاحقًا إلى تشققات وحفر إذا لم تُعالج المشكلة من جذورها في طبقة الأساس.

فقدان الالتصاق 4.3.3

يحدث فقدان الالتصاق عندما تنفصل طبقات الطريق عن بعضها البعض بسبب ضعف الترابط بينها أو تسرب المياه إلى الفراغات الفاصلة بينها. وينتج هذا الضعف في الترابط عادة عن سوء تحضير السطح قبل وضع الطبقة العلوية، أو عن استعمال مواد رابطة غير كافية أو غير مطابقة للمواصفات التقنية المطلوبة أثناء عملية الإنجاز. وتُعتبر هذه الظاهرة من أخطر أشكال التدهور لأنها غير مرئية في مراحلها الأولى، إذ يبدو سطح الطريق سليمًا ظاهريًا بينما تكون الطبقات الداخلية في طور الانفصال التدريجي، مما يجعل اكتشافها متأخرًا في الغالب، وقد يؤدي في النهاية إلى انهيار مفاجئ لجزء كامل من الطريق يتطلب إعادة إنجاز شاملة بدل مجرد ترميم سطحي.

التآكل السطحي 5.3.3

يؤدي التآكل السطحي إلى فقدان الطبقة العليا من الطريق بشكل تدريجي ومستمر، نتيجة الاحتكاك المتكرر مع عجلات المركبات من جهة، وتأثير العوامل الجوية كالأشعة الشمسية والأمطار من جهة أخرى. ومع مرور الوقت، تفقد هذه الطبقة العلوية جزءًا من الحصى الدقيق المكون لها، مما يجعل السطح أكثر خشونة وأقل تماسكًا، ويقلل من مقاومته للانزلاق خاصة في الأيام الممطرة. وإذا استمر هذا التآكل دون معالجة عبر أعمال تجديد سطحي دورية، فإنه يكشف تدريجيًا الطبقات السفلى الأقل مقاومة، مما يسرّع من ظهور أشكال أخرى أكثر خطورة من التدهور كالتشققات والحفر.

آثار تدهور الطرقات 4.3

زيادة حوادث المرور

يشكل تدهور الطرقات، بمختلف أشكاله من حفر وتشققات وتشوهات، عاملاً مباشرًا في ارتفاع معدلات الحوادث المرورية، سواء نتيجة فقدان السائقين السيطرة على مركباتهم أو نتيجة محاولات تفادي الأضرار بشكل مفاجئ وغير آمن. وتزداد خطورة هذه الحوادث في الظروف الجوية الصعبة كالأمطار أو الليل، حيث تقل الرؤية ويصعب على السائق تقدير حجم الخطر بشكل مسبق.

ارتفاع تكاليف الصيانة

كلما تُرك تدهور الطرق دون معالجة لفترة طويلة، كلما تفاقمت الأضرار وتحولت من مشاكل بسيطة يمكن حلها بتكلفة منخفضة إلى أضرار عميقة تستدعي تدخلات واسعة ومكلفة، قد تصل أحيانًا إلى إعادة إنجاز كاملة لأجزاء من الطريق. وهذا الارتفاع في التكاليف يشكل عبئًا إضافيًا على ميزانيات الجماعات المحلية، خاصة في ظل محدودية الموارد المالية المتاحة لقطاع الصيانة.

صعوبة التنقل

يؤثر تدهور الطرقات بشكل مباشر على جودة وسلاسة التنقل، سواء بالنسبة للمركبات التي تضطر لتخفيض سرعتها أو تغيير مسارها لتفادي الأضرار، أو بالنسبة للمشاة الذين يواجهون صعوبات إضافية في التنقل الآمن، خاصة في حالة الأرصفة المتدهورة. وهذه الصعوبة في التنقل تنعكس سلبًا على الوقت اللازم للوصول إلى الوجهات المختلفة، وتزيد من مستوى الإجهاد والانزعاج لدى مستعملي الطريق.

استهلاك أكبر للوقود

تضطر المركبات التي تسلك طرقًا متدهورة إلى تغيير سرعتها بشكل متكرر، من خلال الفرملة والتسارع المستمرين لتفادي الحفر والتشوهات، وهو ما يزيد من استهلاك الوقود مقارنة بالسير على طريق مستوٍ وسليم. وهذا الاستهلاك الإضافي للوقود يترجم إلى تكلفة اقتصادية مباشرة يتحملها مستعملو الطريق، إضافة إلى الأثر البيئي السلبي الناتج عن زيادة الانبعاثات الكربونية.

تراجع جودة البنية التحتية

يعكس تراكم أشكال التدهور المختلفة دون معالجة فعالة تراجعًا عامًا في جودة البنية التحتية الطرقية للمنطقة أو الدولة، وهو ما قد يؤثر سلبًا على الصورة العامة للمكان وعلى جاذبيته الاقتصادية والسياحية. وهذا التراجع في الجودة يستدعي في النهاية استثمارات ضخمة لإعادة تأهيل الشبكة الطرقية بأكملها، وهي استثمارات كان يمكن تجنب جزء كبير منها لو تم اعتماد سياسة صيانة وقائية ومنتظمة منذ البداية.

