First Libyan International Conference on Engineering Sciences & Applications (FLICESA_LA)
13-15 March 2023, Tripoli – Libya

مقترح منهجية لاختيار البديل المناسب لإعادة تأهيل الرصف المرن {الطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام – مدخل مسلاته) كحالة دراسية}

أ. د. محمد اشتيوي بن عمر[1]، م. عبدالحميد الهاشمي امبارك الأزرق[2]
1. استاذ بكلية الهندسة جامعة طرابلس، طرابلس، ليبيا
2. طالب دراسات بكلية الهندسة جامعة طرابلس، طرابلس، ليبيا
abdualazrg@yahoo.com [2] ،m.benomar49@gmail.com [1]

المستخلص: تواجه إدارات الطرق في العديد من دول العالم عددًا من التحديات بسبب عدم التوازن في الاستراتيجيات بين الموارد المالية المتاحة للصيانة وجدول أولويات إعادة تأهيل الطرق وكذلك زيادة عدد الطرق التي تحتاج إلى إعادة تأهيل أو إعادة إنشاء. تهدف هذه الدراسة إلى اقتراح منهجية علمية مبسطة لاختيار البديل المناسب لإعادة تأهيل الرصف المرن. من خلال إجراء مقارنة وتقييم بين أربعة بدائل مرشحة لإعادة تأهيل الطريق الساحلي الرابط بين بوابة كعام ومدخل مسلاته. تم تصميم البدائل لتكون متكافئة إنشائيا من حيث الأداء ومتطلبات الصيانة خلال فترة عمرها الخدمي. وتم إجراء المفاضلة بين البدائل الأربعة المختارة من أجل الحصول على البديل الانسب تقنيًا وماليًا وبيئيا حيث اتضح من خلال المفاضلة بين البدائل انه من الممكن تقليل تكاليف إعادة التأهيل إلى أكثر من 30% باستخدام تقنيات إعادة التدوير مقارنة بالطريقة التقليدية لإعادة تأهيل رصف الطرق. كما أظهرت النتائج أن استخدام تقنيات إعادة التدوير لرصف الطرق يؤدي إلى ترشيد استهلاك الطاقة ومواد الإنشاء بالإضافة إلى الحد من التلوث البيئي الناتج عن رمي نفايات الأسفلت والغازات المنبعثة من الآليات وعربات النقل. وتوصي الدراسة بالبحث عن التقنيات الحديثة لإعادة تأهيل رصف الطرق، ولا سيما تقنية إعادة التدوير على العمق الكامل، لما توفره من تكلفة وجهد ووقت.

الكلمات الدالة: إعادة تأهيل الرصف، إعادة تدوير كامل عمق الرصف، الأسفلت الرغوي، الخلايا الأرضية.

1. المقدمة

تعتبر الطّرق من أهم عناصـــر البُنية التّحتيّة وتكاد تكون من أهم وسـائل المواصـلات في معظم دول العالم، حتى أصبحت شبكات الطّرق مقياسا لتطوّر الدول من النّواحي الاقتصـــاديّة والصـــناعيّة والخدميّة نظرا للفوائد الجمّة التي تقدمها من تســهيلٍ لتنقّل الأفراد ونقل البضـائع والمواد الخام. يُصـمّم الطّريق وفقاً للمواصـفات القياسـيّة اللازمة للحصـــول على منشـــأ قادر على أداء وظيفتـه على الوجـه المطلوب وذلـك طوال فترة العمر التصـميمي، إلّا أنّه نتيجةً للتّقادم وكثرة الاستخدام وكذلك تـأثير الظروف البيئيّـة تحـدث العـديـد من التّغيّرات في منشـــأ الطريق، التي تؤدّي بدورها إلي نقصٍ في كفاءة الأداء وتُعرّض ســلامة مُســتخدمي الطريق للخطر، ما يســتوجب إجراء عمليات الصّــيانة ســواء الوقائيّة أو التّصـــحيحيّة منها، وذلك لغرض الحفاظ على شـــبكة الطريق واستدامة عمرها[1].

2. مشكلة الدراسة

عدم وجود آليات واضـــحة لاختيار طريقة الصـــيانة المناســبة للطرق وفي ظل وجود عجز في ميزانيات الصـيانة حيث أن التَّوسـع الكبير في إنشـاء الطُّرق، نتيجـة الطَّلـب المتزايـد على النّقل، أدَّى إلي اســتهلاك المواد الأوّلية وخاصـــة الرّكام، الأمر الذي نتج عنـه تنـاقص متزايـد في الكمّيـات المتوافرة من الرّكام الجيَّد ممّا أنشـــأ مشـــكلة جدِّية تعترض مُنفذي الطّرق تُضـاف إلي مشكلة التّلوّث البيئيّ المتزايد الذي تســبّبه الكميّات الكبيرة من المواد المكشــوطة ســنويا نتيجة إعادة تأهيل طبقات الرّصـــف بالطرق التقليدية، هذا فضـــلا عن تزايد كُلفة المنتجات النّفطية وتناقص مخصّـصـات الصّـيانة. كل هذه العوامل مجتمعة أدَّت إلي إيجاد تحدٍّ لإنجاز عمل أكثر بموارد أقل ممّا دفعنا إلي اقتراح منهجية لاختيار البديل المناســب لإعادة تأهيل الرصـــف المرن تعمل على خفض التّكاليف من جهـة، وتحقيق الجودة المطلوبـة من جهـة أخرى. فتمَّ

تركيز الجهود على إيجاد تكنولوجيا تحقّق الغرض من إعادة التَّأهيل بكلفة أقل.

3. أهمية الدراسة

تكمن أهمية الدراسة في تطبيق المنهجية المقترحة لتطوير اساليب أكثر اقتصاداً وأكثر أهمية لإدارات النقل مع زيادة حجم حركة المرور، وتدهور البنية التحتية للطرق السريعة، ونقص الميزانيات. لتكون قادرًا على أداء الصيانة وإعادة التأهيل، بالإمكانات الموجودة وبأقل التكاليف.

