

تحديد التوزيع الجغرافي لدرجة الأسفلت داخل ليبيا وفق نظام تصنيف الأسفلت عالي الأداء

عبد الهادي محمد اخليل¹ زكريا أبوبكر احبارة¹ أحمد يوسف احبارة¹
b1701165@eng.misuratau.edu.ly m.1701003@eng.misuratau.edu.ly m.1701023@eng.misuratau.edu.ly

إسلام ميلاد التريكي¹ عمر القذافي المنصوري¹ عبد العزيز عبد الله الأسطى¹
isslam.eltariki@eng.misuratau.edu.ly elmansouri@eng.misuratau.edu.ly aalosta@eng.misuratau.edu.ly

1 جامعة مصراتة، هندسة مدنية، مصراتة، ليبيا

الملخص

تعتبر المادة الرابطة الأسفلتية أحد المكونات الأساسية للخلطات الأسفلتية الساخنة والمستخدمة في الرصف الأسفلتي المرن. يعتمد الاختيار الجيد لدرجة المادة الرابطة الأسفلتية على عوامل عديدة منها أحجام المرور ودرجات حرارة الهواء وغيرها من الظروف التي تختلف باختلاف منطقة الدراسة. مع مرور السنين وظهور المشاكل والعيوب تم تحديث أنظمة التصنيف وتطوير أنظمة جديدة لاحتواء عيوب الرصف لغرض الحصول على مادة عالية الديمومة. تهدف هذه الدراسة إلى تطبيق نظام تصميم الخلطات عالي الأداء في ليبيا والذي ينقسم إلى اختيار درجة الرابط الأسفلتي وتصميم الخلطة وتقييم أداءها. الأمر الذي يسهل من عملية اختيار أو تحديد درجة الرابط الأسفلتي الملائمة لكل منطقة جغرافية. مواصفات المادة الرابطة الأسفلتية في ليبيا تستند على نظام تصنيف الاختراق الذي يفتقر إلى التقييم الشامل لسلوك المادة الرابطة دون الأخذ في الاعتبار تقييم أداء الرصف وتقدم المادة الرابطة الأسفلتية على المدى البعيد. تم في هذه الدراسة استخدام بيانات 20 عامًا لتسجيلات درجات الحرارة الجوية التي جمعت من 23 محطة أرصاد جوية، وقياس درجة حرارة الأسفلت باستخدام أربعة نماذج لتوقع درجة الرابط الأسفلتي. أظهرت النتائج عند مستوى موثوقية 98٪ أن نماذج SHRP و LTPP صُنفت ليبيا إلى ثلاث مناطق جغرافية. تم تحديد درجة رابط PG 76-10 لمنطقة غدامس والكفرة و PG 64-10 لمناطق الساحل الشرقي، ودرجة رابط PG 70-10 لبقية المناطق. تم تعديل نتائج توقعات نماذج SHRP و LTPP باعتماد ظروف أخرى، بينت النتائج زيادة درجة التصنيف في حدود 4 درجات في أغلب المناطق عند السرعات البطيئة والأحجام المرورية العالية. تم كذلك ملاحظة زيادة درجة التصنيف العالية بمتوسط درجة واحدة وفقاً لنموذج ICM، وبمتوسط درجتين حسب نموذج Damage Based.

استلمت الورقة بتاريخ 2025/06/22 وقبلت بتاريخ 2025/07/03 ونشرت بتاريخ 2025/07/05

الكلمات المفتاحية:
درجة الأسفلت، الأسفلت عالي الأداء، Superpave

1. المقدمة

توفر طرق تصميم خلطات الرصف وسيلة شاملة ومتكاملة تحقق مستوى من الأداء يتوافق مع الطلب المتزايد على الحركة المرورية والتباين في درجات الحرارة وتنوع طبقات الرصف والاستدامة. يعتبر نظام تصميم الرصف عالي الأداء Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) من أهم طرق تصميم وتقييم الخلطات الأسفلتية الساخنة، والذي تم تطويره من قبل برنامج أبحاث الطرق الاستراتيجي بالولايات المتحدة المعروف باسم SHRP (Strategic Highway Research Program). يعتمد النظام في فلسفته بشكل مباشر على الحد من التشوهات الدائمة وتشققات التعب والتشققات الناتجة عن درجات الحرارة المنخفضة، وذلك من أجل الوصول إلى خلطة مميزة يتم خلالها ضمان جودة مواد الرصف ودقة التصميم. يتكون النظام من ثلاث محاور رئيسية تشمل: تصنيف الرابط الأسفلتي PG وتصميم الخلطات واختبارات تقييم الأداء. تسهم هذه الجوانب في تحسين الخلطة المنتجة وزيادة ديمومتها وحمايتها من تأثيرات الحرارة والرطوبة طول فترة خدمتها [1].

يعالج نظام تصنيف المادة الرابطة القائم على الأداء PG أوجه القصور الموجودة في تصنيفات الاختراق والزوجة. يرجع السبب في ذلك إلى أن هذه الاختبارات تجريبية ويتم إجراؤها في ظروف ثابتة دون ارتباطها بالأداء كما هو الحال في نظام PG. كذلك فإن مثل هذه التصنيفات لا يتم فيها دراسة سلوك الرابط الأسفلتي على المدى البعيد عند تقادمه وتعرض سطحه لظروف مختلفة. يعتبر نظام PG من أفضل أنظمة تصنيف الأسفلت، ويستخدم على نطاق واسع باعتبار أخذه في الحسبان