خاتمة الفصل 5.3

يتبين من خلال ما سبق أن تدهور الطرقات ناتج عن مجموعة من العوامل المتداخلة والمتراكمة، سواء كانت طبيعية كالعوامل المناخية، أو بشرية كحركة المرور والأحمال الثقيلة، أو تقنية كضعف جودة المواد وأخطاء التنفيذ ونقص الصيانة الدورية. وتتفاعل هذه العوامل فيما بينها بشكل معقد، حيث يمكن لعامل واحد أن يسرّع من تأثير عامل آخر، مما يجعل من الصعب أحيانًا تحديد سبب رئيسي واحد لتدهور طريق معين.

لذلك فإن معالجة هذه المشاكل تتطلب اعتماد استراتيجيات صيانة فعالة وشاملة، تعتمد بالدرجة الأولى على التشخيص المبكر والدقيق لحالة الطرق، والتدخل السريع قبل أن تتحول الأضرار الصغيرة إلى مشاكل كبيرة ومكلفة. كما يستدعي الأمر إعادة النظر في طرق التصميم والتنفيذ والمواد المستعملة، بما يضمن بنية تحتية أكثر متانة واستدامة منذ البداية.

وهذا التوجه نحو الوقاية والتدخل المبكر هو بالضبط ما يمهد لاعتماد الحلول الذكية والمستدامة التي سيتم التطرق إليها بالتفصيل في الفصول القادمة، والتي تجمع بين التقنيات الحديثة للمراقبة والتنبؤ من جهة، والمواد البيئية المستدامة من جهة أخرى، بهدف الانتقال من نمط الصيانة التفاعلية إلى نمط الصيانة الاستباقية الأكثر فعالية واقتصادًا على المدى الطويل.

الفصل الرابع

الدراسة التقنية لمشروع ROADFIX

1.4 مقدمة الفصل

تمثل الدراسة التقنية مرحلة أساسية في إعداد أي مشروع، حيث تهدف إلى تحديد الجوانب الفنية والتنظيمية اللازمة لضمان نجاحه وتحقيق أهدافه. وتشمل هذه الدراسة تحليل فكرة المشروع، وآلية عمله، والوسائل والتجهيزات المطلوبة، إضافة إلى الموارد البشرية اللازمة لتنفيذه، بما يضمن تقديم خدمات ذات جودة عالية وفعالية في مجال إصلاح وصيانة الطرقات.

ويقوم مشروع **RoadFix** على تقديم حلول تقنية حديثة تجمع بين أساليب الصيانة التقليدية والتقنيات الذكية، من خلال اعتماد مواد مستدامة، وتحسين تنظيم عمليات التدخل، والاستفادة من الوسائل الرقمية لتسهيل اكتشاف الأعطال ومتابعة عمليات الإصلاح. ويهدف المشروع إلى رفع كفاءة صيانة الطرقات، وتقليل زمن التدخل، وتحسين جودة البنية التحتية، بما يساهم في تعزيز السلامة المرورية وخفض تكاليف الصيانة على المدى الطويل.

يهدف هذا الفصل إلى عرض الدراسة التقنية لمشروع **RoadFix**، من خلال التعريف بفكرة المشروع، وآلية عمله، والوسائل والتجهيزات المعتمدة، والموارد البشرية اللازمة، إضافة إلى إبراز أهدافه وأهميته ودور الموقع الإلكتروني في دعم خدماته وتحسين التواصل مع مختلف الجهات المعنية.

4.2فكرة المشروع

تتمثل فكرة مشروع ROADFIX في إنشاء مؤسسة متخصصة ومتكاملة تُعنى بمختلف جوانب صيانة وإصلاح البنية التحتية الطرقية، بحيث تجمع بين التدخل الميداني التقليدي والحلول الحديثة المستدامة، وذلك على النحو التالي:

إصلاح الحفر والتشققات في الطرقات
يشكل هذا المحور النواة الأساسية لنشاط المؤسسة، حيث تتكفل فرق متخصصة بالتدخل السريع لمعالجة الحفر والتشققات بمختلف أنواعها بمجرد اكتشافها أو الإبلاغ عنها. ويهدف هذا التدخل السريع إلى منع تفاقم هذه الأضرار الصغيرة وتحولها إلى مشاكل أكبر وأكثر تكلفة، بما يضمن الحفاظ على سلامة مستعملي الطريق واستمرارية حركة المرور بشكل طبيعي.

إعادة تأهيل الطبقات التالفة
لا يقتصر عمل المؤسسة على الإصلاحات السطحية الموضعية فقط، بل يمتد أيضًا إلى معالجة الأضرار الأعمق التي تصيب الطبقات الداخلية للطريق، كضعف طبقة الأساس أو فقدان الالتصاق بين الطبقات. وهذا التدخل الشامل يضمن معالجة جذرية للمشكلة بدل الاكتفاء بحلول ترقيعية سطحية سرعان ما تعاود الظهور.

صيانة الأرصفة والبنية التحتية الطرقية
يمتد نشاط المؤسسة أيضًا ليشمل صيانة الأرصفة بمختلف أنواعها، سواء الخرسانية أو الأسفلتية أو المبلطة أو الحجرية، إلى جانب باقي عناصر البنية التحتية الطرقية كأنظمة الصرف والإنارة العمومية المرتبطة بالطريق. وهذا التوسع في مجال التدخل يجعل من المؤسسة شريكًا شاملاً للجماعات المحلية في تسيير وصيانة فضاءاتها العمومية.