وتكمن أيضاً أهمية الدراسة في النقاط التالية:

- التشجيع علي البحث واستخدام بدائل لإعادة تأهيل الرصف تحقق القدرة الإنشائية المطلوبة وفق الأحمال المرورية.
- المحافظة علي الموارد الطبيعية وتقليل استنزافها وتوفيرها للاستخدام في تنفيذ مشروعات استراتيجية.

4. أهداف الدراسة

الهدف العام من هذه الدراسة هو اقتراح منهجية لاختيار البديل المناسب لإعادة تأهيل الرصف المرن وتطبيقها على قطاع من الطريق الساحلي (بوابة كعام - مدخل مسلاته) كحالة دراسية.

تم من خلال هذا البحث تطبيق المنهجية على قطاع من الطريق الساحلي يقع في شمال غرب ليبيا، يبدأ من بوابة مسلاته في اتجاه الشرق وينتهي في بوابة كعام، طريق مزدوج طوله حوالي 30 كيلومتر. تصنيفه :(طريق شرياني رئيسي خلوي – حضري) هذا القطاع من أهم قطاعات الطريق الساحلي الذي يمثل أهم الشرايين في وصل حركة المواصلات والنقل المتمثلة في الركاب، والبضائع، والمنتجات المختلفة من الشرق إلى الغرب والعكس.

5. حدود الدراسة

تقتصر هذه الدراسة علي اقتراح منهجية لإعادة تأهيل الرصف المرن وتطبيقها فقط على الطريق الساحلي قطاع {بوابة كعام – مدخل مدينة مسلاته}

يعتبر هذا القطاع من الطريق الساحلي من أهم قطاعاته لأنه يربط أهم مناطق توليد حركة النقل الثقيل (موانى مصراته والخمس ومصانع الإسمنت في الخمس وزليتن ومصنع الحديد والصلب بمصراته ومحاجر الرمل بزليتن) بأهم مناطق استقطاب حركة النقل الثقيل (طرابلس الكبرى والمنطقة الغربية من ليبيا) وبسبب عدم إجراء أي نوع من أعمال الصيانة لهذا القطاع منذ إنشائه في سبعينيات القرن الماضي علي الرغم من تضاعف حركة النقل الثقيل على الطريق انتشرت أضرار التشققات والتخدد البليغة على كامل سطح الرصف وأصبح يشكل خطرا على حركة المرور مما يستوجب إعادة تأهيله باستخدام تقنية تحقق الأهداف من إعادة التأهيل فنياً ومالياً وبيئياً.

6. الموقع العام للدراسة

الشكل التالي يوضح الموقع العام للطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام - بوابة مسلاته) الذي يخدم حركة النقل والمرور، للمركبات المتجهة من الشرق إلى الغرب وبالعكس مروراً بمدينة الخمس.

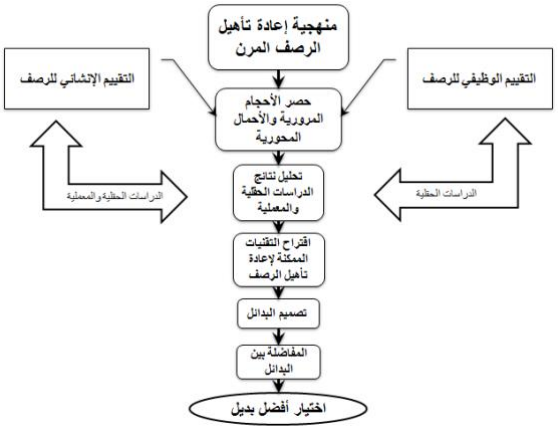
شكل (1) الموقع العام للطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام – مدخل مسلاته)[5].

7. المنهجية المقترحة

للوصـــول إلي اختيار البديل المناســب لإعادة تأهيل الرصـف فإنه من الضـروري الإجابة عن الأسـئلة التالية:

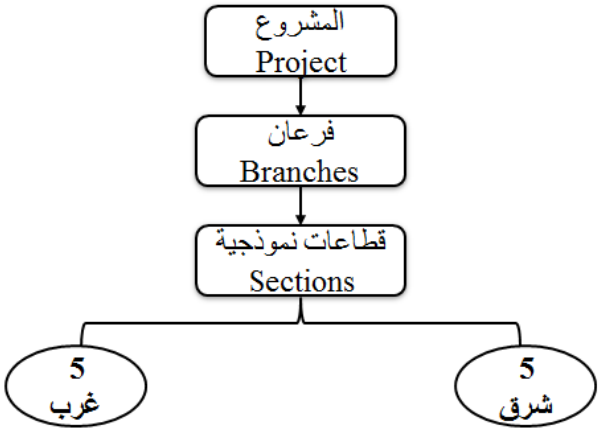
- ما هي أنواع الأضـــرار الوظيفية والإنشـــائية وأسبابها؟
- مـا هي الأحجـام والأحمـال المرور الحـاليـة والمستقبلية؟
- ما هي القدرة الإنشـائية الحالية للقطاع (سـمك وخصائص طبقات الرصف)؟
- ما هي القدرة الإنشـــائية المطلوبة للرصـــف لفترة تصميمية 20 سنة؟
- ما هي أفضـــل التقنيات الممكنة لإعادة تأهيل الرصف بهذا القطاع؟
- ما هي الطريقة المناسبة للمفاضلة بين البدائل (التقنيات) فنياً ومالياً وبيئياً؟

الإجابة عن هذه الاسـئلة تمثل المنهجية المقترحة. الشكل التالي يوضح مراحل الدراسة:



شكل (2) مخطط منهجية إعادة التأهيل للرصف المرن

تم تقييم حـالـة الرصـــف بـاســـتخدام برنـامج الميكروبيفر للتقييم الوظيفي لقطاع الدراســـة، حيث تم التقســيم علي مســتوى المشــروع إلى فرعين (شــرق، وغرب)، وقســم كل فرع إلى 5 قطاعات نموذجية (E_1 to E_5 ،W_1 to W_5) كالآتي[5]:



شكل (3) يوضح كيفية تقسيم المشروع إلى قطاعات نموذجية

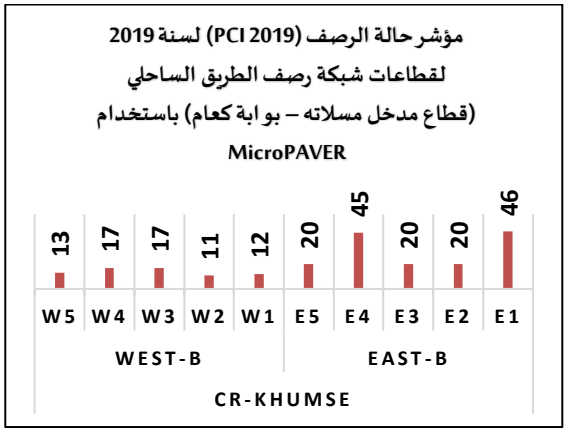
جدول (1) تسمية (Name) ورمز (ID) معالم شبكة رصف الطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام – مدخل مسلاته)[5].

طول القطاع Length (m)	عرض القطاع Width (m)	رمز القطاع Section ID	اسم ورمز الفروع Branch Name/ID		اسم ورمز الشبكة Network Name/ID
			Branch ID	Branch Name	
3,000	8	E1	East-B	East Branch	الطريق الساحلي-الخمس Coastal Road-Khumse CR-Khumse
5,600	8	E2			
10,400	8	E3			
8,200	9.5	E4			
3,200	8	E5			
4,000	8	W1	West-B	West Branch	
8,000	8	W2			
12,200	8	W3			
3,800	8	W4			
2,300	8	W5			

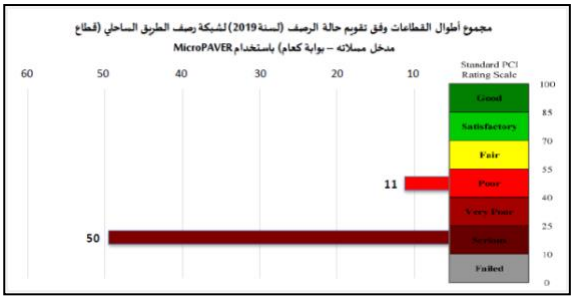
1.7 ملخص نتائج تحليل بيانات التقييم الوظيفي لقطاع الدراسة

- ثمانية (8) قطاعات ((E5،E3،E2)-(W5،W4،W3،W2،W1)) كان معدل مؤشر حالة الرصف (PCI = 16)، والتقييم الوظيفي لها في سنة 2019 خطير Serious. ومجموع أطوالها (50) كم تقريباً، ما نسبته 82% من الطول الكلي للرصف بالشبكة، كما هو موضح بشكل (4) والشكل (5) وتحتاج إلي إعادة تأهيل Rehabilitation.

- قطاعان (2) اثنان (E4،E1) كان معدل مؤشر حالة الرصف (PCI = 45)، والتقييم الوظيفي لها في سنة 2019 رَدِّي Poor، ومجموع أطوالها (11) كم تقريباً، ما نسبته 18% من الطول الكلي للرصف بالشبكة، كما هو موضح بشكل (4) والشكل (5) وتحتاج إلى أعمال معالجة التشققات والحُفر والتخدد، بالإضافة إلى إعادة تأهيل الأكتاف[5].



شكل (4) مؤشر حالة الرصف لسنة (2019) لقطاعات لشبكة رصف الطريق الساحلي[5].



شكل (5) مجموع أطوال القطاعات وفق تقييم حالة الرصف لسنة (2019) لشبكة رصف الطريق[5].

- (23) هي قيمة معدل مؤشر حالة الرصف PCI لسنة 2019 لكامل شبكة رصف الطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام– مدخل مسلاته) باستخدام ميكروبيفر.
- خطير Serious هو التقييم الوظيفي Rating في سنة 2019 لكامل شبكة رصف الطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام – مدخل مسلاته) باستخدام ميكروبيفر كما مبين بالجدول (2).

جدول (2) نتيجة حساب معدل مؤشر حالة الرصف (لسنة 2019) لشبكة رصف الطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام – مدخل مسلاته) باستخدام MicroPAVER[5].

التقييم Rating	معدل مؤشر حالة الرصف (لسنة 2019) PCI 2019 (MicroPAVER)	مساحة الرصف Total Area (sq m)	عدد القطاعات Section No	عدد الفروع Branch No	رمز الشبكة Network ID
خطير Serious	23	497,900	10	2	RC-Khumse

2.7 ملخص الاختبارات الحقلية والمعملية والمواصفات المتبعة

تتلخص الاختبارات المعملية والحقلية التي أجريت لتحديد الخواص الفيزيائية والهندسية للعينات المختارة من الطبقات الأسفلتية والطبقات تحت السطحية من طبقة الأساس والتربة الطبيعية لقطاع الدراسة (بوابة كعام – مدخل مسلاته) موضحة في الجدول التالي[5]:

جدول (3) يوضح الاختبارات الحقلية والمعملية والمواصفات المتبعة[5].

الاختبار	عدد الاختبارات	طريقة الاختبار أو المواصفة المتبعة
اختبار التدرج الحبيبي للتربة	6	ASTM D 422
اختبار المحتوى المائي	8	ASTM D 2216
اختبار حدود اتربرغ	6	ASTM D 4318
اختبار بروكتور المعدل	6	ASTM D 1557

اختبار (C.B.R) في المعمل	6	ASTM 1883-AASHTO T-193
اختبار (C.B.R) في الموقع	8	BS 1377-9 : 1990
اختبار الكثافة الحقلية	8	ASTM D 1556
اختبار اختراق المخروط الديناميكي (DCPT)	4	ISSMFE (1977b, 1989)
تحديد مقدار البيتومين المستخلص	3	ASTM D 2172
التدرج الحبيبي لركام الطبقة الاسفلتية	3	ASTM D 3515
كثافة الظاهرية للقوالب الاسفلتية	30	ASTM C127