خصائص الرابط الأسفلتي بدقة بداية من عملية الخلط والتنفيذ ووصولاً إلى ثبات الأداء خلال العمر التصميمي. يتم اختيار نوع الأسفلت المناسب وفقاً لأعلى وأقل درجة حرارة يمكن أن يتعرض لها ويتم تصنيفه على هذا الأساس. ويعبر عنه بالصيغة PG XX-YY حيث يمثل PG مقياس الأداء (Performance Grade)، بينما يمثل الرمز XX درجة الحرارة التصميمية الكبرى (High binder grade)، والتي يكون عندها الأسفلت قادراً على توفير صلابة كافية لمقاومة التحددات، ويمثل YY الدرجة الدنيا (Low binder grade)، والتي يمتلك عندها الرابط مقاومة كافية لتشققات الحرارة المنخفضة [2]. يتدرج تصنيف المادة الرابطة بنظام PG كل 6 درجات مئوية (Six-degree increments) لكل من الدرجة الأعلى والأدنى للتصنيف كما مبين بالشكل 1.

يتم حساب الفارق الحراري المفيد (Useful Temperature Interval) UTI، والذي يمثل الفارق بين أعلى وأقل درجة حرارة في التصنيف. يمثل UTI نطاق درجات الحرارة الذي تلبى فيه المادة الرابطة مواصفات التصنيف عالي الأداء، ويفضل ألا يزيد الفارق عن 90°C. في مثل هذه الحالات ينصح باستخدام إضافات للمادة الرابطة كما بالشكل 1.

		High Temperature, °C				
		52	58	64	70	76
Low Temperature, °C	-16	52-16	58-16	64-16	70-16	76-16
	-22	52-22	58-22	64-22	70-22	76-22
	-28	52-28	58-28	64-28	70-28	76-28
	-34	52-34	58-34	64-34	70-34	76-34
	-40	52-40	58-40	64-40	70-40	76-40

= Crude Oil
 = High Quality Crude Oil
 = Modifier Required

شكل 1 التنبؤ بدرجات PG لخلطات مختلفة من النفط الخام [2]

تتميز ليبيا بتنوع مناخي فريد، حيث تتباين درجات الحرارة بين المرتفعة جداً في أقصى الجنوب إلى المنخفضة في المرتفعات الشرقية والغربية. هذا الاختلاف الواسع يؤثر بشكل مباشر على أداء الرابط الأسفلتي، ويجعل من المستحيل تنفيذ عمليات الرصف باستخدام نوع واحد أو نوعين من الأسفلت كما هو معمول به حالياً في مشاريع الرصف. هذا الأمر استوجب القيام بدراسة شاملة تغطي معظم أجزاء ليبيا لتحديد النوع المناسب من الرابط الأسفلتي حسب المناخ السائد، لضمان استدامة الطرق المنفذة وتخفيض نفقات الصيانة مستقبلاً.

2. دراسات سابقة

يعتبر نظام تصنيف الأسفلت عالي الأداء من الأنظمة المستخدمة حديثاً في تحديد نوعية الأسفلت المناسب بناءً على المناخ السائد في المنطقة. وقد تناولت العديد من الدراسات والأبحاث تطبيق هذا النظام في مناطق مختلفة، حيث تم التركيز على العلاقة بين درجات الحرارة وخصائص المادة الأسفلتية من حيث أدائها. وبالنظر إلى وجود تباين بين الظروف المناخية في ليبيا، تمت مراجعة مجموعة من الأبحاث السابقة لمعرفة كيفية تطبيق هذا النظام في بيئات مختلفة. فيما يلي ملخص لهذه الدراسات:

أجرى الباحث أمبارك وآخرون دراسة في منطقة سبها بجنوب ليبيا لقياس درجات حرارة الرصف على أعماق مختلفة، بهدف فهم تأثير الإشعاع الشمسي والانحدار الحراري على طبقات الطريق. توصلت الدراسة إلى أن النماذج المحلية المطورة لشمال غرب ليبيا أكثر دقة من نماذج SHRP و LTPP، وأوصت بضرورة تطوير نموذج خاص بمناخ الجنوب بسبب التباين الكبير في درجات الحرارة بين الليل والنهار [3]. كما استخدم الباحث عابدين وآخرون نماذج SHRP و LTPP إضافة إلى النموذج العماني لتحليل درجات حرارة الرصف في ليبيا بالاستناد إلى بيانات محطات الأرصاد الجوية. وأظهرت نتائجهم أن أغلب مناطق ليبيا تتطلب مادة رابطة إسفلتية من نوع PG76-10، مع استثناءات في شمال شرق وشمال غرب ليبيا التي تحتاج إلى PG70-10 [4].

وفي نفس السياق، درس فريق الباحث Mirzai في باكستان درجات حرارة الرصف باستخدام نماذج SHRP و LTPP، حيث لاحظوا وجود فروقات كبيرة بين النموذجين خاصة عند التنبؤ بدرجات الحرارة المنخفضة، واختاروا نموذج SHRP كأساس لتطوير تصنيف PG [5]. بينما قام الباحث Adawn وآخرون بعمل مراجعة شاملة لعدد 38 نموذجاً للتنبؤ بدرجة حرارة الرصف وتم تصنيفها إلى ثلاث فئات رئيسية حسب العنصر العددي والتحليلي والنظري والإحصائي والتقنيات

الاحتمالية. أكد الباحثون في مراجعتهم على التأثير الكبير لدرجة الحرارة في خصائص المواد الميكانيكية والفيزيائية لطبقة الأسفلت، مع التنويه إلى نقاط القوة والضعف في النماذج المختلفة، وبعضها قد يكون غير ضروري. [6].