استعمال حلول مستدامة في الإصلاح
تحرص المؤسسة على دمج المواد والتقنيات المستدامة ضمن عملياتها اليومية، كاستعمال الإسفلت المعاد تدويره أو المواد المطاطية والبلاستيكية المعاد تصنيعها، وذلك بهدف تقليل التكلفة من جهة، والحد من الأثر البيئي لأنشطتها من جهة أخرى. وهذا التوجه يجعل من المؤسسة نموذجًا رائدًا في مجال الصيانة المسؤولة بيئيًا.

إدخال عنصر رقمي لتسهيل الإبلاغ عن الأعطال
تعتمد المؤسسة على منصة أو تطبيق رقمي يسمح للمواطنين بالإبلاغ المباشر عن أي عطب يلاحظونه في الطرقات، مرفقًا بالموقع الجغرافي وصور توضيحية عند الإمكان. وهذا البعد الرقمي يعزز من سرعة وفعالية عملية الكشف عن الأضرار، ويخلق قناة تواصل مباشرة وشفافة بين المواطن والمؤسسة.

كما يمكن تطوير المشروع مستقبلًا ليصبح منصة ذكية تربط بين المواطنين ومصالح الصيانة، من خلال دمج تقنيات أكثر تقدمًا كأجهزة الاستشعار والذكاء الاصطناعي، بما يجعل من ROADFIX نظامًا قابلاً للتطور المستمر ومواكبة التحولات التكنولوجية في هذا المجال.

3.4آلية عمل المشروع

يمر مشروع ROADFIX بعدة مراحل أساسية ومتسلسلة، تضمن معالجة منهجية وفعالة لكل عطب يتم رصده أو الإبلاغ عنه، بدءًا من الاكتشاف وصولًا إلى المتابعة بعد الإصلاح.

1.3.4مرحلة اكتشاف العطب

تُعد هذه المرحلة نقطة الانطلاق الأساسية في آلية عمل المشروع، إذ يتم اكتشاف مشاكل الطرقات عبر ثلاث قنوات رئيسية متكاملة:

البلاغات المباشرة من المواطنين
يشكل المواطن مصدرًا أساسيًا ومهمًا لاكتشاف الأضرار، خاصة تلك التي تظهر في مناطق لا تغطيها المعاينات الميدانية الدورية بشكل كافٍ. ومن خلال تمكين المواطنين من الإبلاغ المباشر والسريع عن أي عطب يلاحظونه أثناء تنقلاتهم اليومية، تستطيع المؤسسة توسيع نطاق مراقبتها بشكل كبير دون الحاجة لموارد بشرية إضافية كبيرة.

المعاينة الميدانية
تعتمد المؤسسة أيضًا على فرق ميدانية مكلفة بإجراء جولات دورية ومنتظمة عبر الشبكة الطرقية، بهدف رصد الأضرار التي قد لا يُبلغ عنها المواطنون، أو لتقييم حالة الطرق بشكل استباقي قبل ظهور مشاكل واضحة. وتضمن هذه المعاينات المنتظمة تغطية شاملة ومتوازنة لمختلف مناطق الشبكة الطرقية.

تقنيات مستقبلية مثل التصوير أو التطبيقات
يتصور المشروع في مرحلة لاحقة من تطوره الاعتماد على تقنيات أكثر تقدمًا لاكتشاف الأعطال، كالتصوير الآلي عبر كاميرات مثبتة على المركبات أو الطائرات بدون طيار، أو تطبيقات ذكية مدعومة بالذكاء الاصطناعي لتحليل حالة الطرق تلقائيًا. وهذا التوجه المستقبلي يهدف إلى تقليل الاعتماد على الرصد اليدوي وزيادة دقة وسرعة الاكتشاف.

2.3.4مرحلة تحليل العطب

بعد تسجيل العطب عبر إحدى القنوات السابقة، تنتقل المؤسسة إلى مرحلة تحليل دقيق للضرر المُبلغ عنه، وذلك من خلال ثلاث خطوات أساسية:

تحديد نوع الضرر (حفرة، تشققات، هبوط...)
يتم في هذه الخطوة تصنيف الضرر ضمن الفئات المعروفة، سواء كان حفرة أو تشققًا بأنواعه المختلفة أو هبوطًا أو أي شكل آخر من أشكال التدهور. وهذا التصنيف الدقيق يساعد الفرق التقنية على تحديد نوعية التدخل والمواد اللازمة للإصلاح بشكل مسبق، مما يوفر الوقت عند الانتقال إلى مرحلة التنفيذ الفعلي.

تحديد درجة الخطورة
تقيّم المؤسسة مدى خطورة كل ضرر على سلامة مستعملي الطريق، سواء المركبات أو المشاة، بناءً على معايير كحجم الضرر وموقعه وكثافة الحركة في المنطقة المعنية. وهذا التقييم الدقيق للخطورة يسمح بالتمييز بين الأضرار التي تستدعي تدخلاً فوريًا وتلك التي يمكن برمجتها ضمن جدول صيانة عادي.