☒ الاستنتاجات

- تصـــنف معظم مواد طبقـة الأســـاس (GM) Gravel Silt تربة حصـوية مع الغرين، والتربة الطبيعيــة Silt Liquid (ML) غرين منخفض اللـدونـة مخلوط مع الرمـل وذلـك بـالاعتمـاد علي التصـــنيف الموحد للتربة Unified (USCS) Soil Classification System وطـبـقـاً لتصنيف ASSHTO صنفت معظم مواد الأساس (A-1-b) بينما صنفت جميع التربة الطبيعية تحت المجموعة (A-4)[5].
- تتراوح قيم أقصـــى كثافة جافة التي تم الحصـــول عليهـا من اختبـار الـدمـك المعـدل من 1.96 إلي (1.99) جرام/ســـم3، والمحتوي المـائي الأمثـل يتراوح بين 7.5% إلي 9.9% للتربـة الطبيعيـة، بينمـا كـانـت قيم أقصـــى كثـافـة جـافـة (2.20) جرام/سم3 والمحتوي المائي الأمثل 5.1% لطبقة الأساس الحبيبي[5].
- تتراوح قيم CBR لطبقـة الأســـاس الحبيبي من 93.97% إلي 198.5%، وتتراوح قيم اختبـار نســـبـة تحمـل كـاليفورنيـا للتربـة الطبيعيـة من 8.20% إلي 21%.
- الركام الخشن والناعم المستخدم في طبقة الرصف المرن مطابق للمواصفات القياسية ذات العلاقة في معظم اختبـارات التحليـل بمنـاخـل Sieve analysis.
- المادة المالئة Filler مطابقة المواصـفات القياسـية ذات العلاقة في جميع الاختبارات باســـتثناء نقطة كيلو مترية واحدة (000+24,000)[5].
- نسـبة المادة الرابطة الأسـفلتية في جميع القطاعات مطابقة للمواصـــفات ذات العلاقة باســـتثناء القطاع (000+24,000).
- ســـمك الطبقة الأســـفلتية يتراوح من 8.2 إلي 29.2 سم.
- سمك طبقة الأساس الحبيبي 35 سنتيمتر (14 بوصة)[5].

3.7 ملخص نتـائج المســـح المروري في كـل القطاع

جدول (4) نتائج المسح المروري في كل القطاعات[5].

الاتجاه	متوسط حجم المرور اليومي (ADT) (مركبة/يوم)	متوسط حجم المرور اليومي لمركبات النقل (ADTT)	نسبة مركبات النقل (%)
إلي الغرب (بوابة كعام - بوابة مسلاته)	14,219	2,410	16.95
إلي الشرق (بوابة مسلاته - بوابة كعام)	14,133	2,366	16.74
مجموع حجم المرور اليومي في الاتجاهين	28,352	4,776	16.85

❖ الخلاصة:

- حجم المرور اليومي بـالقطـاع لســـنـة 2019 = 28,352 مركبـة/يوم، والتوزيع الاتجـاهي لحركـة المرور تقريباً 50/50.
- حجم المرور اليومي لمركبات النقل لســنة 2019 = 4,776 مركبـة نقـل/يوم، والتوزيع الاتجـاهي لحركة المرور تقريباً 50/50.
- متوسط نسبة مركبات النقل = 16.85%.

4.7 ملخص نتائج دراسة مسح الأحمال المحورية لقطاع الدراسة

جدول (5) يبين قيمة معامل الضرر حسب الاتجاه.

الاتجاه	نتائج حساب قيمة معامل الضرر لمركبات النقل الفعلي (T_f)
في الاتجاه إلى الشرق (بوابة مسلاته – بوابة كعام)	13
في الاتجاه إلى الغرب (بوابة كعام – بوابة مسلاته)	43
متوسط الاتجاهين	28

- عند اعتبار مركبات النقل التي بها حمولة زائدة محملة بحمولة قانونية فإن متوسط معامل الضرر لمركبات النقل تقريباً في حدود 4.25.
- ما يؤكد هذه القيمة فقد تبت خلال سنوات تم تطبيق تجربة ضبط حمولات مركبات النقل في ليبيا (2008 إلي 2010) وجد أن متوسط معامل الضرر بالطريق الساحلي يتراوح من 2.5 إلي 4.5.
- حيث إن من واجب الدولة تطبيق ضبط الحمولات الزائدة فقد تم اعتماد قيمة متوسط معامل الضرر لمركبات النقل 4.25 لتصميم بدائل إعادة التأهيل.

5.7 البدائل المرشحة لإعادة تأهيل القطاع والتي يتم المقارنة بينها من جميع النواحي الفنية والمالية والبيئية

جدول (6) يبين البدائل المقترحة لإعادة تأهيل رصف الطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام – مدخل مسلاته)

البديل الأول	**الطريقة التقليدية**
البديل الثاني	**إعادة تدوير كامل طبقات الرصف باستخدام الأسمنت**
البديل الثالث	**إعادة تدوير كامل طبقات الرصف باستخدام الأسفلت الرغوي والأسمنت**
البديل الرابع	**إعادة تدوير كامل طبقات الرصف باستخدام تقنية الخلايا الأرضية القاسية (Tough Geocells)**

❑ التصميم الإنشائي للبدائل

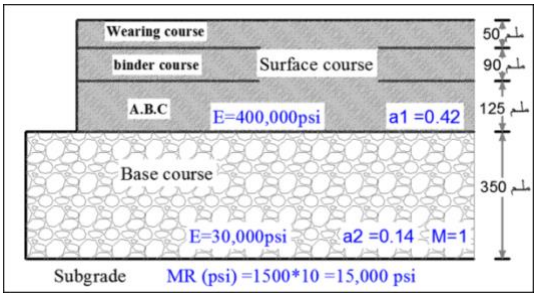
- تم التصميم بطريقة الجمعية الأمريكية لموظفي الطرق والنقل AASHTO.
- التحقق بالطريقة الميكانيكية التجريبية M-E، التي يتم بها التحقق من التصاميم بالتحليل بـ KENLAYR.

❖ مدخلات التصميم للبدائل المقترحة لإعادة تأهيل قطاع الدراسة.