قام الباحث Alani وآخرون بالتركيز على الأقسام المهمة الخاصة بنظام تدرج الأداء والتي يمكن تطبيقها دون الحاجة إلى معدات عالية التكلفة وذلك باستخدام الطرق التقليدية لفحص الأسفلت. توصلوا إلى أنه يمكن استخدام نتائج هذه الفحوصات بطريقة غير مباشرة لتخمين الخصائص المتعلقة بالأداء بناءً على المخططات البيانية، وكذلك كيف يمكن للبيانات الخاصة بالطقس والبيانات المرورية والخصائص الريولوجية وأشكال وأنماط الفشل التي اشتقت من المخططات البيانية أن تشترك فيما بينها لتطويع مواصفات الأسفلت في العراق. حيث تم تجميع بيانات درجات حرارة الهواء لمدة 18 سنة لعدة مناطق في العراق وبناءً على تصنيف Superpave تم استنباط تصنيف الأداء الخاص لكل منطقة [7].

قام الباحث Ronald وآخرون باستخدام نموذج التنبؤ SHRP للتنبؤ بدرجات حرارة الرصف الأسفلتي في دول مختارة من منطقة البحيرات الكبرى وهي أوغندا وكينيا وتنزانيا. تم تقسيم هذه المناطق باستخدام بيانات درجة الحرارة التي تم الحصول عليها من محطات الأرصاد الجوية، وتوصل الباحثون إلى أن تقسيم هذه المناطق بناءً على درجات الحرارة موزع على ثلاثة مناطق جغرافية، وهي PG64-10 و PG58-10 و PG52-10. حيث تم العمل على خريطة PG كمرجع لتصميم الرصف بنظام التصنيف عالي الأداء Superpave، كما أكد الباحثون أنه يجب أن تؤخذ ظروف حركة المرور في الاعتبار لتصميم الرصف الأسفلتي وذلك لتحسين درجة PG [8].

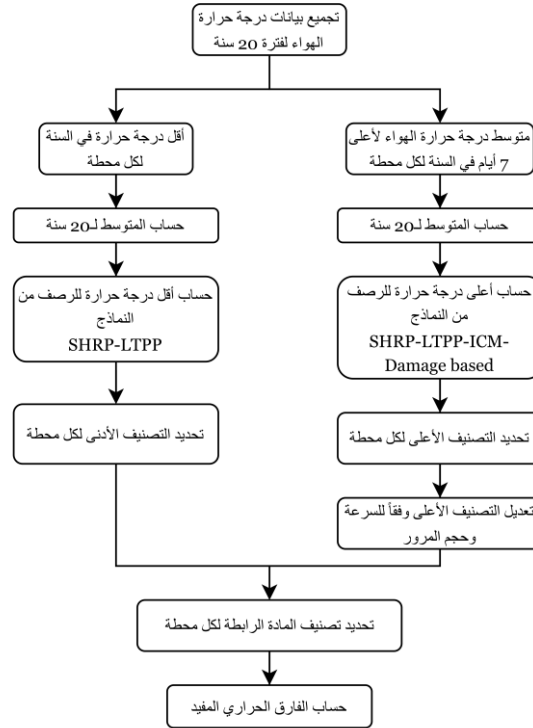
قام الباحث Khedr وآخرون باستخدام نموذج التنبؤ LTPP ونموذج Rutting The Performance Model (Damage Model) للتنبؤ بدرجة حرارة الرصف العالية. تم استخدام نموذج SHRP فقط للتنبؤ بدرجة حرارة الرصف المنخفضة، وذلك بعد تجميع درجات حرارة الهواء لعدد 21 محطة أرصاد جوية في مصر. حيث توصل الباحثون إلى أن نموذج (the performance model) أكثر تحفظاً، لأنه يعطي PG أعلى من تلك التي يقدمها نموذج LTPP [9].

في الأردن، قام الباحث Ghuzlan وآخرون بتحليل درجات أداء المواد الرابطة الإسفلتية عبر عدة نماذج ودرجات حرارة مع مستويات موثوقة مختلفة. حيث قسموا الأردن إلى منطقتين مناخيتين رئيسيتين، حددوا لكل منهما PG المناسب استناداً إلى اختبارات فنية متعددة مثل DSR و BBR ونظام Superpave. استناداً إلى نتائج هذه الدراسة وجد أن PG64-10 و PG70-10 هي درجات الأداء المطلوبة [10].

في دراسة لصحراء ليبيا عام 2014، قام Awadat وآخرون بتقسيم المناطق المناخية باستخدام نماذج SHRP و LTPP وبيانات 8 محطات أرصاد جوية. وجدوا فروقات كبيرة بين النماذج في التنبؤ بدرجات الحرارة، فاختاروا نموذج SHRP لتطوير تصنيف PG الذي يغطي PG76-10 أكثر من 88% من مساحة البلاد [11].

3. منهجية البحث

تهدف الدراسة إلى تطبيق نظام تصنيف الأسفلت عالي الأداء داخل ليبيا، حيث تم تقسيم خريطة ليبيا وفقاً لدرجة المادة الرابطة الإسفلتية الملائمة لكل منطقة جغرافية. تعتمد الدراسة على تحليل بيانات تسجيلات درجات حرارة الهواء لعدة محطات داخل ليبيا لمدة 20 سنة. الشكل 2 يبين المنهجية المتبعة، حيث تم في المرحلة الأولى تجميع بيانات درجات حرارة الهواء المسجلة لمدة 20 سنة من موقع الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration) لعدد 23 محطة رصد جوي موزعة على أنحاء ليبيا. تلي هذه المرحلة حساب درجات حرارة الرصف العالية والمنخفضة لكل محطة باستخدام نماذج SHRP و LTPP عند مستويات ثقة 50% و 98% ومن ثم تحديد درجة تصنيف أداء الرصف (Performance Grade PG). في المرحلة الثانية تم تصنيف كل محطة وفقاً لنظام تصنيف الأسفلت عالي الأداء بالأخذ في الاعتبار الفترات الطويلة لدرجات الحرارة المرتفعة وذلك باستخدام نماذج Damage based و ICM. أيضاً تم تعديل تصنيف المادة الرابطة الإسفلتية بالأخذ في الاعتبار السرعات والأحمال المرورية للشاحنات وذلك لنموذجي SHRP و LTPP، ثم تحديد الفارق الحراري المفيد.