تحديد الأولوية في الإصلاح
بناءً على درجة الخطورة المحددة سابقًا، إضافة إلى عوامل أخرى كأهمية المحور الطرقي المعني وحجم الحركة عليه، يتم ترتيب الأضرار المُسجلة حسب أولوية التدخل. وهذا الترتيب العلمي والموضوعي يضمن توجيه الموارد المتاحة، سواء البشرية أو المادية، نحو الحالات الأكثر إلحاحًا أولاً، بما يحقق أقصى استفادة ممكنة من الإمكانيات المحدودة.

3.3.4مرحلة التدخل والإصلاح

بعد تحديد نوع وأولوية العطب، تنتقل الفرق التقنية إلى مرحلة التنفيذ الفعلي للإصلاح، والتي تشمل ثلاث خطوات متتالية:

تنظيف المنطقة المتضررة
تبدأ عملية الإصلاح بتنظيف شامل للمنطقة المتضررة، من خلال إزالة الأوساخ والمخلفات والمياه الراكدة إن وجدت، وكذا إزالة أي أجزاء متفتتة أو غير متماسكة من الطبقة القديمة. وتُعد هذه الخطوة أساسية لضمان التصاق جيد بين المادة الجديدة والطبقة القديمة، إذ إن أي تقصير فيها قد يؤدي إلى فشل الإصلاح في وقت قصير.

اختيار المادة المناسبة للإصلاح
تحدد الفرق التقنية المادة الأنسب للإصلاح بناءً على نوع الضرر وطبيعة الطريق الأصلية، سواء كانت خرسانة أو إسفلتًا أو مادة رقع سريعة الإصلاح، مع إعطاء الأولوية للمواد المستدامة والمعاد تدويرها كلما كان ذلك ممكنًا تقنيًا. وهذا الاختيار الدقيق يضمن انسجام المادة الجديدة مع محيطها ويطيل من عمر الإصلاح المُنجز.

تنفيذ عملية الترميم (إسفلت / خرسانة / رقع إصلاح)
تقوم الفرق بتنفيذ عملية الترميم وفق المعايير التقنية المطلوبة، من حيث الدك والضغط الجيد للمادة وضمان استوائها مع مستوى الطريق المحيط. وتحرص الفرق على إنجاز هذه العملية بسرعة وكفاءة لتقليل مدة تعطل حركة المرور، مع الحفاظ في نفس الوقت على جودة التنفيذ التي تضمن ديمومة الإصلاح.

4.3.4مرحلة المتابعة

لا تنتهي مسؤولية المؤسسة بمجرد إنجاز الإصلاح، بل تمتد إلى مرحلة متابعة لاحقة تضمن جودة واستدامة التدخل المُنجز:

مراقبة جودة الإصلاح
تقوم فرق المتابعة بزيارات دورية للتأكد من أن الإصلاح المُنجز لا يزال في حالة جيدة، ومن عدم ظهور أي علامات تدهور مبكر قد تشير إلى خلل في التنفيذ. وهذه المراقبة اللاحقة تسمح بتصحيح أي نقص محتمل بسرعة، وتحسين الممارسات التقنية للفرق في المشاريع المستقبلية.

التأكد من عدم تكرار العطب
تُولي المؤسسة أهمية خاصة للتحقق من أن الإصلاح المُنجز قد عالج السبب الجذري للمشكلة وليس فقط أعراضها الظاهرة، وذلك لتجنب تكرار ظهور نفس الضرر في المكان بعد فترة قصيرة. وهذا التحقق يضمن فعالية حقيقية للتدخلات، ويحافظ على ثقة المواطنين في جودة خدمات المؤسسة.

تسجيل البيانات في قاعدة معلومات
يتم توثيق كل عملية إصلاح ضمن قاعدة بيانات مركزية، تتضمن معلومات كنوع الضرر وموقعه وتاريخ التدخل والمواد المستعملة. وتشكل هذه القاعدة مرجعًا قيّمًا لتحليل الاتجاهات العامة لتدهور الطرقات، ولتخطيط أعمال الصيانة المستقبلية بشكل أكثر علمية ودقة، كما تمهد الطريق لتطوير المشروع نحو نظام ذكي مستقبلاً.

4.4الوسائل والتجهيزات المستعملة

يعتمد المشروع على مجموعة من الوسائل التقنية الضرورية لضمان سير عملياته بكفاءة وفعالية:

شاحنات نقل المواد
تُستعمل هذه الشاحنات لنقل المواد الأولية اللازمة للإصلاح، كالإسفلت والخرسانة والحصى، من مواقع التخزين أو الإنتاج إلى مواقع التدخل الميدانية. وتُعد هذه الوسيلة أساسية لضمان توفر المواد في الوقت المناسب، خاصة في حالات التدخل العاجل التي تتطلب سرعة في التزويد.

معدات الحفر والتنظيف
تشمل هذه المعدات آلات مخصصة لإزالة الأجزاء المتضررة من الطريق وتنظيف المنطقة المتضررة قبل البدء في عملية الترميم. وتضمن هذه المعدات إنجاز عملية التحضير بسرعة ودقة، مما يوفر الوقت اللازم لبقية مراحل الإصلاح ويحسن من جودة النتيجة النهائية.