ADTT	**4,776 مركبة نقل**
T_f	**4.25**
G_f	**29.78**
L_f	**%45**
CBR	**%10**
Reliability (R)	**%90**
ESAL	**100 Million**
Structural Number (SN)	
Surface Course	SN_1 = 4.33
Base Course	SN_2 = 5.47

1.5.7 البديل الأول: الطريقة التقليدية

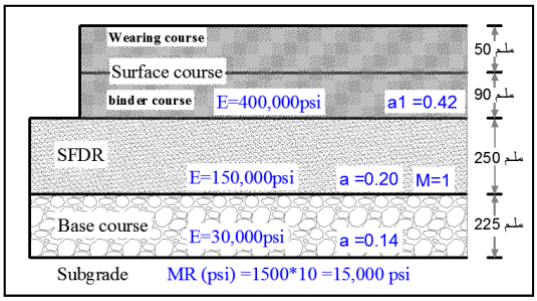
- إزالة كامل طبقات الرصف الأسفلتية ونقل المخلفات ورميها بعيداً عن الموقع.
- تجهيز وتسوية طبقة الأساس الحبيبي، حيث انه ينتج عن عمليات الإزالة وحركة مركبات النقل والأليات قلقلة لطبقة الأساس مما يستوجب تسويتها ودكها وإضافة مواد جديدة أن لزم الأمر.
- إعادة رصف الطبقات الأسفلتية وفق السمك التصميمي الجديد.



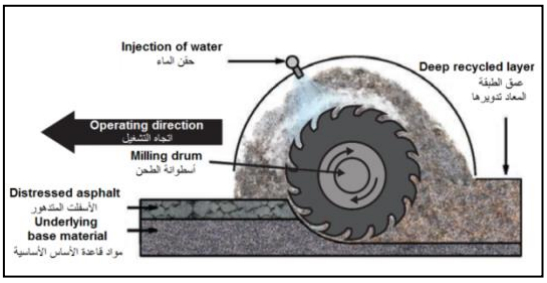
شكل (6) القطاع النموذجي للبديل الأول

2.5.7 البديل الثاني: إعادة تدوير كامل طبقات الرصف باستخدام الأسمنت

- ❑ إعادة تدوير كامل عمق الرصف أو استصلاح كامل عمق الرصف Full Depth Reclamation (FDR): وهو عبارة عن عملية يتم من خلالها إعادة إنشاء الأرصفة الأسفلتية من خلال إعادة تدوير طبقات الطريق الحالي بإضافة مادة مثبتة كما مبين بالشكل (8).
- في هذا البديل نعيد تدوير مواد طبقة الرصف في مكانها، فليست هناك حاجة لتوريد مواد جديدة فقط خلط مواد طبقات الرصف القديمة وإضافة نسبة من مادة الأسمنت لتكوين طبقة أساس قوية من الخليط.



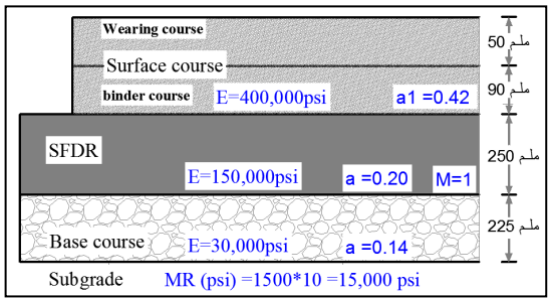
شكل (7) القطاع النموذجي للبديل الثاني



شكل (8) عملية التفكيك والتفتيت والخلط بآلة إعادة التدوير[14].

3.5.7 البديل الثالث: إعادة تدوير كامل طبقات الرصف باستخدام الأسفلت الرغوي والأسمنت

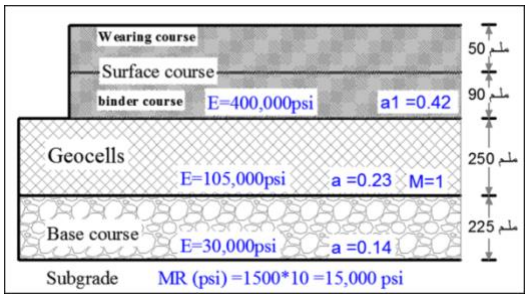
- في هذا البديل تتكون المادة المثبتة من نسبة صغيرة من الأسمنت الجاف والأسفلت الرغوي.
- تتكون مقطورة إعادة التدوير من صهريج أسفلت متصل بآلة إعادة التدوير التي تضم سلسلة من غرف التمدد للأسفلت، تليها شاحنة نقل المياه التي تم توصيلها أيضًا بآلة الطحن.



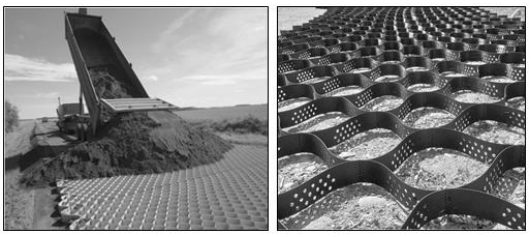
شكل (9) القطاع النموذجي للبديل الثالث

4.5.7 البديل الرابع: إعادة تدوير كامل طبقات الرصف باستخدام تقنية الخلايا الأرضية القاسية (Geocells)

- في هذا البديل يتم حبس المواد المدورة (Confining) عن طريق فرش الخلايا الارضية القاسية (NPA Geocells) كما مبين بالشكل (11) وملؤها بالمواد المدورة ويهدف هذا إلى منع الحركة الأفقية لطبقة الاساس وتكوين طبقة شبه صلبة (Matress) والتي تزيد من القدرة الانشائية للرصف من خلال توزيع الاجهادات على مساحة اكبر.