شكل (2) منهجية البحث

أ- نماذج التنبؤ بدرجة حرارة الرصف الأسفلتي

تعتبر نماذج التنبؤ أداة مهمة تساعد في تحديد درجة حرارة الرصف الأسفلتي، وذلك لاستخدامها في عدة تطبيقات لمراقبة وإدارة الرصف. تتضمن نماذج التنبؤ بدرجة حرارة الرصف العديد من المتغيرات والمعادلات الرياضية المعقدة، وتعتمد على البرمجة لتحليل البيانات وإعطاء التوقعات. تتميز هذه النماذج بدقتها وفعاليتها في توقع درجة الحرارة، وتستخدم على نطاق واسع في مجالات الطرق والجسور وغيرها. من أهم النماذج المستخدمة في التنبؤ بدرجة حرارة الرصف الأسفلتي ما يلي [12]:

- نموذج أداء الرصف على المدى الطويل (Long Term Pavement Performance (LTPP).
- نموذج أبحاث الطرق السريعة الاستراتيجية (Strategic Highway Research Program (SHRP).
- نموذج الطقس المتكامل لإدارة الطرق الفدرالية (Integrated Climatic Model (ICM).
- النموذج القائم على الضرر الناتج عن التخددات (Damage Based).

لغرض إيجاد علاقة تربط درجة حرارة الهواء بدرجة حرارة الرصف الأسفلتي، تم استخدام معادلات الانحدار جنباً إلى جنب مع نظريات التدفق الحراري الرياضية للارتباط. المعادلات 1 و 2 تبين النماذج التي تم تطويرها بواسطة SHRP و LTPP لدرجات الحرارة العالية والمنخفضة. تم تطوير هذه النماذج للتنبؤ بدرجة حرارة الرصف العالية كدالة في العمق، حيث يحدد تصنيف الأسفلت عالي الأداء درجة حرارة تصميم الرصف على عمق 20 ملم من سطح الرصف، والتي تؤخذ على أنها متوسط أعلى سبع درجات حرارة هواء لسبعة أيام خلال السنة [5].

$$T_{pav, h} = (T_{air} - 0.00618 Lat^2 + 0.2289 Lat + 42.4)(0.9545) - 17.78 + z \cdot \sigma_{air} \quad (1)$$

$$T_{pav, h} = 54.32 + 0.78T_{air} - 0.0025 Lat^2 - 15.14 \log_{10}(d + 25) + z(9 + 0.61\sigma_{air}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

درجة حرارة الرصف المنخفضة تؤخذ على أنها أقل درجة حرارة هواء مسجلة في السنة ويمكن أن يمثل هذا رياضياً بالعلاقات التالية، حيث أن المعادلة 3 تمثل نموذج SHRP والمعادلة 4 تمثل نموذج LTPP [13].

$$T_{pav, l} = 0.051d - 0.000063d^2 - z \cdot \sigma_{air} \quad (3)$$

$$T_{pav, l} = -1.56 + 0.72T_{air} - 0.004Lat^2 + 6.26 \log_{10}(d + 25) - z(4.4 + 0.52 \cdot \sigma_{air}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

محسني وآخرون اقترحوا أن متوسط درجة حرارة الهواء المرتفعة لمدة سبعة أيام يمثل ظرفاً لم تأخذ في الحسبان الفترات الطويلة من الحرارة التي يتعرض لها الرصف. هذه الفترات يمكن أن تتغير باختلاف الموقع رغم وجود درجة حرارة هواء مماثلة لمدة سبعة أيام. يرجع السبب في ذلك إلى أن التعرض لفترات طويلة من الحرارة يؤدي إلى زيادة التخددات في الرصف الأسفلتي. وقد طور محسني وآخرون طريقة اختيار درجة الحرارة العالية للتصنيف والتي تأخذ في الاعتبار الفترات الطويلة من سخونة الأسفلت. وكانت توقعات هذا النموذج لمتوسط درجات حرارة التصميم العالية للطرق لمدة سبعة أيام تصل إلى 3 درجات مئوية أعلى من توقعات نموذج LTPP، ولأغراض هذه الدراسة يشار إلى المعادلة 5 باسم نموذج ICM [12].

$$T_{pav} = 32.7 + 0.837T_{air} - 0.0029 Lat^2 + z(4.41 + \sigma_{air}^2)^{0.5} \quad (5)$$

تم تعريف درجات الحرارة المتركمة (degree-days) على أنها مجموع درجات حرارة الهواء اليومية العالية التي تزيد عن 10 درجات مئوية خلال العام، وذلك لحساب الدرجة العالية للمادة الرابطة كما في المعادلة 6. خلال فترة التحليل كان معامل الارتباط بين متغير متوسط درجة حرارة الهواء العالية لمدة سبعة أيام في نماذج SHRP و LTPP ودرجة رابط الأسفلت PG أقل تأثيراً (معامل الارتباط يبلغ 0.62) بالمقارنة مع درجات الحرارة المتركمة (degree-days) (معامل الارتباط يبلغ 0.72). وأوضح محسني وآخرون أن متغير متوسط درجة حرارة الهواء العالية لمدة سبعة أيام يمثل ظروف درجات حرارة قصوى لم تتمكن من التعبير عن التأثير الكامل لدرجة الحرارة على التخددات، في حين أن درجات الحرارة المتركمة (degree-days) هي متغير تراكمي يدمج بين كل من شدة الحرارة ومدتها، مما يوفر معامل ارتباط أفضل مع الضرر الناتج عن التخدد [12].