آلات دك وضغط الطبقات
تلعب هذه الآلات دورًا محوريًا في ضمان تماسك وكثافة المواد الجديدة المستعملة في الإصلاح، من خلال دكها وضغطها بشكل جيد بعد وضعها. وتُعد هذه الخطوة حاسمة في تحديد متانة وعمر الإصلاح المُنجز، إذ إن أي تقصير في عملية الدك ينعكس سلبًا وبسرعة على جودة النتيجة النهائية.

مواد إصلاح (إسفلت، خرسانة، مواد معاد تدويرها)
تُشكل هذه المواد المكون الأساسي لأي عملية ترميم، وتحرص المؤسسة على توفير تشكيلة متنوعة منها لتغطية مختلف أنواع الأضرار والطرق، مع إعطاء الأولوية للمواد المستدامة والمعاد تدويرها كلما أمكن ذلك. وهذا التنوع في المواد المتاحة يمنح الفرق التقنية مرونة كبيرة في اختيار الحل الأنسب لكل حالة.

أدوات قياس ومراقبة الجودة
تستعمل الفرق التقنية أدوات متخصصة للتأكد من مطابقة الإصلاح المُنجز للمعايير التقنية المطلوبة، سواء من حيث السماكة أو مستوى الدك أو استواء السطح. وتضمن هذه الأدوات جودة ثابتة ومنتظمة في جميع التدخلات المُنجزة، بغض النظر عن الفريق أو الموقع الجغرافي.

5.4الموارد البشرية

يتطلب المشروع فريق عمل متكامل ومتنوع الاختصاصات لضمان سير جميع مراحله بشكل سليم:

مهندسين في الأشغال العمومية
يتولى هؤلاء المهندسون مسؤولية الإشراف التقني العام على المشروع، من تصميم الحلول التقنية المناسبة لكل حالة إلى مراقبة جودة التنفيذ ومطابقته للمعايير المطلوبة. ويشكل خبرتهم التقنية ضمانة أساسية لنجاح المشروع من الناحية الهندسية والتقنية.

تقنيين في الميدان
يقوم هؤلاء التقنيون بالتدخل المباشر في الميدان، من معاينة الأضرار وتحليلها إلى الإشراف على فرق الصيانة أثناء تنفيذ الإصلاحات. ويشكلون حلقة الوصل الأساسية بين التخطيط الهندسي والتنفيذ الفعلي على أرض الواقع.

عمال صيانة
يتولى عمال الصيانة التنفيذ الفعلي لعمليات الإصلاح على أرض الواقع، من تنظيف المناطق المتضررة

إلى وضع المواد ودكها وضغطها وفق التعليمات التقنية المحددة. ويشكل هؤلاء العمال العمود الفقري للتدخل الميداني اليومي للمشروع.

مسؤولين عن المتابعة والتخطيط
يتكفل هذا الفريق بتنظيم وترتيب أولويات التدخلات، ومتابعة تقدم الأشغال، وتحليل البيانات المُجمعة لتحسين استراتيجية الصيانة على المدى المتوسط والطويل. ويلعب دورًا محوريًا في ضمان الاستغلال الأمثل للموارد المتاحة للمشروع.

(مستقبلاً) فريق رقمي لتطوير النظام الذكي
يتصور المشروع في مراحله المستقبلية تكوين فريق متخصص في التكنولوجيا الرقمية، مكلف بتطوير وصيانة المنصات الذكية وأنظمة الذكاء الاصطناعي التي سيتم دمجها تدريجيًا ضمن آلية عمل المشروع. ويعكس هذا التوجه رغبة المشروع في مواكبة التطور التكنولوجي وتحويل نفسه تدريجيًا إلى نظام صيانة ذكي متكامل.

6.4أهداف المشروع

يسعى المشروع إلى تحقيق عدة أهداف أساسية، أهمها:

تحسين جودة الطرقات
يهدف المشروع بشكل أساسي إلى رفع المستوى العام لجودة الشبكة الطرقية، من خلال تدخلات منتظمة وفعالة تعالج مختلف أشكال التدهور بمجرد ظهورها. وهذا التحسين المستمر في الجودة ينعكس إيجابًا على تجربة جميع مستعملي الطريق، سواء السائقين أو المشاة.

تقليل زمن التدخل في الإصلاح
يسعى المشروع إلى تقليص المدة الزمنية الفاصلة بين اكتشاف الضرر والتدخل الفعلي لمعالجته، وذلك من خلال تنظيم فرق ميدانية سريعة الاستجابة ومنصة رقمية تسهل عملية الإبلاغ. وهذا التقليل في زمن التدخل يمنع تفاقم الأضرار الصغيرة وتحولها إلى مشاكل أكبر وأكثر تكلفة.

خفض التكاليف على المدى الطويل
من خلال الجمع بين التدخل السريع والمواد المستدامة والصيانة الوقائية المنتظمة، يسعى المشروع إلى تحقيق توفير ملموس في التكاليف الإجمالية للصيانة على المدى الطويل، مقارنة بأسلوب الصيانة التفاعلية التقليدية التي تنتظر تفاقم الأضرار.

