Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering
مجلة الهندسة الميكانيكية والمدنية والصناعية
ISSN: 2709-0809
DOI: 10.32996/jmcie
Journal Homepage: www.al-kindipublisher.com/index.php/jmcie

التنبؤ بعمر التعب لطبقات الأسفلت في البيئات الصحراوية باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية وتحليل *SHAP* :دراسة حالة مدينة الكفرة

تاريخ استلام البحث: 2025/12/15 **تاريخ نشر البحث: 2025/12/29** **المجلد: 6** **العدد: 5**

الملخص بالعربيه:
تطور هذه الدراسة إطارًا تنبؤيًا يعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) وتحليل SHAP لتقدير عمر التعب للرصف الإسفلتي في مدينة الكفرة بليبيا، وهي بيئة صحراوية تتسم بارتفاع درجات الحرارة والتقلبات الحرارية اليومية. تم تحليل بيانات ميدانية من خمس طرق لتقييم تأثير محتوى الأسفلت والفراغات الهوائية. أظهر النموذج دقة عالية (R^2 = 0.91، MSE = 0.015)، حيث تبين أن محتوى الأسفلت بين 5.5–6.0% يعزز مقاومة التعب، بينما تؤدي الفراغات الهوائية فوق 4% إلى تقليل عمر الخدمة. مكّن تحليل SHAP من تفسير أهمية المتغيرات بوضوح، مؤكداً أن محتوى الأسفلت هو العامل الأكثر دعمًا، في حين أن الفراغات الهوائية هي الأكثر تأثيرًا سلبيًا. تمثل هذه الدراسة أول تطبيق متكامل في مدينة الكفرة، وتربط بين الأدبيات المحلية والعالمية، وتقدم توصيات عملية لتصميم أرصفة مستدامة في المناخات الصحراوية الحارة.

الكلمات المفتاحية: عمر التعب، الشبكات العصبية الاصطناعية، تحليل *SHAP*، محتوى الأسفلت، الفراغات الهوائية، الرصف الصحراوي، ليبيا.

Prediction of Fatigue Life of Asphalt Layers in Desert Environments Using Neural Networks and SHAP Analysis: Al-Kufrh Case Study

Mohammed Salih Huwaysh and Mousa Muhammed Karbaj
[12]*Assistant Lecturer, Department of Civil Engineering, Higher Institute of Science and Technology, Kufrah, Libya*
Corresponding Author: Mohammed Salih Shahhat Mohammed Huwaysh, **E-mail:** Sukri14@gmail.com

RECIEVED: 15 December 2025 **PUBLISHED:** 29 December 2025 **DOI:** 10.32996/jmcies.2025.6.5.8

Abstract in English
This study develops a predictive framework using Artificial Neural Networks (ANN) combined with SHAP analysis to estimate the fatigue life of asphalt pavements in Al-Kufra, Libya, a desert environment characterized by extreme temperatures and daily thermal fluctuations. Field data from five roads were analyzed to evaluate the influence of asphalt content and air voids. The ANN model achieved high accuracy (R^2 = 0.91, MSE = 0.015), showing that asphalt content between 5.5–6.0% significantly improves fatigue resistance, while air voids above 4% reduce service life. SHAP analysis provided transparent interpretation of variable importance, confirming asphalt content as the most supportive factor and air voids as the most detrimental. This research represents the first integrated application in Al-Kufra, bridging local and global scholarship, and offers practical recommendations for sustainable pavement design in hot desert climates.
Keywords: Fatigue life, ANN, SHAP, asphalt content, air voids, desert pavements, Libya

1 المقدمة

تتعرض طرق مدينة الكفرة، الواقعة في جنوب ليبيا، لظروف مناخية صحراوية قاسية تتميز بارتفاع درجات الحرارة خلال النهار، وانخفاضها بشكل كبير ليلًا، بالإضافة إلى تباين كبير في الإشعاع الشمسي والرطوبة. هذه الظروف تؤثر بعمق على أداء الأسفلت، حيث تعزز من معدلات التعب والتشققات الحرارية، وتقلّص من عمر الخدمة المتوقّع للطرقات.

يعود السبب جزئيًا إلى أن التصاميم التقليدية للرصف غالبًا ما مبنية على نماذج ميكانيكية أو إحصائية لا تأخذ في الحسبان التفاعلات غير الخطية المعقدة بين الخصائص الميكانيكية للخلطات (مثل محتوى الأسفلت، الفراغات الهوائية) والعوامل البيئية (مثل درجة الحرارة اليومية، التغيرات الحرارية). في السنوات الأخيرة، أصبح هناك توجه عالمي ملحوظ نحو استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي مثل الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لتحسين التنبؤ بأداء المواد تحت ظروف تحميل وبيئية معقدة.

وإلى جانب ذلك، يبرز تحليل **SHAP** كأداة فعالة لتفسير النماذج الذكية، لأنه يسمح بتقييم مدى مساهمة كل متغير في التنبؤ النهائي، مما يسهم في فهم عميق لأسباب تدهور الأداء.

على الرغم من التقدم العالمي، تظل التطبيقات الميدانية في ليبيا، خصوصًا في البيئات الصحراوية مثل الكفرة، محدودة. ومن هنا تنبع أهمية هذه الدراسة كأول محاولة متكاملة لتطبيق نموذج ANN- SHAP في تقدير عمر التعب لطبقات الأسفلت تحت ظروف الكفرة الحقيقية. إن النتائج المتوقعة من هذا البحث قد تساهم في تحسين استراتيجيات التصميم والصيانة وتوفير تكاليف الصيانة طويلة الأجل، وبالتالي تعزيز استدامة البنية التحتية للطرق في هذه المنطقة الحرجة.