شكل (10) القطاع النموذجي للبديل الرابع

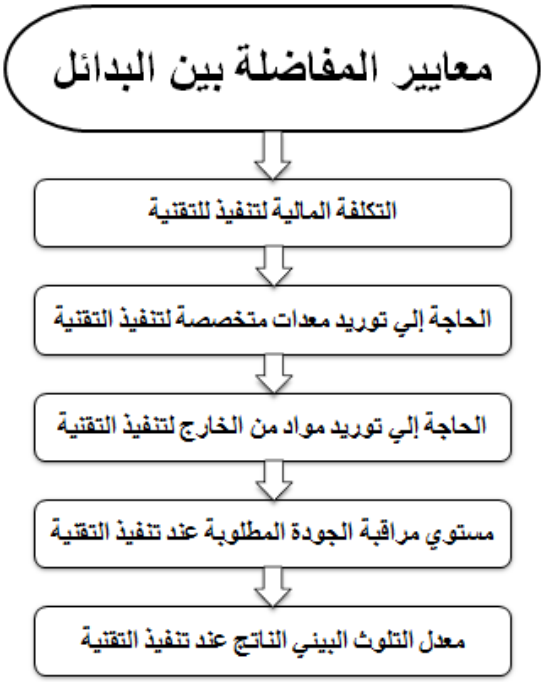


شكل (11) يوضح الخلايا الأرضية أثناء مرحلة الإنشاء

6.7 أهمية المفاضلة بين البدائل:

- برزت أهمية المفاضلة بين البدائل كونها تمثل الوسيلة التي يمكن من خلالها اختيار البديل المناسب الذي يضمن تحقيق الأهداف المحددة.
- يعتبر قطاع النقل الطرقي يحتل المرتبة الأولى بين القطاعات الأعلى في الإنفاق العام.
- عملية المفاضلة بين بدائل إعادة التأهيل يمكن أن تكون بمثابة وسيلة تساعد في تحقيق الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة من جهة، كما تساعد على توجيه تلك الموارد إلى استخدام دون آخر من جهة أخرى.

- **تم وضع عدد من أهم المعايير في المفاضلة لاختيار البديل الأفضل المناسب.**



❖ إجمالي تكلفة التنفيذ المبدئية للمتر المربع لكل بديل

البديل Alternative	التكلفة / المتر المربع للطريق Cost / Square Meter of the Road
التقليدي Conventional	344.890 د.ل./م^2
إعادة التدوير بالأسمنت FDR With Cement	205.330 د.ل./م^2
إعادة التدوير بالأسفلت الرغوي والأسمنت FDR With Foamed bit. & Cement	252.330 د.ل./م^2
إعادة التدوير بالخلايا الأرضية القاسية Reinforcement With NPA Geocell	236.330 د.ل./م^2

وفقًا للنتائج المعروضـــة في هذا الجدول، فإن بدائل تقنيات إعادة التدوير أقل تكلفة من البديل التقليدي، حتى دون تحميـل تكـاليف التخلص من النفـايـات أو مخلفات الطبقات الأســفلتية القديمة، لذلك من الناحية الاقتصـــادية، فإن انســـب البدائل هما إعادة التدوير بالأســمنت وإعادة التدوير باســتخدام الخلايا الأرضــية القاسية، إضافةً إلى ذلك، سيؤدي إعادة التدوير بالأسمنت أو باستخدام الخلايا الأرضـية إلي تقليل سـمك الطبقات الأســفلتية للرصـــف بحوالي 125 ملم مقارنة بالبديل التقليـدي، و بـذلـك تحقق تخفيض في التكلفـة أكثر من 30% مقارنة بالبديل التقليدي.

جدول يبين نسبة التخفيض في التكلفة لبدائل إعادة التدوير مقارنة بالبديل التقليدي

البديل	التكلفة / المتر المربع للرصف	نسبة التخفيض المئوية من البديل التقليدي	التوفير لكل متر مقارنة بالبديل التقليدي
التقليدي	344.980 د.ل./م^2	% 0	-
إعادة التدوير بالأسمنت	205.330 د.ل./م^2	%40.465	139.56 د.ل./م^2
إعادة التدوير بالأسفلت الرغوي والأسمنت	252.330 د.ل./م^2	%26.837	92.56 د.ل./م^2
إعادة التدوير بالخلايا الأرضية القاسية	236.330 د.ل./م^2	%31.476	108.56 د.ل./م^2

جدول المفاضلة بين بدائل إعادة التأهيل

البديل	التكلفة المالية للتقنية	المعيار: الحاجة إلى توريد معدات متخصصة لتنفيذ التقنية	المعيار: الحاجة إلى توريد مواد من الخارج لتنفيذ التقنية	المعيار: مستوى مراقبة الجودة المطلوب عند تنفيذ التقنية	المعيار: محل التلوث البيني الناتج عند تنفيذ التقنية	الدرجة
البديل التقليدي	🔴	🟡	🔴	🔴	🔴	5
إعادة تدوير باستخدام الإسمنت	🟢	🔴	🟡	🔴	🟡	20
إعادة تدوير باستخدام الأسفلت الرغوي والإسمنت	🟡	🔴	🔴	🔴	🟡	10
إعادة تدوير باستخدام تقنية الخلايا الأرضية القاسية	🟢	🟡	🔴	🟡	🟡	25

🔴	عالية	0
🟡	متوسطة	5
🟢	منخفضة	10

المعيار	عالي	متوسط	منخفض
التكلفة	أكثر من 300 د.ل/م^2	250 – 300 د.ل/م^2	أقل من 250 د.ل/م^2

❖ **من خلال المفاضلة بالجدول حقق البديل الرابع (إعادة التدوير باستخدام الخلايا الأرضية القاسية) أفضل نتائج.**

8. الخلاصة والاستنتاجات

وفقًا للنتائج المعروضـــة في هذه الدراســـة، فإن الاستنتاجات الرئيسية التي تم استخلاصها هي كما يلي:

1. جميع بدائل إعادة التأهيل الموضـــحة في هذه الدراسـة توفر نفس السطح للرصـف وتحسين جودة الركوب، مع أنّ الاختلاف في تقنيـات الإنشاء لكل بديل.
2. البـديـل الأول التقليـدي الـذي يتم فيـه (إزالـة الطبقات الأسفلتية وإعادة رصـفها وفق السمك التصـــميمي الجديد) يعتبر من أكثر بدائل إعادة التأهيل تكلفة حيث وصـــل ســعر المتر المربع للرصـــف منـه إلى (344.890 دينـار ليبي) وأكثرهم مخلفاً للنفـايـات والحـاجـة إلي توريد الكثير من مواد الإنشاء.
3. يمكن تحقيق توفير كبير للتكلفـة المـاليـة عن طريق اختيار البدائل التي تشـــمل اســـتخدام المواد المعاد تدويرها لكامل عمق الرصـــف (FDR) من مخلفات الطبقات الأسفلتية القديمة للقطـاع والحد من اســـتهلاك الموارد الجديدة والتخلص من مخلفـات الإنشـــاء الثـانويـة للمشـــروع واســـتخدامها في الطبقات الجديدة (والتوفير في التكلفة المالية الإجمالية تصل إلى

30% في المشـــروع الحالي) مقارنة بالبديل السابق التقليدي.