استعمال مواد صديقة للبيئة
يحرص المشروع على دمج المواد المستدامة والمعاد تدويرها ضمن عملياته اليومية، بهدف تقليل الأثر البيئي لأنشطته والمساهمة في الحفاظ على الموارد الطبيعية. وهذا الالتزام البيئي يجعل من المشروع نموذجًا رائدًا في مجال الصيانة المسؤولة.

تطوير نظام صيانة أكثر تنظيمًا وفعالية
يهدف المشروع في نهاية المطاف إلى الانتقال من نمط الصيانة العشوائية وغير المنظمة إلى نظام صيانة مخطط ومبني على بيانات دقيقة، بما يحسن من كفاءة استغلال الموارد المتاحة ويرفع من جودة الخدمة المقدمة للمواطنين على المدى الطويل.

7.4أهمية المشروع

تظهر أهمية مشروع ROADFIX في عدة جوانب أساسية:

يساهم في تحسين السلامة المرورية
من خلال المعالجة السريعة والمنتظمة لمختلف أشكال تدهور الطرقات، يساهم المشروع بشكل مباشر في تقليل المخاطر التي تهدد سلامة مستعملي الطريق، سواء المركبات أو المشاة. وهذا التحسن في مستوى السلامة يُعد من أهم الفوائد الاجتماعية للمشروع، إذ يحمي أرواح المواطنين ويقلل من الخسائر البشرية والمادية.

يقلل من الحوادث الناتجة عن الحفر
بفضل التدخل السريع لمعالجة الحفر والتشققات بمجرد ظهورها، يساهم المشروع في تقليص عدد الحوادث المرورية الناتجة عن سوء حالة الطريق، والتي تشكل سببًا شائعًا للحوادث في العديد من المناطق. وهذا التقليل في الحوادث ينعكس إيجابًا على السلامة العامة وعلى تكاليف التأمين والأضرار المرتبطة بها.

يرفع من عمر الطرقات
من خلال اعتماد الصيانة الوقائية والتدخل المبكر بدل انتظار تفاقم الأضرار، يساهم المشروع في إطالة العمر الافتراضي للطرقات والحفاظ على استثمارات الجماعات المحلية في هذا القطاع لأطول فترة ممكنة، مما يقلل من الحاجة إلى إعادة الإنجاز الكامل المكلف.

يواكب التطور التكنولوجي في مجال الأشغال العمومية
من خلال إدماج البعد الرقمي حاليًا وتصوره للتطور نحو نظام ذكي مستقبلاً، يضع المشروع نفسه في مصاف المبادرات الحديثة والمواكبة لتحولات القطاع على المستوى العالمي. وهذا التوجه المستقبلي يمنح المشروع قدرة على التكيف والتطور المستمر بما يتماشى مع أحدث التقنيات المتاحة في هذا المجال.

9.4 خاتمة الفصل

يمثل مشروع ROADFIX خطوة مهمة ومتميزة نحو تطوير طرق الصيانة التقليدية وتحويلها إلى نظام أكثر كفاءة وتنظيمًا، من خلال الجمع الذكي بين العمل الميداني التقليدي الذي يبقى ضروريًا وأساسيًا، والحلول المستدامة التي تراعي البعد البيئي والاقتصادي في آن واحد. فبدل الاكتفاء بأسلوب الصيانة التفاعلية التي تنتظر تفاقم الأضرار للتدخل، يقترح المشروع منهجية أكثر تنظيمًا تعتمد على مراحل واضحة ومتسلسلة، من الاكتشاف إلى التحليل فالتدخل ثم المتابعة، بما يضمن معالجة فعالة وشاملة لمختلف أشكال تدهور الطرقات.

كما أن ما يميز هذا المشروع هو إمكانية التطور والتوسع المستقبلي نحو إدماج التقنيات الذكية، كأجهزة الاستشعار والذكاء الاصطناعي والمنصات الرقمية المتقدمة، وهو ما يجعله مشروعًا مرنًا وقابلاً للتكيف مع التطورات التكنولوجية القادمة. وبهذا، يقدم ROADFIX نموذجًا متكاملاً يجمع بين الواقعية العملية في مرحلته الحالية، والطموح الاستشرافي نحو مستقبل أكثر ذكاءً واستدامة في مجال صيانة البنية التحتية الطرقية.

الفصل الخامس

الدراسة الاقتصادية و تحليل السوق

5.1 مقدمة الفصل

تعد الدراسة الاقتصادية مرحلة أساسية في تقييم أي مشروع هندسي حيث تسمح بتحديد التكاليف المتوقعة و تحليل الجدوى الاقتصادية للحلول المقترحة . يهدف مشروع roadfix الى تقديم حلول ذكية و مستدامة لاصلاح و صيانة الطرقات مع التركيز على تحسين الأداء وتقليل تكاليف الصيانة على المدى الطويل .

5.2 فرضيلات الدراسة

من اجل اجراء الدراسة الاقتصادية تم اعتماد طريق نموذجي بالمواصفات التاللية :

طول الطريق : 1000 متر .

عرض الطريق : 7 امتار .

المساحة الاجمالية للطريق : 7000 متر مربع .

تم اعتماد هذه القيم كنموذج مرجعي لتقدير تكاليف المشروع .