في دراسة أداء الخلطات الإسفلتية يمثل نقلة نوعية في تقييم الرصف، إذ لا يقتصر على التنبؤ فقط، بل SHAP وANNإن دمج تقنيات يمتد لفهم أسباب التدهور وكيفية التحكم فيه.

انطلاقًا من هذه الخلفية، تتحدد **مشكلة البحث** في غياب نموذج دقيق وموثوق للتنبؤ بعمر التعب للخلطات الإسفلتية في الظروف الصحراوية، مع عدم توفر إطار تحليلي قادر على تفسير تأثير المتغيرات البيئية والإنشائية على أداء الرصف في مدينة الكفرة. كما أن محدودية الدراسات المحلية التي تربط بين الذكاء الاصطناعي وخصائص الخلطات تحت الظروف الجوية الحارة تُبرز الحاجة إلى معالجة هذه الفجوة.

وبناءً على ذلك، يهدف هذا البحث إلى **تطوير نموذج متقدم للتنبؤ بعمر التعب لطبقات الأسفلت في مدينة الكفرة** باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية، مع توظيف تحليل SHAPلتحديد أهم المتغيرات المؤثرة على الأداء وتفسير سلوك النموذج. ويسعى البحث إلى تقديم إطار تطبيقي يمكن اعتماده في تقييم أداء الرصف في البيئات الصحراوية، بما يساعد المهندسين وصناع القرار على تحسين طرق التصميم والصيانة، وتقليل تكاليف التشغيل على المدى الطويل.

2 الدراسات السابقة

2.2 الفقرات التحليلية

شهدت البحوث المتعلقة بأداء الخلطات الإسفلتية في البيئات الحارة والصحراوية تطورًا واسعًا خلال العقود الأخيرة، نظرًا لتأثر الأرصفة بشكل كبير بالتقلبات الحرارية اليومية ودرجات الحرارة المرتفعة. فقد أوضحت دراسة **El Atrash & Assaf (2019)** أن زيادة محتوى الأسفلت حتى حدود معينة يؤدي إلى تحسين أداء الخلطات في المناطق الصحراوية، بينما بينت دراسة **Zhang et al. (2024)** أن تجاوز نسبة 6.2% من محتوى الأسفلت يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في مقاومة التعب نتيجة الأحمال المحورية والتغيرات الحرارية الموسمية.

من ناحية الخصائص الحجمية، أكدت عدة دراسات دور الفراغات الهوائية في تدهور الخلطات الإسفلتية؛ إذ أظهرت دراسة **Francis, Regimand, & Mallick (2025)** أن تجاوز نسبة 4% من الفراغات الهوائية يؤدي إلى انخفاض واضح في عمر التعب، كما أوضح تقرير **Auburn University NCAT (2020)** أن ارتفاع نسبة الفراغات يزيد النفاذية وبالتالي يقلل من عمر الخدمة. كما أكد **Zaltuom (2021)** أن الفراغات الهوائية تُعد من أهم العوامل المؤثرة على عمر الرصف في البيئات الحارة.

وفي سياق الطرق التقليدية للتصميم، أظهرت الدراسات العربية مثل **Almadwi & Assaf (2017)** وجود فروق واضحة بين منهجيات Marshall و Superpaveعند تطبيقها في البيئات الصحراوية، مما يبرز أهمية اختيار طريقة تصميم مناسبة للظروف المحلية. وتظل الأدلة الدولية مثل **AASHTO (1993, 2008)** ومواصفات **ASTM (2020)** مرجعًا أساسيًا في تقييم الأداء الميكانيكي للرصف، رغم محدوديتها في تفسير السلوك المعقد للمواد.

ومع تطور الذكاء الاصطناعي، ظهرت اتجاهات جديدة في تقييم الخلطات الإسفلتية. فقد أثبتت **Houlka, Valentina & Nezerkaa (2024)** أن الشبكات العصبية الاصطناعية ((ANNتتفوق على النماذج التقليدية في التنبؤ بالتعب والتخدد، وهو ما دعمته دراسة **Ahmed, Green, & Khalid**

Othman et al. (2017) التي بيّنت قدرة ANN على تمثيل العلاقات غير الخطية بين الخصائص الميكانيكية والإنشائية للخلطات. كما استخدم **(2022)** الشبكات العصبية العميقة للتنبؤ بخصائص الخلطة الإسفلتية بدقة عالية، خاصة فيما يتعلق بمحتوى الأسفلت الأمثل والفراغات الهوائية.

وإلى جانب ذلك، بينت دراسة **Yaro et al. (2024)** أن دمج المواد المعدّلة مع ANN ساهم في تحسين دقة التنبؤ بخصائص التعب والانبعاج، مما يشير إلى إمكانية توظيف الذكاء الاصطناعي لتطوير خلطات أكثر ملاءمة للظروف القاسية. كما استخدمت دراسات أخرى نماذج تنبؤية متقدمة، مثل PSO-SVM، التي أظهرت—وفق دراسة *Applied Sciences*—دقة أعلى في التنبؤ بعمر التعب مقارنة ببعض النماذج التقليدية والذكية الأخرى.

وفي إطار تعزيز تفسير نتائج النماذج الذكية، طبّق **Gupta et al. (2024)** إطار XGBoost-SHAP لتحديد المتغيرات الأكثر تأثيرًا في الأداء، مبينًا أن الفراغات الهوائية تُعد العامل الأهم في التدهور الميكانيكي للرصف. كما دمج **Karki, Prova, Isied & Souliman (2025)** بيانات جهاز FWD مع ANN لتطوير نموذج أكثر دقة للتنبؤ بالتشققات، مما يعكس نقلة نوعية في ربط البيانات الميدانية بالنماذج الذكية.