4. البديل الثاني (إعادة تدوير كامل عمق الرصف باستخدام الأسمنت) حقق تكلفة مالية منخفضة للرصـــف حيث بلغ الســـعر للمتر المربع (205.330 دينـار ليبي وذلـك نتيجـة توفر المواد محلياً ووجود مصـانع لإنتاج الأسـمنت في المناطق الشرقية والغربية من ليبيا وإمكانية إنشـاء مصـانع جديدة لمادة الأسـمنت في جميع أنحاء ليبيا.
5. حقق البديل الرابع (إعادة تدوير كامل عمق الرصـــف باســـتخدام تقنية الخلايا الأرضـــية القاسية Geocell) ثاني تكلفة مالية منخفضة لبدائل إعادة تأهيل الرصف المرن بسعر قد بلغ (236.330 دينار ليبي) للمتر المربع.
6. حقق البديل الثالث (إعادة تدوير كامل عمق الرصـــف بـاســـتخدام الأســـفلت الرغوي والأسـمنت) تكلفة متوسـطة أي (252.330 دينار ليبي) للمتر المربع وذلك نتيجة احتياجه لتوريد المادة الأســاســية المســتخدمة للتثبيت الأســـفلت الرغوي من الخـارج ومـا يقـابلهـا بالدولار والحاجة إلي توريد معدات متخصصة لتنفيذ التقنية أو توريد مصـــانع للإنتاج داخل ليبيا.
7. تعتبر بدائل إعادة التأهيل التي تعتمد تقنيات (إعادة التدوير كامل عمق الرصف بالأسمنت، والأسفلت الرغوي والأسمنت، والتعزيز لطبقة الأساس بالخلايا الأرضية القاسية) من انسب البدائل من نـاحيـة تقليل وقت التنفيذ لإعـادة التـأهيـل وســـرعـة في إنجـاز العمـل، وفتح الطريق، في وقـت أســـرع أمـام المـارة، والمستخدمين، وأقل ضجيجا.
8. تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بشكل كبير باستخدام تقنيات إعادة التأهيل التي تشتمل على مواد معاد تدويرها "في الموقع" إلى نســـبة متوســـطة مقارنة بتنفيذ البديل (التقليدي) الذي تزيد الانبعاثات فيه بنسبة عالية جداً.
9. نتـائج تصـــميم الرصـــف بطريقـة ألأشـــتو (ASHTO) لبدائل الدراســة أظهرت ســمكا أقل لطبقات الرصـــف الأســـفلتية عالية التكلفة لبـدائـل إعـادة التـدوير والبـديـل المعزز بتقنيـة الخلايا الأرضـــيـة القاســـيـة مقارنـة بـالبديل التقليـدي (إزالـة الطبقـات الأســـفلتيـة وإعـادة رصفها مجدداً).
10. اسـتخدام نماذج شـركة شـل في تحديد العمر الإجهـادي N_f والعمر التخـددي N_d تتوافق بشكل كبير مع طريقة ألأشتو 1993.

9. التوصيات

من خلال نتائج هذه الدراسة نوصي بالآتي:

1. ســرعة وضــع برنامج نظام لإدارة الرصــف (PMS) لبرمجة وإدارة الصـــيانة الوقائية والدورية في الوقت المناسب لأن إعادة التأهيل للأرصـفة المتدهورة أكثر تكلفة ولكن بوضـع نظام لإدارة الرصـف في أسـرع وقت ممكن. يســهل عمليات جرد البنية التحتية للرصـــف، وتقييم حـالتـه الحـاليـة والمتوقعـة، وتحـديـد احتياجات الميزانية للحفاظ على حالة الرصـف فوق مسـتوى مقبول، وإمكانية تحديد متطلبات العمل، وتحديد أولويات المشـاريع، وتحسـين إنفاق أموال الصيانة وإعادة التأهيل.
2. تطبيق اسـتراتيجية المفاضـلة بين البدائل توفر فـاعليـة من حيث التكلفة واختيـار بـدائل إعـادة التأهيل المناســبة؛ ويســمح لإدارات الطرق بتخصـيص ميزانية الصـيانة مع بعض درجات

المرونـة. من أجـل تطوير طرق التـأهيل التي يمكن استخدامها.

3. تنفيـذ البـديـل الثـاني أو الرابع (إعـادة التـدوير بالإسـمنت أو بتقنية الخلايا الأرضـية القاسـية) لتأهيل قطاعات الطريق الســـاحلي وذلك من خلال نتائج المفاضلة التي أظهرت مزايا تكلفة كل منهم من ناحية السعر لكل متر مربع ولكن للبديل المعزز بالخلايا الأرضـية القاسية أظهر نتائج أفضل لبقية معايير المفاضلة.
4. إجراء متابعة وتقييم مسـتقبلية لحالة الرصـف لتوثيق الأداء طويل المدى لقطاع الرصـف من أجل التحقق من صـــحة التنبؤات المقدرة لعمر خدمة البديل.
5. مواكبة النهضـــة التي حدثت في مجال الطرق بتطوير وتدريب المهندسين والأطقم الفنية علي برامج (PMS) والتعرف علي التقنيـات الجديدة لأن بدائل. إعادة التدوير لكامل عمر الرصف تعتبر تقنية جديدة في ليبيا.
6. عمل مســـوحات دورية لكامل شـــبكة الطرق بليبيا يتم من خلالها تحديد معامل الضـــرر للشاحنات T_f.
7. أن يتم تحديد معامل الضـرر لعربات النقل من خلال الدراسات المحلية وليس من هيئة ألأشتو (التي لها ظروف محلية خاصـــة بها لا تتوافق مع الظروف المحلية الخاصة بليبيا)
8. ضـــبط ومراقبة للحمولات الزائدة وضـــغط الإطـارات وذلـك بتركيـب موازين في المنـافذ البحرية والبرية وكذلك المصـانع المختلفة مثل مصـنع الحديد والصـلب ومصـانع الأسـمنت والمحاجر الخاصـــة بالركام والرمل، ووضـــع غرامات كبيرة للمخالفين.
9. وضـع ضـوابط لاستيراد مركبات النقل تتضمن توزيع أوزان محوريـة في حـدود الأوزان القانونية وبحمولة أكبر للشاحنة الواحدة.

10. المراجع

1. عبدالسلام الصادق سليمان، "مقارنة تقنيات إعادة تأهيل الرصف الأسفلتي"، رسالة ماجستير تحت اشراف محمد الشتيوي بن عمر، قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس، 2014 م.
2. Shahin, M.Y. and Walther, J. A. (1990). "Pavement Maintenance Management For Roads and Streets Using the PAVER System". Technical Report No. M-90/05, U. S. Army Construction Engineering Laboratory, July.
3. "Pavement Management for Airport, Roads, and Parking Lots", 2nd Edition, M.Y. Shahin, Springer Science+Business Media, LLC, 2002
4. ASTM D6433,(2007). "Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys."
5. مكتب الجامعة للاستشارات الهندسية، "دراسة إعادة تأهيل الطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام – مدخل مدينة مسلاته)"، شركة الاشغال العامة مصراته، 2019.
6. علي محمد سالم أبودور، "الدليل الليبي لتصميم الرصف المرن"، رسالة ماجستير، تحت اشراف محمد الشتيوي بن عمر، قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس، ربيع/ 2016 م.
7. Yang H . Huang , University of Kentucky, "Pavement Analysis and Design". Second Edition, 2004.
8. شركة نورول التركية للإنشاءات والتجارة المساهمة. "تقرير دراسات وتصاميم اعمال الصيانة للطريق الساحل قطاع الخمس القره بولي". 2008.
9. "Traffic Data Collection and Analysis". Ministry of Works and Transport. Roads Department. Gaborone, Botswana. February 2004.
10. Rood Note 40. "A guide to the measurement of axle loads in developing countries using a portable axle weigh bridge". transport and Road Research laboratory (TRRL), Department of transport. U.K 1978.
11. محمد الشتيوي بن عمر، عبدالحكيم علي الشماخ. ورقة بحثية بعنوان. "الأحمال المرورية التصميمية لإعادة تأهيل الطريق الساحلي قطاع (بوابة كعام- مدخل مسلاته)". جامعة طرابلس. 2020.
12. محمد الشتيوي بن عمر، عبدالحكيم علي الشماخ. ورقة بحثية بعنوان. "الأحمال المحورية وضغط الإطار لمركبات النقل بالطريق الساحلي قطاع (طرابلس – مصراته)". جامعة طرابلس. 2020.
13. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, "Guide for Design of Pavement Structures", Washington 1993.
14. "Guide to Full-Depth Reclamation (FDR) with Cement", The Portland Cement Association, march 2017.
15. David L. Rettner, Sr. vice president. American Engineering Testing ,Inc. "28th Annual Regional Local Roads Conference".
16. Diane Warner,. "Cement Based Stabilization Solutions Full-Depth Reclamation", NWPMA, Portland, Oregon. October, 25, 2016.

17. Daniel E, Wegman, Mohammad, Reza, Sabouri. “Base Stabilization Guidance and Additive Selection for pavement Design and Rehabilitation”. LRRB Report. December, 2017.
18. Dennis A. Morian, Mansour Solaimanian, Barry Scheetz, Shervin Jahangirnejad. “Developing Standards and Specifications for Full Depth Pavement Reclamation”. The Pennsylvania Department of Transportation. Final Report. May 25, 2012.
19. Amarh, Eugene. May 2, 2017. “Evaluating the mechanical properties and long-term performance of stabilized Full-Depth Reclamation base materials”. Master Thesis. Civil Engineering, Blacksburg, Virginia.
20. Meisam Norouzi, Sanat Pokharel., Marc Breault. “Geocell-Reinforced Pavement Structure State of Practice in Canada”. 2019.
21. Samo Peter Medved, Bojan Žlender, Stanislav Lenart,. “Parametric study of geocell reinforced pavement”. 2018.
22. Imran M. Syed,. “Full-Depth Reclamation using Portland cement: A study of long – term performance”. Portland Cement Association, 2007.
23. David H. Timm,; Mary M. Robbins.; Nam Tran, Carolina Rodezno. “Flexible Pavement Design – State of the Practice”. National Asphalt Pavement Association. NCAT Report, August, 2014.
24. Ofer Kief,; Truong Dang Toan,. “Neoweb® 3D Cellular Confinement System for Structural Pavement Reinforcement of Roads & Railways”. Oct, 2011.
25. محمد، اشتيوي؛ هيفاء، ابوحليقة؛ محمود، البحباح؛ هشام، الزبيدي. ورقة بحثية بعنوان. "المعامل الإنشائي لطبقة إعادة التدوير الكامل". كلية الهندسة، جامعة طرابلس. 2015.
26. “Life-Cycle Cost Analysis Primer”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration Office of Asset Management. August, 2002.
27. Prasada, Rao Rangaraju.; Serji, Amirkhanian.; Zeynep, Guven. 36. “Life Cycle Cost Analysis for Pavement Type Selection”. Department of Civil Engineering, Clemson University, USA. Final Report. FHWA-SC-08-01. April 25, 2008.