5.3 تكلفة المواد و التجهيزات

العنصر	التكلفة التقديرية (دج / متر مربع)
الخلطة الاسفلتية	3500
الركام و المواد الحصوية	800
المواد المضافة و الروابط	1200
أجهزة الاستشعار الذكية	1500
اليد العاملة	1800
المعدات و النقل	1200

و بالتالي فان التكلفة الاجمالية التقديرية للمتر المربع الواحد تساوي : 10000 دج/متر مربع .

4.5 التكلفة الاجمالية للمشروع

باعتبار ان مساحة الطريق تساوي 7000 متر مربع فان التكلفة الاجمالية للمشروع تحسب كما يلي :

التكلفة الاجمالية = المساحة × تكلفة المتر المربع

التكلفة الاجمالية = 7000× 10000

الكلفة الاجمالية = 70000000 دينار جزائري .

5.5 مقارنة مع طرق الإصلاح التقليدية

لابراز الاجدوى الاقتصادية لمشروع roadfix تم اجراء مقارنة بينه و بين الطرق التقليدية لصيانة الطرقات .

المعيار	الطريقة التقليدية	مشروع roadfix
التكلفة الأولية	56 مليون دج	70 مليون دج

العمر الافتراضي	8 سنوات	15 سنة
تكرار الصيانة	مرتفع	منخفض
استهلاك المواد	مرتفع	اقل
الأثر البيئي	مرتفع	منخفض

6.5 تحليل الجدوى الاقتصادية

رغم ان التكلفة الاولية لمشروع roadfix اعلى من تكلفة الإصلاح التقليدي الا ان الحل المقترح يسمح بتقليل عدد عمليات الصيانة خلال فترة استغلال الطريق .

و بافتراض ان الطريق التقليدي يحتاج الى ثلاث عمليات صيانة إضافية خلال 15 سنة بتكلفة تقدر ب 20 مليون دينار جزائري لكل عملية فان التكلفة الاجمالية تصبح :

56 + 60 = 116 مليون دج .

و بالتالي فان الوفر الاقتصادي المحقق يساوي :

116 – 90 = 26 مليون دج .

أظهرت الاقتصادية ان مشروع roadfix يمثل استثمارا فعالا على المدى الطويل حيث يساهم في تقليل تكاليف الصيانة المتكررة و إطالة العمر الافتراضي للطريق و تحسين جودة البنية التحتية و على الرغم من ارتفاع التكلفة الأولية مقارنة بالحلول التقليدية الا ان الوفورات الاقتصادية المحققة خلا فترة الاستغلال تجعل المشروع خيارا مناسبا و مستداما لاصلاح و صيانة الطرقات .

8.5 دراسة السوق و المنافسة

تعتبر دراسة السوق و المنافسين خطوة أساسية لتقييم فرص نجاح مشروع roadfix في قطاع صيانة و اصلاح الطرقات .

تهدف هذه الدراسة الى التعرف على اهم الفاعلين في السوق الجزائرية و تحليل نقاط القوة و الضعف لديهم مع ابراز المزايا التي يقدمها المشروع المقترح .

1.8.5 السوق المستهدف

يستهدف مشروع roadfix الجهات المسؤولة عن انشاء و صيانة الطرقات في الجزائر و من بينها :

وزارة الاشغال العمومية و المنشات القاعدية .

مديريات الاغال العمومية للولايات .

البلديات .

شركات انجاز و صيانة الطرقات .

المؤسسات العمومية و الخاصة المكلفة بالابنية التحتية .

و يمثل قطاع الطرقات في الجزائر سوقا واعدا نظرا الى الحاجة المستمرة الى الصيانة الدورية و الإصلاح نتيجة التدهور الناتج عن حركة المرور و العوامل المناخية .

2.8.5 المنافسون في الجزائر

توجد عدة شركات تنشط في مجال انجاز و صيانة الطرقات من أهمها :

1 شركة كوسيدار للاشغال العمومية (cosider traveaux publics) :

تعد من اكبر الشركات الجزائرية في مجال الاشغال العمومية و انجاز الطرقات و المنشئات الكبرى

نقاط القوة

خبرة طويلة في المجال

إمكانيات مالية و تقنية كبيرة

انجاز مشاريع وطنية ضخمة

نقاط الضعف

الاعتماد بشكل أساسي على الطرق التقليدية

ارتفاع تكاليف المشاريع الكبيرة

2 الشركة الجزائرية للاشغال العمومية (SAPTA) :

تساهم في انجاز و صيانة العديد من مشاريع البنية التحتية عبر مختلف ولايات الوطن

نقاط القوة

انتشار واسع على المستوى الوطني

خبرة في تنفيذ المشاريع العمومية

نقاط الضعف

محدودية استخدام التقنيات الذكية الحديثة

العتماد على برامج الصيانة التقليدية

3 مؤسسات الاشغال العمومية الخاصة :

توجد العديد من المؤسسات الخاصة التي تنشط في مجال صيلتة الطرقات و إنجازها

نقاط القوة

سرعة التنفيذ

مرونة في التعامل مع المشاريع المحلية

نقاط الضعف

محدودية الموارد التقنية و المالية

تفاوت جودة الخدمات المقدمة

3.8.5 الميزة التنافسية لمشروع roadfix :

يتميز مشروع roadfix عن المنافسين من خلال :

استخدام حلول ذكية للكشف المبكر عن تدهور الطريق .