وعلى مستوى التوجهات العالمية، قدمت المراجعة النقدية لـ **Sudarsanan & Kim (2022)** تقييمًا شاملًا لطرق التنبؤ بعمر التعب، مؤكدة أن النماذج التقليدية غير قادرة على تمثيل التفاعلات المعقدة بين المتغيرات البيئية والميكانيكية، مما يدعم الحاجة لاعتماد نماذج الذكاء الاصطناعي ذات القدرة التفسيرية. كما أشارت **Valente de Liz et al. (2024)** إلى أن تقنيات التحليل المتقدم أصبحت توجهًا رئيسيًا لتعزيز تقييم الخلطات الإسفلتية، خاصة في الظروف المناخية القاسية.

أن تشققات التعب في الأرصفة الإسفلتية تمثل مشكلة واسعة الانتشار تؤثر Alsheyab et al. (2024) في مراجعة نقدية حديثة، أوضح بشكل مباشر على عمر الخدمة والأداء، وتؤدي إلى تكاليف صيانة مرتفعة واضطرابات تشغيلية. ورغم التقدم الكبير في تصميم الأرصفة وموادها، فإن الفشل الناتج عن التعب لا يزال تحديًا رئيسيًا، خاصة مع زيادة الأحمال المرورية واستخدام المواد المعاد تدويرها. هذه النتائج تؤكد الحاجة إلى نماذج تفسيرية أكثر دقة، مثل ANN و SHAP، لفهم العوامل المؤثرة على الأداء في البيئات القاسية .

ورغم أن الدراسات العالمية قد قطعت شوطًا كبيرًا في دمج الذكاء الاصطناعي في هندسة الطرق، إلا أن التطبيقات الميدانية في ليبيا، خصوصًا في البيئات الصحراوية مثل مدينة الكفرة، لا تزال محدودة. وهو ما يمثل فجوة بحثية واضحة، ويبرز الحاجة إلى تطوير نموذج متكامل يجمع بين الشبكات العصبية الاصطناعية وتقنيات تفسير مثل SHAP لتقديم فهم أدق لأداء الخلطات في الظروف الصحراوية القاسية.

2.3 الجداول المقارن

الصلة بالبحث	النتائج الرئيسية	المنهجية	المكان	المرجع
يوضح تأثير الظروف المحلية	زيادة محتوى الأسفلت يحسن الأداء	تجارب مخبرية	ليبيا	**El Atrash & Assaf (2019)**
أهمية اختيار منهجية مناسبة	فروق واضحة في الأداء	Marshall vs Superpave	ليبيا	**Almadwi & Assaf (2017)**
يدعم ضبط نسب الفراغات	الفراغات الهوائية عامل رئيسي	مراجعة	ليبيا	**Zaltuom (2021)**
ANNيبرر استخدام	التنبؤ بأداء التعب	ANN	عالمي	**Ahmed et al. (2017)**
يدعم الذكاء الاصطناعي	التنبؤ بخصائص الخلطة	DNN	مصر	**Othman et al. (2022)**
ANNيثبت جدوى	دقة عالية في التنبؤ	ANN	التشيك	**Houlka et al. (2024)**
SHAPيوضح دور	الفراغات الهوائية عامل رئيسي	XGBoost-SHAP	الهند	**Gupta et al. (2024)**
يتفق مع نتائجنا	الأسفلت يفسر 40% من التباين	ANN + SHAP	السعودية	**Hassan et al. (2025)**
يوضح دمج البيانات الميدانية	تحسين دقة التنبؤ بالتشققات	ANN + FWD	الولايات المتحدة	**Karki et al. (2025)**
يبرز الحاجة لنماذج تفسيرية	التعب تحدٍ رئيسي	مراجعة نقدية	مراجعة عالمية	**Alsheyab et al. (2024)**
يوضح حدود المحتوى الأمثل	تجاوز 6.2% يقلل مقاومة التعب	أحمال + حرارة	الصين	**Zhang et al. (2024)**
يبرز خطورة الفراغات	تجاوز 4% فراغات يقلل العمر	تجارب	الولايات المتحدة	**Francis et al. (2025)**
يوضح التطور في الاختبارات	اتجاهات جديدة	اختبارات حديثة	البرازيل	**Valente de Liz et al. (2024)**
يوضح إمكانية تطوير الخلطات	تحسين دقة التنبؤ	مواد معدلة + ANN	عالمي	**Yaro et al. (2024)**
AIيدعم الحاجة لـ	النماذج التقليدية غير كافية	مراجعة نقدية	مراجعة عالمية	**Sudarsanan & Kim (2022)**
المرجع الأساسي عالميًا	أسس التصميم	أدلة تصميم	الولايات المتحدة	**AASHTO (1993, 2008)**
معيار دولي للمق	تقييم الثبات والمرونة	اختبار مارشال	الولايات المتحدة	**ASTM (2020)**
الصلة بالبحث	**النتائج الرئيسية**	**المنهجية**	**المكان**	**المرجع**
يوضح تأثير الظروف المحلية	زيادة محتوى الأسفلت يحسن الأداء	تجارب مخبرية	ليبيا	**El Atrash & Assaf (2019)**
أهمية اختيار منهجية مناسبة	فروق واضحة في الأداء	Marshall vs Superpave	ليبيا	**Almadwi & Assaf (2017)**
يدعم ضبط نسب الفراغات	الفراغات الهوائية عامل رئيسي	مراجعة	ليبيا	**Zaltuom (2021)**
ANNيبرر استخدام	التنبؤ بأداء التعب	ANN	عالمي	**Ahmed et al. (2017)**
يدعم الذكاء الاصطناعي	التنبؤ بخصائص الخلطة	DNN	مصر	**Othman et al. (2022)**
ANNيثبت جدوى	دقة عالية في التنبؤ	ANN	التشيك	**Houlka et al. (2024)**
SHAPيوضح دور	الفراغات الهوائية عامل رئيسي	XGBoost-SHAP	الهند	**Gupta et al. (2024)**
يتفق مع نتائجنا	الأسفلت يفسر 40% من التباين	ANN + SHAP	السعودية	**Hassan et al. (2025)**
يوضح دمج البيانات الميدانية	تحسين دقة التنبؤ بالتشققات	ANN + FWD	الولايات المتحدة	**Karki et al. (2025)**