$$PG_d = 48.2 + 14DD_{air} - 0.96DD_{air}^2 - 2RD \quad (6)$$

في حين أن الضرر الناتج عن التخدد يكون أكبر في الأعوام الأكثر حرارة من المعتاد، فإنه يجب تعديل درجة رابط الأسفلت PG المعتمدة على التلف الناتج من التخددات لتوافق التغيرات السنوية في الظروف المناخية حسب الصياغة المبينة بالمعادلة 7. تم دمج التغير السنوي في درجة رابط الأسفلت PG في المعادلة 7 مع درجة المادة الرابطة PG المعتمدة على التخدد في المعادلة 6 ومستوى الوثوقية للحصول على المعادلة 8 [12].

$$CV_{PG} = 0.00003(Lat - 20)^2 RD^2 \quad (7)$$

$$PG_{rel} = PG_d + zPG_d \left(\frac{CV_{PG}}{100} \right) \quad (8)$$

ب- تعديل تصنيف الأداء للمادة الرابطة الأسفلتية

درجة الرابط الأسفلتي في نظام تصنيف الأسفلت عالي الأداء معياراً لحركة المرور على الطرق السريعة بسرعة تبلغ حوالي 100 كم/ساعة وحمولة قصوى تصل إلى 10 ملايين محور مفرد قياسي (10 MESALS). بعض الأماكن مثل التقاطعات والمنحدرات ونقاط الوقوف ومواقف الحافلات يكون لها معدلات تحميل أبطأ أو تحميل ثابت، مما يتطلب أن يكون الرابط الأسفلتي أكثر صلابة للحد من التخددات. عليه، تتطلب ظروف حركة المرور الكثيفة زيادة في درجة الرابط الأسفلتي العالية، وهي عملية تسمى (grade bumping)، بينما لا تحتاج درجة الرابط الأدنى إلى تعديلات من هذا النوع [12]. اقترح باحثو SHRP قواعد تعديل درجات الرابط الأسفلتي التالية بناءً على الحكم الهندسي:

- يجب زيادة الدرجة العالية للرابط الأسفلتي PG بدرجة قياسية واحدة (6 درجات مئوية) لحمولات المرور العابرة البطيئة، وبدرجتين للحمولات الثابتة.
- يفضل اختيار درجة أعلى إذا تجاوزت حمولة التصميم للمرور 10MESALS.
- إذا تجاوزت حمولة التصميم للمرور 30MESALS، يجب استخدام درجة أداء أعلى وقد أوصى مشروع NCHRP 9-33 بتعديلات درجة رابط PG الموضحة في الجدول 1.

جدول 1 تعديلات الدرجة العالية للرابط الأسفلتي PG [12]

متوسط سرعة المركبة (كم/ساعة)	أحجام المرور التصميمية		
	سريعة	بطيئة جداً	بطيئة
	70 ≤	25 >	70 ≥ 25 ≤
(MESALS)			
< 0.3	0	0	0
0.3 to < 3	0	12	6
3 to < 10	6	18 ^a	13
10 to < 30	10	22 ^a	16 ^a
≥ 30	15 ^a	0	21 ^a

[illegible]

1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 278: 1039-1044.

[illegible][illegible]

1. *Journal of the American Medical Association*, 2000; 283: 2686-2692.

... ..

[illegible]

المحطات المختارة موزعة على كامل مساحة ليبيا بحيث تمثل الاختلافات المتوقعة في المناخ. تم أخذ تسجيلات أعلى وأدنى درجة حرارة للهواء لكل سنة وحساب قيمة المتوسط لـ 20 سنة. الجدول 2 يوضح ملخص لبيانات أعلى وأدنى درجات حرارة لمحطات الدراسة خلال فترة الدراسة (من 1-1-2003 إلى 31-12-2022). توفر هذه البيانات قاعدة أساسية موثوقة لاشتقاق المؤشرات المناخية المطلوبة لتحديد درجة تصنيف الأسفلت PG لكل منطقة من مناطق الدراسة، بناءً على المعايير المعتمدة في النظام عالي الأداء Superpave.

جدول 2 متوسطات أعلى وأدنى درجات حرارة لمدة 20 سنة

المحطة	متوسط أعلى درجة حرارة هواء (C°)			متوسط أدنى درجة حرارة هواء (C°)		
	الأعلى	المتوسط	الأدنى	الأعلى	المتوسط	الأدنى
مصراته	43.6	39.3	3.8	43.4	41.7	0.1
غدامس	46.5	43.3	4.3	44.2	42.5	1.6
سرت	42.8	38.8	4	43.2	40.2	2.3
سبها	45.3	43.6	0.8	45.3	43.7	1.1
اجدايا	43.1	41.1	1	45.2	43.8	1.4
شحات	38.2	35.2	1.8	46.1	43.5	2.1
نالوت	43	41.2	1.4	46.7	44.3	-1
طبرق	38.2	36.4	1.2	45.6	43.5	1.8
زواردة	43.8	39.4	2	41	39.8	0.8
بنغازي	42.7	38.4	1.8	45.3	43.6	2
جالدو	45.5	43.6	1.2	45.6	43.6	0.8
الكفرة	45.6	43.5	2.8			