الاعتماد على مواد مستدامة و صديقة للبيئة .

تقليل تكاليف الصيانة على المدى الطويل .

إطالة العمر الافتراضي للطريق .

تحسين كفئة إدارة عمليات الصيانة .

تقليل الانقطاعات المرورية الناتجة عن الإصلاحات المرورية .

نقاط القوة

فكرة مبتكرة .

تقنيات ذكية و مستدامة.

تقليل تكاليف الصيانة المستقبلية .

تحسين جودة الطرقات .

نقاط الضعف

ارتفاع التكلفة الأولية .

الحاجة الى تجهيزات و تقنيات متخصصة .

ضرورة تكوين العمال على التقنيات الحديثة .

الفرص

زيادة الاستثمارات في البنية التحتية .

توجه الدولة نحو الرقمنة و الاستدامة .

ارتفاع الطلب على حلول الصيانة الفعالة .

التهديدات

المنافسة من الشركات الكبرى .

تقلب أسعار المواد الأولية .

صعوبة اعتماد التقنيات الجديدة في بعض المشاريع .

5.9 خاتمة الفصل

أظهرت دراسة السوق وجود طلب مستمر على خدمات صيانة وإصلاح الطرقات في الجزائر كما بينت ان معظم المنافسن يعتمدون على أساليب تقليدية و يمنح ذلك مشروع roadfix فرصة للتميز من خلال تقديم حلول ذكية و مستدامة تساهم في تحسين جودة الطرقات و تقليل التكاليف على المدى الطويل .

5.10 الموقع الالكتروني لمشروع ROADFIX :

في إطار تجسيد مشروع وتقديم خدماته بطريقة عصرية وسهلة الوصول، تم تطوير موقع RoadFix إلكتروني خاص بالمشروع يسمح بعرض خدمات الشركة والتعريف بالحلول الذكية والمستدامة المقترحة في مجال إصلاح وصيانة الطرقات.

يهدف الموقع إلى توفير منصة رقمية تمكن العملاء والهيئات المعنية من الاطلاع على خدمات الشركة والتواصل معها بسهولة، كما يساهم في تعزيز الحضور الرقمي للمشروع وتسهيل عملية نشر المعلومات المتعلقة بالحلول المقترحة.

يتكون الموقع من عدة صفحات رئيسية تتمثل في :

* الصفحة الرئيسية: تعرض نبذة عامة عن المشروع وأهدافه.

* صفحة الخدمات: تحتوي على مختلف الخدمات التي تقدمها الشركة في مجال إصلاح وصيانة الطرقات.

* صفحة المشاريع: تعرض أمثلة ومعلومات حول المشاريع المنجزة أو المقترحة.

* صفحة من نحن: تقدم معلومات حول الشركة ورؤيتها وأهدافها.

* صفحة الاتصال: تسمح للزوار بالتواصل مع الشركة وإرسال الاستفسارات والطلبات.

وقد تم تصميم الموقع بطريقة تضمن سهولة الاستخدام وسرعة الوصول إلى المعلومات، مع اعتماد واجهة حديثة ومتجاوبة مع مختلف الأجهزة مثل الحواسيب والهواتف الذكية.

يمثل هذا الموقع خطوة مهمة في تجسيد مشروع RoadFix وتحويله من فكرة نظرية إلى مشروع قابل للتطبيق والتسويق في الواقع .

https://sites.google.com/view/roadfix-project

Project Idea:

RoadFix is an innovative project focused on road repair using smart and sustainable solutions. It aims to improve road quality, reduce maintenance costs, and use eco-friendly materials.

Objectives:

* Improve road durability

* Reduce repair costs

* Use sustainable materials

* Apply smart technologies

المراجع

.1وزارة الأشغال العمومية والمنشآت القاعدية (الجزائر). دليل تصميم وإنجاز وصيانة الطرق.

.2المركز الوطني للدراسات والأبحاث المتكاملة للبناء .(CNERIB) دراسات وتقارير حول مواد البناء والمواد المعاد تدويرها.

.3مخابر الأشغال العمومية .(LTP) تقارير وتقنيات صيانة الطرق واختبار مواد الرصف.

.4الديوان الوطني للإحصائيات .(ONS) إحصائيات النقل والبنية التحتية في الجزائر.

.5الديوان الوطني للأرصاد الجوية. المعطيات المناخية وتأثيرها على المنشآت والطرقات.

.6الهيئة العربية للتقييس والمواصفات. المواصفات القياسية الخاصة بمواد البناء والطرق.

.7رسائل ماجستير ودكتوراه في الجامعات الجزائرية حول صيانة الطرق، الأرصفة الإسفلتية، والمواد المعاد تدويرها.

.8المجلة العربية للعلوم الهندسية. أبحاث في هندسة الطرق ومواد البناء.

.9مجلة جامعة قسنطينة للعلوم والهندسة. أبحاث في الهندسة المدنية وصيانة الطرق.

.10مجلة جامعة محمد البشير الإبراهيمي – برج بوعريريج. أبحاث في الهندسة المدنية ومواد البناء