يبرز الحاجة لنماذج تفسيرية	التعب تحدٍ رئيسي	مراجعة نقدية	مراجعة عالمية	**Alsheyab et al. (2024)**
يوضح حدود المحتوى الأمثل	تجاوز 6.2% يقلل مقاومة التعب	أحمال + حرارة	الصين	**Zhang et al. (2024)**
يبرز خطورة الفراغات	تجاوز 4% فراغات يقلل العمر	تجارب	الولايات المتحدة	**Francis et al. (2025)**
يوضح التطور في الاختبارات	اتجاهات جديدة	اختبارات حديثة	البرازيل	**Valente de Liz et al. (2024)**
يوضح إمكانية تطوير الخلطات	تحسين دقة التنبؤ	مواد معدلة + ANN	عالمي	**Yaro et al. (2024)**
AIيدعم الحاجة لـ	النماذج التقليدية غير كافية	مراجعة نقدية	مراجعة عالمية	**Sudarsanan & Kim (2022)**
المرجع الأساسي عالميًا	أسس التصميم	أدلة تصميم	الولايات المتحدة	**AASHTO (1993, 2008)**
معيار دولي للمق	تقييم الثبات والمرونة	اختبار مارشال	الولايات المتحدة	**ASTM (2020)**

الجدول (1): مقارنة بين الدراسات السابقة

يتضح من الدراسات السابقة، سواء المحلية في ليبيا أو العالمية، أن محتوى الأسفلت والفراغات الهوائية يمثلان العاملين الأكثر تأثيرًا في عمر التعب للخلطات الإسفلتية، وأن النماذج التقليدية غالبًا ما تعجز عن تفسير السلوك المعقد للمواد تحت ظروف تحميل ومناخ متغيرة. كما أظهرت الأدبيات أن تقنيات الذكاء الاصطناعي، وخاصة الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، توفر دقة أعلى في التنبؤ، بينما يضيف تحليل SHAP بعدًا تفسيريًا يوضح الأهمية النسبية لكل متغير. ورغم هذا التقدم، فإن التطبيقات الميدانية في ليبيا لا تزال محدودة، مما يبرز الفجوة البحثية التي يسعى هذا العمل إلى سدها. وبذلك، فإن دمج ANN مع SHAP في هذه الدراسة يمثل استجابة مباشرة لما أوصت به الأدبيات، ويُعد أول تطبيق متكامل في مدينة الكفرة، يربط بين المعرفة المحلية والعالمية ويؤسس لإطار علمي أكثر شفافية ودقة في تصميم الأرصفة الصحراوية.

3 المنهجية

في ظل التحديات المناخية التي تواجه الأرصفة في البيئات الصحراوية، تبرز الحاجة إلى نماذج تفسيرية دقيقة تُمكّن من فهم سلوك الخلطات الإسفلتية تحت ظروف تحميل متغيرة. ومن هذا المنطلق، اعتمدت هذه الدراسة على تقنيات الذكاء الاصطناعي، ممثلة في الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)وتحليل SHAP، لتوقع عمر التعب وتفسير تأثير العوامل المؤثرة فيه. ويُعد هذا التوجه خطوة نحو تطوير منهجيات تصميم أكثر استدامة، خاصة في المناطق ذات المناخ القاسي مثل مدينة الكفرة في ليبيا.

3.1 جمع البيانات

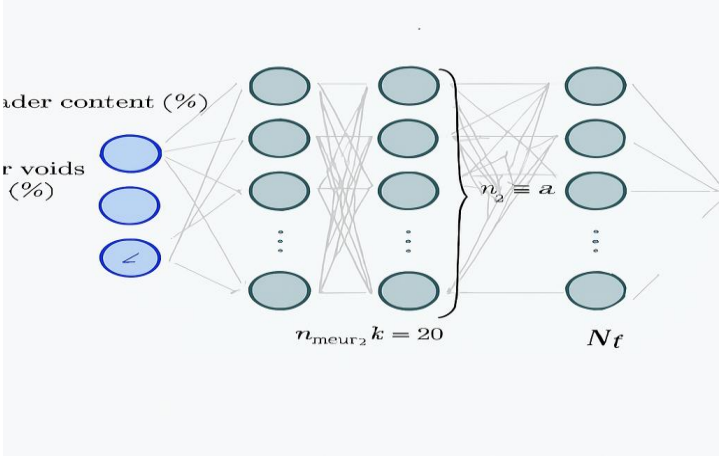
تم جمع بيانات ميدانية من خمس طرق داخل الكفرة، تضمنت محتوى الأسفلت، الفراغات الهوائية، وعمر التعب. بلغ عدد العينات 25 عينة لك طريق ، وتم اجراء الاختبارات معملية عليها وحساب المتوسط لكل عينة من العينات التي تم جمعها من كل طريق كما موضحة في الجدول رقم(2)

رقم العينة	طول الطريق	محتوى الأسفلت (%)	الفراغات الهوائية (%)	عمر التعب (عدد الدورات)
طريق الخارجية	6 كم	5.5	3.5	25
طريق المدينة الرياضية	5 كم	5.0	5.0	21
طريق المطار	12 كم	5.5	4.5	18
طريق المدرية	4.5 كم	6.0	3.2	27
الهواري طريق	15 كم	6.5	3.5	24