يتبين أن هناك اختلاف في درجات حرارة الهواء العالية بسبب العوامل المناخية والجغرافية المحلية. حيث تشهد المدن الساحلية شمال ليبيا كمصراته وطرابلس وبنغازي مثلاً درجات حرارة تقترب من 40 درجة مئوية في فصل الصيف كمتوسط، بينما تشهد المدن الواقعة في وسط وجنوب ليبيا درجات حرارة أعلى مثل سبها وغدامس. تمتاز مدينة شحات

بمناخ أكثر اعتدالاً في المتوسط ويختلف نسبياً عن باقي المدن والمناطق. إحصائياً، يعطي الانحراف المعياري مؤشراً على مدى تقارب قيم درجات الحرارة العالية مما يعني أن المناخ يتسم بالثبات. أما فيما يتعلق بدرجات الحرارة المنخفضة فإن المناطق الصحراوية مثل واحة غدامس يمكن أن تنخفض درجات الحرارة فيها إلى ما دون الصفر خلال فصل الشتاء، بينما تشهد المناطق الساحلية انخفاضاً في حرارة الهواء إلى حوالي 5 درجات مئوية أو أقل كأدنى متوسط لحرارة المنخفضة.

5. النتائج

متوسطات أدنى وأعلى درجات حرارة للهواء المسجلة للمحطات يتم منها حساب درجة حرارة الرصف عند نسب موثوقية 50% و 98%. تم حساب درجات حرارة الرصف العالية والمنخفضة عند عمق الرصف المحدد (20 مم) باستخدام النماذج الأربعة (Damage based - ICM - LTPP - SHRP) والتي بناءً عليها نستطيع تصنيف المحطات. الدرجة الأعلى لتصنيف الأداء للأسفلت تحسب بواسطة المعادلات (1، 2، 5، 8). تبين الجداول 3 و 4 الدرجة الأعلى لتصنيف المادة الرابطة للنماذج الأربعة عند مستويات موثوقية 98%، 50% على التوالي.

جدول 3 الدرجة الأعلى لتصنيف المادة الرابطة عند مستوى موثوقية 98%

نسبة الموثوقية 98%					نسبة الموثوقية 98%				
المحطة	SHRP	LTPP	ICM	Damage based	المحطة	SHRP	LTPP	ICM	Damage based
مصراته	70	70	76	76	الشرقية	70	70	76	82
غدامس	76	76	82	82	الجغبوب	70	70	76	82
سرت	70	70	76	82	الخمس	70	70	76	76
سبها	70	70	76	82	غات	70	70	76	82
اجدابيا	70	70	70	82	بن وليد	70	70	76	82
شحات	64	64	70	70	تازربو	70	70	76	82
نالوت	70	70	70	76	اوباري	70	70	76	82
طبرق	64	64	70	76	بونجيم	70	70	76	76
زوارة	70	70	70	76	يفرن	64	70	76	76
بنغازي	64	64	70	76	طرابلس	70	70	76	76
جالو	70	70	76	82	هون	70	70	76	82
الكفرة	76	70	76	82					

يلاحظ في الجدول 3 أن الدرجة الأعلى لتصنيف PG لكافة المدن الليبية متقاربة، وتزيد أو تقل عن بعضها بدرجة قياسية واحدة لكل نموذج. أما فيما يتعلق بنماذج التصنيف التي تأخذ في اعتباراتها الأحجام المرورية العالية والسرعات المنخفضة تكون تصنيفاتها أعلى من النماذج المتعلقة بدرجات الحرارة فقط، وذلك حتى تحاكي ظروف التشغيل القصوى وتقاوم التخددات. يفضل استخدام التصنيف عند مستوى ثقة 98% للطرق ذات الأهمية الكبيرة كطرق النقل الثقيل والطرق التي تربط بين المدن والدول.

من خلال الجدول 4 يلاحظ أن درجات تصنيف النماذج عند مستوى موثوقية 50% تقل عن تلك عند مستوى ثقة 98% بدرجة أو درجتين قياسيتين. يكون من الأمثل استخدام التصنيف عند مستوى موثوقية 50% في الطرق الفرعية والمحلية، وذلك حتى يتم أخذ الجانب الاقتصادي بعين الاعتبار.

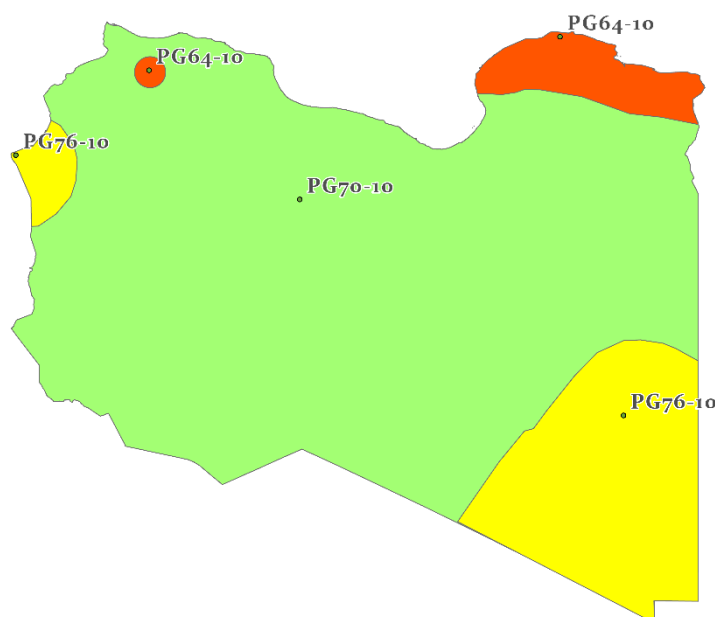
جدول 4 الدرجة الأعلى لتصنيف المادة الرابطة عند مستوى موثوقية 50%