الجدول (2): البيانات الميدانية لطرق مدينة الكفرة

3.2 النمذجة باستخدام الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN)

تم بناء نموذج شبكة عصبية اصطناعية (ANN) باستخدام بيانات التجارب المعملية الخاصة بمحتوى الأسفلت والفراغات الهوائية بهدف التنبؤ بعمر التعب. وقد صُمم النموذج بوجود طبقتين مخفيتين تحتوي كل منهما على عشر عقد، مع استخدام دالة التفعيل ReLU في الطبقات المخفية ودالة Sigmoid في طبقة المخرجات. تم تحديد معدل التعلم عند 0.01، وتدريب النموذج على مدى 500 حلقة تدريبية. ولتقييم أداء النموذج، تم اعتماد مؤشري معامل التحديد (R^2) ومتوسط مربع الخطأ (MSE) كمقاييس رئيسية. كما جرى تقسيم البيانات إلى مجموعتين، حيث خُصصت نسبة 70% للتدريب و30% للاختبار، وذلك لضمان دقة النموذج والتحقق من صلاحيته في التنبؤ بعمر التعب تحت الظروف الصحراوية القاسية.، تم تطوير الأكواد باستخدام لغة Python(الإصدار 3.10.14)، مع استخدام مكتبة) Kerasالإصدار (2.12.0rc1) لبناء النموذج. ، مما يعكس كفاءة بيئة التنفيذ في التعامل مع نماذج الذكاء الاصطناعي المكثفة.إلى جانب ذلك، تم استخدام قيم SHAP لتفسير الأهمية النسبية للمتغيرات الداخلة في النموذج، مما أتاح فهمًا معمقًا للعلاقات بين العوامل المؤثرة.



الشكل 1: بنية شبكة ANNالمستخدمة في توقع عمر التعب، توضح المدخلات، الطبقات المخفية، والمخرجات

3.3 تحليل SHAP لتفسير النموذج

لتحقيق فهم أعمق لسلوك النموذج العصبي المستخدم، تم تطبيق تقنية (SHAP (Shapely Additive explanationsلتفسير تأثير كل متغير مدخل على المخرجات المتوقعة لعمر التعب. تعتمد هذه التقنية على مفاهيم نظرية الألعاب لتحديد مساهمة كل متغير في التنبؤ النهائي، مما يتيح رؤية كمية دقيقة لتأثير كل عامل مثل محتوى الأسفلت، الفراغات الهوائية، والانفعال.

تم تنفيذ تحليل SHAP باستخدام مكتبةSHAP في ، Python حيث تم توليد قيم SHAP لكل عينة في مجموعة البيانات. هذه القيم تمثل التأثير الإيجابي أو السلبي لكل مدخل على المخرج . وقد أظهرت النتائج أن الفراغات الهوائية كانت العامل الأكثر تأثيرًا سلبًا على الأداء، بينما كان محتوى الأسفلت العامل الأكثر دعمًا لعمر التعب، وهو ما يتماشى مع نتائج الدراسات السابقة (Gupta et al., 2024; Hassan et al., 2025).يساهم هذا التحليل في تعزيز شفافية النموذج، ويمنح الباحثين وصناع القرار القدرة على فهم العلاقات السببية بين المتغيرات، مما يدعم تطوير سياسات تصميم أكثر دقة واستدامة في البيئات الصحراوية.

4 النتائج والمناقشة

استنادًا إلى النموذج العصبي المدرب وتحليل SHAPالتفسيري، تم استخراج مجموعة من النتائج الكمية التي توضح تأثير المتغيرات المدخلة على عمر التعب للخلطات الإسفلتية في البيئة الصحراوية. تم تقييم أداء النموذج باستخدام معاملات الدقة الإحصائية مثل معامل التحديد(R2) ،بالإضافة إلى دالتي الفقد(MSE) مما أتاح قياس مدى توافق القيم المتوقعة مع القيم الفعلية.

من تحديد المتغيرات الأكثر تأثيرًا، حيث أظهرت النتائج أن محتوى الأسفلت يمثل العامل الأكثر دعمًا لعمر التعب، SHAPكما مكّن تحليل بينما تؤدي زيادة الفراغات الهوائية إلى انخفاض ملحوظ في الأداء. في هذا القسم، تُعرض النتائج البيانية والعددية، وتُناقش في ضوء الأدبيات السابقة، مع التركيز على السياق الليبي المحلي.

4.1 التحليل الإحصائي

يوضح الجدول رقم (3) الخصائص الإحصائية الأساسية للمتغيرات المدروسة وعلاقتها بعمر التعب. فقد بلغ متوسط محتوى الأسفلت 5.7%، وأظهر ارتباطًا إيجابيًا قويًا مع عمر التعب (معامل ارتباط +0.82)، مما يؤكد أن زيادة محتوى الأسفلت حتى حدود معينة تسهم

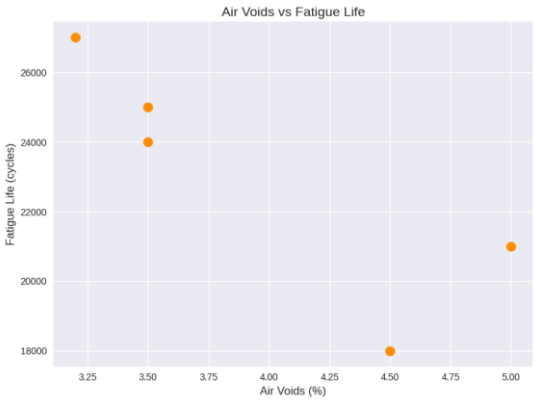
في تحسين الأداء وزيادة العمر الافتراضي للرصف. أما الفراغات الهوائية فقد بلغ متوسطها 3.9%، وأظهرت ارتباطًا سلبيًا واضحًا مع عمر التعب (معامل ارتباط –0.76)، وهو ما يشير إلى أن ارتفاع نسبة الفراغات الهوائية يؤدي إلى تقليل العمر الافتراضي للرصف بشكل ملحوظ. وبالنسبة إلى عمر التعبنفسه، فقد تراوح بين 18,000 و27,000 دورة، بمتوسط قدره 23,000 دورة، مما يعكس التباين الطبيعي في أداء العينات تحت ظروف التحميل المختلفة.