نسبة الموثوقية 50%					نسبة الموثوقية 50%				
المحطة	SHRP	LTPP	ICM	Damage based	المحطة	SHRP	LTPP	ICM	Damage based
مصراته	64	58	64	76	الشرقية	64	64	70	82
غدامس	70	64	70	82	الجغبوب	70	64	70	82
سرت	64	58	64	76	الخمس	64	58	64	76
سبها	70	64	70	82	غات	70	64	70	82
اجدابيا	64	64	70	82	بن وليد	70	64	70	82

82	70	64	70	تازربو	70	64	58	58	شحات
82	70	64	70	اوباري	76	70	64	64	نالوت
76	70	64	70	بونجيم	76	64	58	64	طبرق
76	64	58	64	يفرن	76	64	58	64	زوارة
76	70	64	70	طرابلس	76	64	58	64	بنغازي
82	70	64	70	هون	82	70	64	70	جالو
					82	70	64	70	الكفرة

الدرجة الأدنى لتصنيف المادة الرابطة تحسب بواسطة المعادلات 3 و 4 عند مستويات موثوقية 98%، 50%. يلاحظ من النتائج أن الدرجة الأدنى للتصنيف باستخدام نماذج SHRP و LTPP تعطي نفس درجة التصنيف في جميع المحطات دون استثناء. يرجع السبب في ذلك لمناخ ليبيا الذي يتميز بالاعتدال في فصل الشتاء حيث لا تتجاوز فيه درجة حرارة الهواء المنخفضة في أقصاها -5 درجات مئوية. وعليه فإنه من المنطقي أن يكون لجميع المناطق ذات التصنيف بسبب أن أقل درجة تصنيف منخفضة حسب نظام التصنيف عالي الأداء هي -10.

الشكل 4 يبين التقسيم الجغرافي لمنطقة الدراسة ليبيا وفق نظام تصنيف الأسفلت عالي الأداء باستخدام نموذج SHRP عند مستوى موثوقية 98%.



شكل 4 التقسيم الجغرافي حسب نموذج SHRP لموثوقية 98%

تم في المرحلة الثانية تعديل الدرجة الأعلى للتصنيف المحسوبة وفقاً لنماذج SHRP و LTPP وذلك لتأخذ في الاعتبار السرعات والأحجام المرورية المختلفة. إذا قلت السرعة لنفس الحجم المروري زاد الاجهاد المطبق من الأحمال المرورية لجسم الطريق بسبب زيادة فترة التحميل وهذا ما يفسر التشوهات والتخددات الواقعة في سطح الطريق عند نقاط التباطؤ والتوقف. لذلك يكون من الضروري زيادة درجة التصنيف التي تعمل على مقاومة هذه التشوهات، وهذا ما يفسر أن درجات التصنيف المعدلة تكون أعلى عند سرعة أقل والعكس. أما فيما يخص الأحجام المرورية فمن الطبيعي أن تكون المادة الرابطة الإسفلتية ذات درجة تصنيف أعلى عند الأحجام المرورية الأعلى. بزيادة فترة التحميل يزيد الاجهاد المطبق على جسم الطريق، الأمر الذي يستوجب زيادة درجة PG الأعلى للتصنيف. الجدول 5 يوضح تعديل تصنيف SHRP عند مستوى ثقة 98% بالأخذ في الاعتبار السرعة البطيئة جداً والأحجام المرورية المختلفة.

جدول 5 تعديل تصنيف PG لنموذج SHRP عند موثوقية 98% وسرعة منخفضة جداً

المحطة	الدرجة الأساسية	سرعة منخفضة جداً > 25 كم/ساعة			المحطة	الدرجة الأساسية	سرعة منخفضة جداً > 25 كم/ساعة		
		10-30 MESAL	3-10 MESAL	> 3 MESAL			10-30 MESAL	3-10 MESAL	> 3 MESAL
مصراته	70-10	94-10	88-10	82-10	الشرقية	70-10	94-10	88-10	82-10
غدامس	76-10	100-10	94-10	88-10	الجغبوب	70-10	94-10	88-10	82-10
سرت	70-10	94-10	88-10	82-10	الخمس	70-10	94-10	88-10	82-10
سبها	70-10	94-10	88-10	82-10	غات	70-10	94-10	88-10	82-10
اجدابيا	70-10	88-10	88-10	82-10	بن وليد	70-10	88-10	88-10	82-10
شحات	64-10	88-10	82-10	76-10	تازربو	70-10	88-10	82-10	76-10
نالوت	70-10	88-10	88-10	82-10	اوباري	70-10	88-10	88-10	82-10
طبرق	64-10	88-10	82-10	76-10	بونجيم	70-10	88-10	82-10	76-10
زوارة	70-10	88-10	88-10	82-10	يفرن	64-10	88-10	82-10	76-10
بنغازي	64-10	88-10	82-10	76-10	طرابلس	70-10	88-10	82-10	76-10
جالو	70-10	94-10	88-10	82-10	هون	70-10	94-10	88-10	82-10
الكفرة	76-10	94-10	94-10	88-10					

بعد الحصول على نتائج توقعات تصنيفات النماذج لمستويات ثقة 50% و 98% والأخذ في الاعتبار ظروف التحميل والسرعات، أصبح بالإمكان تحديد الفارق الحراري المفيد (UTI)، والذي من خلاله يمكن تحديد الحاجة لاستخدام إضافات للمادة الرابطة الإسفلتية كما مبين بالجدول 6.