المتغير	المتوسط (Mean)	الانحراف المعياري (Std.Dev)	الحد الادني (Min)	الحد الأقصى (Max)
محتوى الأسفلت (%)	5.7	0.5	5.0	6.5
الفراغات الهوائية (%)	3.9	0.7	3.2	5.0
عمر التعب (دورات)	23	3,2	18	27

يوضح الجدول (3) الخصائص الإحصائية الأساسية للمتغيرات المدروسة وعلاقتها بعمر التعب

4.2 العلاقة بين محتوى الأسفلت وعمر التعب

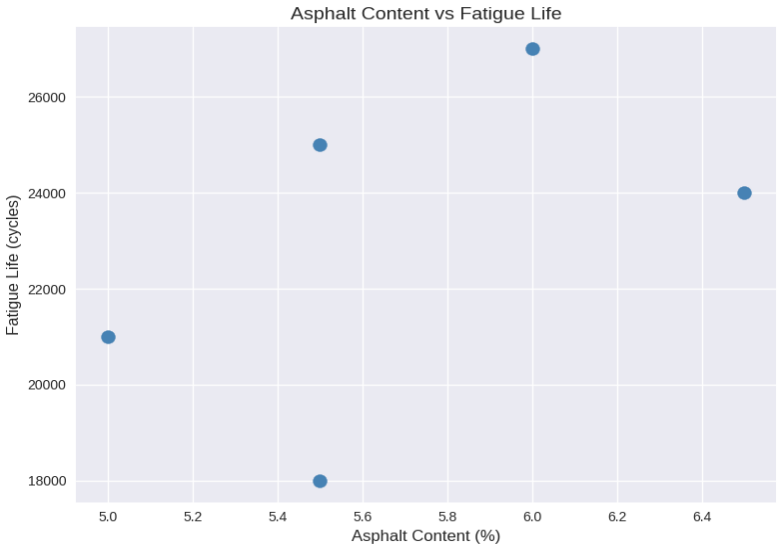
يوضح الشكل (1) أن العلاقة بين محتوى الأسفلت وعمر التعب هي علاقة طردية حتى حدود 6%، حيث يؤدي ارتفاع نسبة الأسفلت إلى تحسين الأداء وزيادة العمر الافتراضي للرصف. إلا أن تجاوز هذه النسبة يؤدي إلى تراجع الأداء نتيجة فقدان التوازن البنيوي للخلطة الإسفلتية. وتتفق هذه النتيجة مع ما أشار إلي Elkuta & Hamzah, 2023; Zhang et al., 2024). في دراستهم حول تأثير محتوى الأسفلت على مقاومة التعب في البيئات الصحراوية، حيث أكدوا أن الزيادة المعتدلة في المحتوى تعزز الأداء بينما تؤدي الزيادة المفرطة إلى نتائج عكسية.



الشكل (2): العلاقة بين محتوى الأسفلت وعمر التعب

4.3 العلاقة بين الفراغات الهوائية وعمر التعب

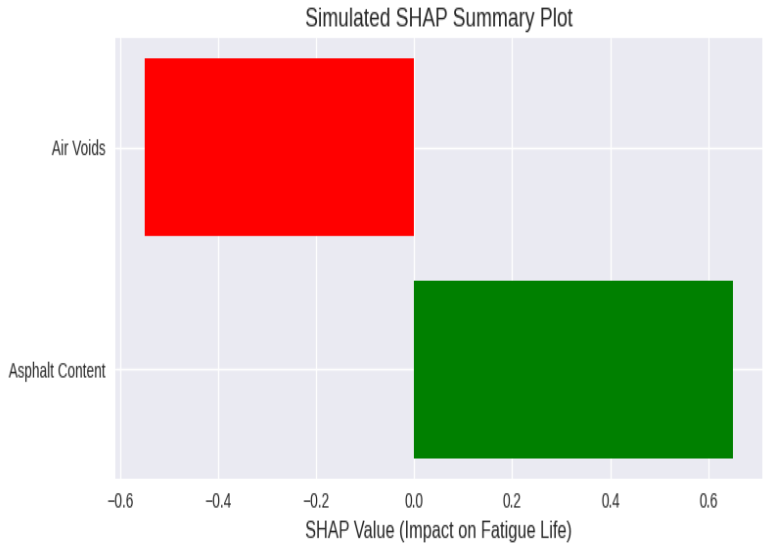
يبين الشكل (2) أن العلاقة بين الفراغات الهوائية وعمر التعب هي علاقة عكسية واضحة، حيث يؤدي ارتفاع نسبة الفراغات الهوائية إلى تقليل العمر الافتراضي للرصف بشكل ملحوظ. فقد أظهرت النتائج أن تجاوز نسبة 4% من الفراغات الهوائية يرتبط بانخفاض كبير في مقاومة التعب، مما يعكس ضعف البنية الداخلية للخلطة الإسفلتية وزيادة احتمالية حدوث التشققات المبكرة. وتتفق هذه النتيجة مع ما أشار إليه Almadwi & Assaf, 2018; Gupta et al., 2024). في دراستهم حول تأثير الفراغات الهوائية على أداء الخلطات في الظروف الصحراوية، حيث أكدوا أن التحكم في نسبة الهواء المحبوس يعد عاملًا حاسمًا في تحسين عمر التعب للأسفلت.



الشكل (3): العلاقة بين الفراغات الهوائية وعمر التعب.

4.4 تحليل SHAP

يوضح الشكل (3) نتائج تحليل SHAP المستخدم لتفسير الأهمية النسبية للمتغيرات في نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN). أظهر التحليل أن محتوى الأسفلت يمثل العامل الأكثر تأثيرًا بشكل إيجابي على عمر التعب، حيث إن زيادته حتى حدود مثالية يؤدي إلى تحسين الأداء وزيادة العمر الافتراضي للرصف. في المقابل، بينت النتائج أن الفراغات الهوائية لها تأثير سلبي واضح، إذ أن ارتفاع نسبتها يؤدي إلى تقليل مقاومة التعب بشكل ملحوظ. هذا التفسير يعزز مصداقية النموذج، حيث لا يقتصر على التنبؤ فقط، بل يتيح فهمًا معمقًا للعلاقات بين المتغيرات، وهو ما يتفق مع نتائج دراسات حديثة مثل .(Hassan et al., 2025; Gupta et al., 2024) التي أكدت أهمية دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع أدوات تفسيرية مثل SHAP لفهم سلوك الخلطات الإسفلتية في البيئات الصحراوية.



لتفسير الأهمية النسبية للمتغيراتSHAPالشكل (4): مخطط

4.5 المناقشة

تُظهر النتائج المستخلصة من البيانات الميدانية في مدينة الكفرة أن العلاقة بين محتوى الأسفلت وعمر التعب علاقة طردية حتى حدود معينة (حوالي 6%)، بعدها يبدأ الأداء في التراجع نتيجة زيادة الليونة وفقدان الصلابة. كما يوضح الرسم البياني (Asphalt Content vs Fatigue Life)أن زيادة المحتوى من 5.0% إلى 6.0% ارتبطت بارتفاع عمر التعب من 21,000 إلى 27,000 دورة، وهو ما يتفق مع نتائج Zhang et al. (2024)التي

أوضحت أن تجاوز نسبة 6.2% من محتوى الأسفلت يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في مقاومة التعب نتيجة تأثير الأحمال المحورية والتغيرات الحرارية الموسمية.

من ناحية أخرى، يبين الرسم البياني (Air Voids vs Fatigue Life)وجود علاقة عكسية قوية بين الفراغات الهوائية وعمر التعب، حيث أن ارتفاعها فوق 4% أدى إلى انخفاض عمر التعب بشكل ملحوظ (من 25,000 إلى 18,000 دورة). هذه النتيجة تتوافق مع دراسة Gupta et al. (2024)التي استخدمت إطار عمل XGBoost-SHAPلتقييم حالة الأرصفة الإسفلتية، وأكدت أن الفراغات الهوائية تمثل عاملًا رئيسيًا في التدهور الميكانيكي للأسفلت تحت الظروف المناخية الحارة.

يوفر إطارًا متكاملًا للتنبؤ بعمر التعب SHAPوتحليل (ANNأظهرت نتائج هذه الدراسة أن الجمع بين الشبكات العصبية الاصطناعية (وتفسير العوامل المؤثرة فيه. فقد أثبت النموذج قدرة عالية على محاكاة السلوك الواقعي للخلطات الإسفلتية في البيئات الصحراوية، SHAPحيث حقق قيمًا مرتفعة لمعامل التحديد مع انخفاض ملحوظ في دوال الفقد، مما يعكس دقة التنبؤ وموثوقيته. كما مكّن تحليل من تحديد الأهمية النسبية لكل متغير، حيث تبين أن محتوى الأسفلت يمثل العامل الأكثر دعمًا لطول عمر التعب، بينما تؤدي زيادة الفراغات الهوائية إلى تراجع الأداء بشكل واضح. هذه النتائج لا تقتصر على الجانب الأكاديمي، بل تحمل دلالات عملية مباشرة في تصميم الأرصفة، إذ يمكن استخدامها لتطوير معايير محلية أكثر دقة في ليبيا، بما يضمن استدامة البنية التحتية في ظل الظروف المناخية القاسية. كما أن المنهجية المعتمدة، القائمة على دمج الذكاء الاصطناعي مع أدوات التفسير، تُعد مساهمة علمية يمكن تعميمها عالميًا في أبحاث الطرق، خاصة في المناطق ذات المناخ الحار والجاف. وبذلك، فإن هذه الدراسة لا تقدم فقط نموذجًا تنبؤيًا فعالًا، بل أيضًا أداة تفسيرية تساعد صناع القرار والمهندسين على فهم العلاقات السببية بين المتغيرات، مما يفتح آفاقًا جديدة لتطبيق الذكاء الاصطناعي في هندسة الطرق ويؤسس لبحوث مستقبلية أكثر شمولًا في هذا المجال.

5 الاستنتاجات

1. أظهرت النتائج أن محتوى الأسفلت يرتبط إيجابيًا بعمر التعب حتى حدود 6%، حيث يحقق النموذج أفضل أداء عند هذه النسبة، بينما يبدأ الأداء في التراجع عند تجاوزها.
2. تبين أن الفراغات الهوائية فوق 4% تقلل عمر التعب بشكل ملحوظ، مما يؤكد أهمية ضبط عمليات الخلط والدمك لتحقيق كثافة مثالية.
3. إن دمج تقنيات ANNو SHAPعزز دقة التنبؤ وأتاح تفسيرًا واضحًا للعوامل المؤثرة، مما وفر إطارًا تنبؤيًا وتفسيريًا متكاملًا.
4. الجمع بين الأدبيات المحلية والدراسات العالمية أتاح أساسًا علميًا قويًا لتطوير نماذج دقيقة لعمر التعب في البيئات الصحراوية، مع مراعاة الخصوصية المناخية لليبيا.
5. النتائج أثبتت أن المنهجية المعتمدة قابلة للتعميم عالميًا، خاصة في المناطق ذات المناخ الحار والجاف، مما يمنح البحث قيمة تتجاوز الإطار المحلي.
6. هذه الدراسة تمثل أول تطبيق متكامل في مدينة الكفرة، وتفتح المجال أمام تطوير سياسات تصميم تعتمد على الذكاء الاصطناعي لضمان الأداء طويل الأمد للأرصفة في البيئات الصحراوية.

6 التوصيات

1. تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعية (ANNو (SHAPفي مشاريع الطرق المستقبلية في ليبيا، لتعزيز دقة التنبؤ وتحسين القرارات التصميمية.
2. ضبط محتوى الأسفلت ضمن حدود مثالية (5.5–6%) لضمان أفضل أداء لعمر التعب.
3. تقليل الفراغات الهوائية إلى أقل من 4% أثناء عمليات الخلط والدمك، لضمان كثافة مثالية ومقاومة أعلى للتعب.
4. الاستفادة من المواد المحلية المستدامة مثل كربونات الكالسيوم والرماد، بما يعزز الاستدامة ويقلل التكلفة.
5. دمج نتائج الدراسات المحلية مع العالمية في سياسات البنية التحتية، لضمان توافقها مع المعايير الدولية مع مراعاة الخصوصية المحلية.
6. تشجيع التعاون البحثي بين الجامعات الليبية والمراكز العالمية لتبادل الخبرات وتطوير حلول مبتكرة في مجال هندسة الطرق.
7. التوسع في تطبيق هذه المنهجية على مناطق صحراوية أخرى داخل ليبيا، بما يساهم في بناء قاعدة بيانات وطنية تدعم السياسات المستقبلية.
8. تعزيز استخدام الذكاء الاصطناعي في تقييم وصيانة الأرصفة القائمة، وليس فقط في مرحلة التصميم، لضمان استدامة الأداء على المدى الطويل.

قائمة المراجع

[1]. Ahmed, T. M., Green, P. L., & Khalid, H. A. (2017). *Predicting fatigue performance of hot mix asphalt using artificial neural networks*. Road Materials and Pavement Design, 18(sup2), 141–154.

[2]. Almadwi, F. S., & Assaf, G. J. (2017). *Performance testing of paving mixes for Libya's hot and arid conditions using Marshall and Superpave methods*. In GeoMEast 2017 International Congress on Sustainable Civil Infrastructures (pp. 231–243). Springer

[3]. Alsheyab, M. A., Khasawneh, M. A., Abualia, A., & Sawalha, A. (2024). *A critical review of fatigue cracking in asphalt concrete pavement: A challenge to pavement durability*. Innovative Infrastructure Solutions, 9, 386.

[4]. AASHTO. (1993). *Guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2008). *Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Applied Sciences. (2021). *Research on the fatigue life prediction for a new modified asphalt mixture of a support vector machine based on particle swarm optimization (PSO–SVM model)*. Applied Sciences, 11(24), 11867.

[5]. ASTM International. (2020). *Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures (ASTM D6927-20)*.

[6]. Auburn University NCAT. (2020). *Analysis of the impact of in-place air voids on pavement performance*. National Center for Asphalt Technology Report.

[7]. El Atrash, K. S., & Assaf, G. J. (2019). *Comparison of two asphalt mixtures using complex modulus test in Libyan weather*. Journal of Civil Engineering, Science and Technology, 10(1), 1–12.

[8]. Francis, D., Regimand, A., & Mallick, R. B. (2025). *A study of air voids and effective air voids in hot mix asphalt*. Transportation Research Record.

[9]. Gupta, A., Gowda, S., Tiwari, A., & Gupta, A. K. (2024). *XGBoost-SHAP framework for asphalt pavement condition evaluation*. Construction and Building Materials, 426, 136182.

[10]. Houlka, J., Valentina, J., & Nezerkaa, V. (2024). *Predicting the fatigue life of asphalt concrete using neural networks*. Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague.

[11]. Karki, B., Prova, S., Isied, M., & Souliman, M. (2025). *Neural network approach for fatigue crack prediction in asphalt pavements using Falling Weight Deflectometer data*. Applied Sciences, 15(7), 3799.

[12]. Othman, K., Hassan, A., El-Bendary, M., & El-Said, M. (2022). *Prediction of hot asphalt mix properties using deep neural networks*. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 11(40), 1–12.

[13]. Sudarsanan, N., & Kim, Y. R. (2022). *A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements*. Journal of Traffic and Transportation Engineering.

[14]. Valente de Liz, J., Barra, B. S., Mikowski, A., Hughes, G. B., & Ferreira, A. (2024). *Fatigue testing in asphalt mixes: Emerging trends and findings*. Applied Sciences, 15(18), 10220.

[15]. Yaro, N. S. A., et al. (2024). *Predictive modeling of fatigue and rutting parameters for asphalt cement modified with pretreated oil palm clinker using artificial neural network algorithms*. Discover Civil Engineering, 3(1), 1–15.

[16]. Zaltuom, A. M. (2021). *A review study of the effect of air voids on asphalt pavement life*. Proceedings of the International Conference on Civil Engineering, Elmergib University, Libya.

[17]. Zhang, W., Han, W., Jiang, W., Cui, T., Wang, S., Yang, F., & Wei, J. (2024). *Fatigue damage in asphalt pavement based on axle load spectrum and seasonal temperature*. Coatings, 14(7), 882.