جدول 6 تحديد UTI لدرجة تصنيف PG

الموثوقية %	نموذج التصنيف	درجة التصنيف PG	UTI	هل تحتاج إضافات	الموثوقية %	نموذج التصنيف	درجة التصنيف PG	UTI	هل تحتاج إضافات
50	LTPP	58-10	68	لا	98	LTPP	64-10	80	لا
		64-10	74	لا			70-10	86	لا
		58-10	68	لا			76-10	92	لا
	SHRB	64-10	74	لا		SHRB	70-10	80	لا
		70-10	80	لا			76-10	86	لا
		64-10	74	لا			70-10	80	لا
	ICM	70-10	80	لا		ICM	76-10	86	لا
		70-10	80	لا			76-10	86	لا
		76-10	86	لا			82-10	92	لا
	Damage Based	82-10	92	نعم		Damage Based	70-10	80	لا
		76-10	86	لا			76-10	86	لا
		82-10	92	نعم			82-10	92	نعم

6. الخلاصة

لغرض حساب درجة حرارة الرصف تم استخدام بيانات درجة حرارة الهواء لعدد 23 محطة طقس موزعة على مساحة ليبيا ولفترة 20 عام. درجات حرارة الرصف الأسفلتي تم حسابها باستخدام 4 نماذج لتوقع الدرجة الأعلى والأدنى لتصنيف الرابط الأسفلتي PG. أظهرت نتائج توقعات نموذجي SHRP و LTPP تطابقاً لكافة مناطق ليبيا في الدرجة المنخفضة للرابط الأسفلتي PG. بينت نتائج توقعات نموذج SHRP أيضاً تشابهاً في الدرجة العالية لتصنيف الرابط الأسفلتي PG لأغلب مناطق ليبيا باستثناء مناطق ساحل وجنوب شرق ليبيا ومنطقتي يفرن وغدامس. تشير نتائج توقعات نموذج LTPP تشابهاً كبيراً جداً في الدرجة العالية لتصنيف الرابط الأسفلتي PG باستثناء مناطق شمال شرق ليبيا ومنطقة غدامس. النموذج الأعلى موثوقية يعطي قيمة أكبر لدرجات التصنيف العالية أي هامش أمان أعلى. من ناحية اقتصادية فإن هذا الأمر يعتبر مكلفاً عند الأخذ في الاعتبار الحاجة إلى استخدام إضافات وتحسينات لزيادة الدرجة العالية

للتصنيف. الجدير بالذكر أن نماذج ICM و Damage Based القائمة على الضرر الناتج عن التخددات تعطي نتائج أعلى لتصنيف الرابط الأسفلتي. توصي الدراسة بمتابعة العمل على تطوير نموذج محلي خاص بليبيا لتوقع درجة الرصف للأسفلت للوصول إلى نموذج دقيق يساهم في تطوير وتحسين جودة مشاريع الطرق في ليبيا. كما توصي بمصلحة الطرق والجسور في ليبيا بتبني نظام التصنيف عالي الأداء وتوفير مواد رابطة إسفلتية بدرجات تصنيف تتماشى مع ظروف كل منطقة، وتعديل درجة التصنيف العالية للرابط الأسفلتي بالأخذ في الاعتبار أحجام المرور والسرعات وكذلك الضرر الناتج عن التخددات عند نقاط التباطؤ والوقوف.

7. المراجع

- 1) Kennedy, Thomas William, et al. "Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program." (1994).
- 2) Zeiada, Waleed, et al. "Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization." *Construction and Building Materials* 319 (2022): 126063.
- 3) محمد عمران امبارك والمهندس أحمد أبوشريعة. دراسة النظام الحراري للرصف الأسفلتي جنوب ليبيا. سنة 2008.
- 4) أحمد خيرى عابدين، and محمد الشتيوي بن عمر. تأثير نموذج التنبؤ بدرجات الحرارة والموقع الجغرافي على اختيار المادة الرابطة الاسفلتية. Diss. جامعة طرابلس، 2015.
- 5) Mirza, M. Waseem, Zahid Abbas, and Mujasim Ali Rizvi. "Temperature zoning of Pakistan for asphalt mix design." *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences* (2011).
- 6) Adwan, Ibrahim, et al. "Asphalt pavement temperature prediction models: A review." *Applied Sciences* 11.9 (2021): 3794.
- 7) Abbas, Alaa S., Amjad H. Albayati, and H. M. Alani. "The transition to a PG Grading system for asphalt cement in Iraq." *Journal of Engineering* 16.4 (2010): 5911-5931.
- 8) Ronald, Mukunde, Ghassan Chehab, and Mohammad Nour Fakhreddine. "Determination of temperature zoning for the great lakes region of africa based on superpave system." (2020).
- 9) Khedr, S. A. F. W. A. N., M. A. R. A. M. Saady, and M. O. N. A. Khafagy. "Development of asphalt binder Performance Grades." *Proceedings of the 2 nd Australasia and South East Asia Structural Engineering and Construction Conference, Bangkok, Thailand. 2014.*
- 10) Ghuzlan, Khalid A., and Ghazi G. Al-Khateeb. "Selection and verification of performance grading for asphalt binders produced in Jordan." *International Journal of Pavement Engineering* 14.2 (2013): 116-124.
- 11) Salem, Hassan Awadat, Djordje Uzelac, and Bojan Matic. "Temperature zoning of Libya desert for asphalt mix design." *Applied Mechanics and Materials* 638 (2014): 1414-1426.
- 12) Tutu, Kenneth Adomako, Simon Ntramah, and Yaw Adubofour Tuffour. "Superpave performance graded asphalt binder selection for asphalt mixture design in Ghana." *Scientific African* 17 (2022): e01348.
- 13) NOAA - National Centers for Environmental Information." National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration.