

Research Article:

التنبؤ بالإنهاك والتخدد المبكر في الرصف المرن ذو الطبقات الخطية لحالات تحميل مختلفة باستخدام الطريقة الميكانيكية-التجريبية

نور ياسر يونس^١أ.د. أيمن عبدالهادي عبدالجود^٢أ.م. أمينة أحمد خليل^٣^١ جامعة الموصل/ كلية الهندسة/ قسم الهندسة المدنية

Article Information

Article History:

Received February 11th 2021Accepted July 29th 2021Available online, August 16th 2021

Keywords:

الرصف المرن، الطريقة الميكانيكية-التجريبية، KENPAVE، الأنهاك، التخدد

About the Authors:

Corresponding author:

نور ياسر يونس

E-mail:

noor.enp144@student.uomosul.edu.iq

Researcher Involved:

أ.د. أيمن عبدالهادي عبدالجود

أ.م. أمينة أحمد خليل

DOI <https://doi.org/10.17656/sjes.10146>

© The Authors, published by University of Sulaimani, college of engineering. This is an open access article distributed under the terms of a Creative Commons Attribution 4 International License.

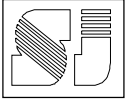
المستخلص

يهدف البحث إلى دراسة وتحليل الضرر للطرق الإسفلتية وبتغير الأحمال باستخدام البرمجيات كبرنامج KENPAVE من خلال تقييم أداء الرصف المرن باستخدام الطريقة الميكانيكية-التجريبية (M-E) بافتراض أن هياكل رصف الطريق تصبح بنية خطية متعددة الطبقات للرصف المرن. تم استخدام نسب تحميل ٥٠٪ و ١٠٠٪ و ١٥٠٪ و ٢٠٠٪ من الحمولة القياسية وحسب المواصفات العراقية. اعتمد على انفعال الشد الأفقي أسفل الطبقة الإسفلتية لتقدير الإنهاك في الرصف وعلى انفعال الضغط العمودي أعلى الطبقة الترابية لتقدير التخدد في الرصف عند الحمل القياسي. كما لوحظ أيضاً أن زيادة الأحمال يؤدي إلى زيادة الإزاحة العمودية للتبليط حيث كانت قيمة التشوه على الطبقة السطحية للمحور الترددي بقيمة (٠.٠٨٩٩٨) cm عند الحمل القياسي وأن (84) % من هذا التشوه كان في طبقة الأرض الطبيعية. كما أن أعلى قيمة للضرر كانت في طبقة الأساس الإسفلتية بقيمة (٠.٠٤٤٢٦) عند الحمل القياسي. كما وجد أن العمر التصميمي يقل بمقدار ٩ أضعاف عند زيادة الحمل إلى ضعف الحمل القياسي والذي يؤدي بدوره إلى تقليل كفاءة الرصف من خلال تحليل النتائج تبين أن أعلى قيم للجهد العمودي كان على المحور الأحادي في الطبقة السطحية وبقيمة (639.753Kpa) عند الوزن القياسي، كما أدى إضافة الحمل إلى زيادة الضغط الذي توزعه اطارات المركبة على الرصف بحيث يكون انفعال الشد والضغط بقيم أعلى. بينما تزداد قيم كل من N_f و N_r مع انخفاض قيم انفعال الشد والضغط. كانت أعلى قيم انفعال الشد أسفل طبقة الأساس الإسفلتية للمحور الأحادي بقيمة (١.٥ * ١٠ - ٤) عند الحمل القياسي. بينما أعلى قيم انفعال الضغط كانت في أعلى طبقة ما تحت الأساس للمحور الأحادي ذو الإطارات المزدوجة بقيمة (٤.٧٦١ * ١٠ - ٤)

١. المقدمة

عادة عبارة عن أنظمة ذات طبقات مبنية من مواد إسفلتية ركامية. ويتكون مقطع الرصف المرن عادة من عدة طبقات من المواد بسمك كافي لنقل الحمل على النحو الأمثل إلى الطبقات السفلى، وتتكون هذه الطبقات عادة من مواد عالية الجودة في الطبقات العليا لتتحمل الإجهادات العالية والأقل جودة في الطبقات السفلى [٢]. تم تطوير التحليل الإنشائي في الرصف بشكل كبير منذ الدراسات

يعتبر تصميم الرصف المرن (Flexible pavement) من أهم أجزاء هندسة النقل والتي تعني بحركة المرور من مكان إلى آخر بشكل مريح واقتصادي وآمن [١]، وقد سمي بهذا الاسم لأن هيكल الرصف الكلي ينحني تحت أحمال المركبات. يكون الرصف المرن



الرصيف، تحتوي على عدد من النماذج التدميرية الرئيسية للرصيف (distress) لتحديد كل من الإنهك والتخدد. حيث تستخدم هذه النماذج لتحديد العمر الافتراضي لتصميم الرصيف [7] باستخدام برنامج KENPAVE. تم اعتماد التحليل على افتراض أن جميع الطبقات مرنة خطية [3]. وبناء على ما تقدم تم أخذ مقطع من طريق أسفلتي والذي يمثل طريق المرور السريع رقم-١ في العراق وتحليله مع دراسة تأثير أوزان المحاور وزيادتها على الفشل المبكر للتبليط المرن. يعتبر الإنهك والتخدد من أهم العوامل التي تؤدي إلى الفشل في التبليط المرن حيث أن الإنهك يعتبر مؤشر للفشل الهيكلي للرصيف فالشقوق تسمح بتسلل الرطوبة وقد تتدهور أكثر وتصبح حفرة، أما التخدد فيحدث بسبب الحركة الجانبية لطبقات الأساس أو ما تحت الأساس تحت إطار العجلات أو زحف التبليط نفسه للطبقات الجديدة التي لم تحدل بشكل جيد أثناء التنفيذ أو ضعف في قوة طبقات الإسفلت بمرور الزمن ولذلك أجريت عدة دراسات حول التنبؤ بالإنهك والتخدد المبكر في الرصيف المرن باستخدام الطريقة الميكانيكية-التجريبية يمكن إدراج جزء منها وكما يلي: قام الباحثون (Samad, et al., 2011) بدراسة الحساسية (sensitivity) في الأرصعة المرنة من خلال تقييم زيادة الأحمال وجودة خصائص المواد معتمداً على الطريقة الميكانيكية-التجريبية باستخدام برنامج KENLAYER. وقد توصل الباحثون إلى أن تأثير التحميل الزائد على أداء هيكل الرصيف يصعب تقليله على الرغم من أن أول طبقتين لهما معامل مرونة مرتفع نسبياً [2]. كما أجرى الباحثون (Priyanka, et al., 2015) دراسة تحليلية باستخدام برنامج KENPAVE للطرق ذات الأحجام المرورية المنخفضة مع قيم معامل المرونة (MR) Resilient Modulus لمختلف ظروف التربة وحركة المرور المقترحة من قبل (Indian Roads Congress, IRC) للطرق ذات الحجم المروري المنخفض، بافتراض 25% و 50% و 75% في قيم MR. تم النظر في الحالات الحرجة لانخفاض قيم معامل المرونة بسبب عمر الرصيف. من النتائج التي تم التوصل إليها هو أن هنالك زيادة في قيم الإجهاد والانفعال وانخفاض كبير في عمر الإنهك والتخدد في جميع الحالات الحرجة. وأن قيمة نسبة الضرر (damage ratio) كانت أكبر من واحد وهذا يدل على فشل التبليط. أوضح التحليل أن هياكل الرصيف للحالات التقليدية تفشل عندما تنخفض قيم معامل المرونة وبالتالي يجب تعديل التصميم في هذه الحالات، كما تم الاستنتاج بأنه ينبغي النظر بجدية في حالات انخفاض خواص المواد بسبب الغمر الجزئي أو الكامل للرصيف، خاصة في مناطق هطول الأمطار الغزيرة، ويجب اعتماد هياكل تصميم بديلة [8] في حين قام الباحث (Jasim) بدراسة تأثير خصائص طبقات الرصيف على الأداء الأمثل

الأولية التي أجراها Boussinesq حيث تم نمذجة التربة كمواد خطية مرنة في عام 1885. تم بعد ذلك تطويره لتشمل النماذج المرنة متعددة الطبقات نتيجة لعمل Burmister في عام 1945 و Schiffman في عام 1962. ينتج التخدد عادة عن تراكم التشوه الدائم في جميع طبقات الرصيف تحت التحميل المتكرر لحركة المرور ومن المعروف أن التشوه الدائم التراكمي للطبقة السطحية للرصيف الأسفلتي مسؤول عن جزء كبير من عمق التخدد النهائي المقاس على سطح الرصيف. يتأثر عرض وعمق التخدد بشكل كبير بالخصائص الهيكلية لطبقات الرصيف من سمك الطبقات وأحمال المرور والظروف البيئية [3]. وقد تعزى زيادة التخدد أو انخفاض عمر الإنهك للرصيف المرن إلى أوجه القصور في تطبيق تحليل الرصيف المرن وعدم الاهتمام بتحديد مكونات الرصيف التي تساعد في تحقيق التوازن مما يجعل عمر الرصيف متساوي فيما يتعلق بالتخدد والإنهك. تنتج أحمال المحور على سطح الرصيف نوعان مختلفان من الانفعالات. وهي انفعال الشد الأفقي (Et) في الجزء السفلي من الطبقة الإسفلتية وانفعال الضغط العمودي (Ec) في الجزء العلوي من الطبقة السفلية. فإذا كان انفعال الشد الأفقي مفرطاً فسيحدث تشقق في الطبقة السطحية وسيفشل الرصيف بسبب الإنهك أما إذا كان انفعال الضغط العمودي (Ec) مفرطاً فسيتم ملاحظة تشوهات دائمة على سطح هيكل الرصيف والنتائج من التحميل الزائد على الطبقة السفلية ويفشل الرصيف بسبب التخدد [4]. لقد أظهرت معظم الملاحظات الميدانية لتقييم حالة سطح الرصيف لشبكة الطرق في العراق أن التخدد والتشققات الناتجة عن الإنهك تعتبر من أهم المعوقات التي تمت ملاحظتها بسبب زيادة الأحمال وعدد مرات تكرار هذه الأحمال، وبالتالي تأثيرها الكبير على حالة الرصيف. مما يتطلب تصميمها بشكل يوفر سطح مقاوم للفشل تحت ظروف الخدمة، وذلك لأجل تقليل الإنهك والأخاديد في طبقات الرصيف المرن والاستفادة الكاملة من كل مادة من مواد الرصيف في التصميم [5]. غالباً ما يكون سبب فشل الرصيف ناتج عن التحميل الزائد مع مجموعة من العوامل الأخرى. يمكن أن تسبب عدم الدقة في تصميم الطريق إلى الفشل قبل العمر المتوقع للتصميم وأن الأضرار المبكر للرصيف المرن يعد أحد أكبر المشاكل في الطرق العراقية في ظل الزيادة في أحمال محاور الشاحنات. أجريت هذه الدراسة لبحث وتحليل تأثير الطبقات على الاستجابة الميكانيكية المرنة للرصيف مع تحميل حركة المرور بأحمال محاور بنسب (50%، 100%، 150%، 200%) من الأحمال القياسية وحسب المواصفات العراقية [6]. اعتمد في هذا البحث على الطريقة الميكانيكية-التجريبية لتصميم الرصيف المرن Mechanistic-Empirical Method of flexible pavement design والتي تستخدم في تصميم طبقات

الدولية وعند مداخل المدن. تعتبر طريقة التصميم الميكانيكية-التجريبية اليوم هي أكثر طرق التصميم شيوعاً، والتي تعقيم الاجهادات stresses والانفعالات strains و التشوهات deformations في الرصف المرن وفي مراحل مختلفة من التصميم [2]. تم دراسة تأثير أحمال المركبات على الإنهاك والتخدد المبكر للرصف المرن ذو الطبقات الختية باستخدام الطريقة الميكانيكية-التجريبية وباستخدام برنامج KENPAVE حيث تم إيجاد قيم كل من الاجهادات والانفعالات والتشوهات في الرصف المرن وكذلك تحليل قيمة الضرر الناتج عن هذه المتغيرات وإيجاد العمر التصميمي للتبليط.

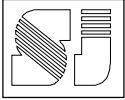
٣. منهجية البحث:

أن منهجية البحث التي تم اعتمادها في هذه الدراسة تتضمن ما يلي:
الطريقة الميكانيكية-التجريبية (Mechanistic-Empirical Method):
أثناء تطوير دليل AASHTO لعام ١٩٨٦، تم الإقرار بأن إجراء التصميم المستقبلي سوف يعتمد على المبادئ الميكانيكية-التجريبية وعلى مدار العشرين عاماً الماضية كان هناك اتجاه لوكالات الطرق لتوجيه جهودها نحو الأسلوب الميكانيكي-التجريبية. ربما يكون هذا هو السبب في أن AASHTO استبدلت طريقة التصميم التجريبي لعام ١٩٩٣ بطريقة التصميم الميكانيكي-التجريبية (M-E) Mechanistic-Empirical الأكثر وثوقية في عام ٢٠٠٤ [10]. حيث تستخدم عادة الطريقة الميكانيكية لتصميم الرصف المرن لطبقات الرصف وهي تقنية ناشئة للتصميم تحتوي على عدد من النماذج التدميرية للرصف لتحديد كل من الإنهاك والتخدد. حيث تستخدم هذه النماذج لتحديد العمر الافتراضي لتصميم الرصف [٤].
أذ يتم وصف العلاقة بين الظواهر الفيزيائية التي تكون ناتجة عن الأحمال وخصائص المواد لهيكل الرصف وفشل الرصف بواسطة المعادلات الرياضية المشتقة تجريبياً والتي تحسب عدد دورات التحميل للفشل [7]. حيث يفترض أن الحمل المروري الذي يعمل على سطح الرصف المرن هو حمل ثابت موزع بشكل متساوي بحيث تعطي مادة الرصف استجابة بأن الطبقات لها رد فعل وهي إجهاد الشد الأفقي horizontal tensile strain (ϵ_t) أسفل طبقة الإسفلت وقيمة انفعال الضغط العمودي vertical compressive strain (ϵ_c) على سطح التربة الأرضية والذي هو ضروري لأغراض التصميم [11]. والطريقة الميكانيكية-التجريبية المستخدمة في هذا البحث موضحة في الشكل (١) أذناه. الرصف المرن عبارة عن نظام ذو طبقات يحتوي على مواد أفضل في الأعلى ولا يمكن تمثيلها بكتلة متجانسة، لذا فإن استخدام نظرية Burmister متعددة الطبقات تعتبر أكثر ملائمة. طور Burmister

بالطريقة الميكانيكية-التجريبية من خلال تحقيق التوازن المطلوب للوصول لمرحلة فشل التخدد وفشل الإنهاك معتمداً على مفهوم تحليل الضرر للطرق الإسفلتية باستخدام برنامج KENLAYER ولعدة حالات من طبقات الطرق الإسفلتية بالنسبة لكل من التخدد والإنهاك. المعاملات التي تم اعتمادها في هذه الدراسة هي سمك الطبقة الإسفلتية وسمك طبقة الأساس ومعامل المرونة لكلا الطبقتين. بينت النتائج ان سمك طبقة الأساس ومعامل المرونة لطبقة الأساس من العوامل التي تؤثر على التوازن المطلوب للوصول لمرحلة فشل التخدد وفشل الإنهاك، وذلك لان زيادة اي منهما يؤدي الى زيادة كبيرة في مدة بلوغ مرحلة فشل التخدد بينما لا تتأثر مرحلة فشل الإنهاك بكلا العنصرين. كما أستنتج الباحث ان زمن الوصول لمرحلة فشل التخدد وفشل الإنهاك يزداد بزيادة سمك طبقة التبليط الإسفلتي ويزداد باعتدال بزيادة كل من معامل المرونة لطبقة التبليط الإسفلتية والأساس [5]. كما قام الباحثون (Tajudin, et al., 2018) بدراسة تأثير قيمة نسبة التحمل الكاليفورني CBR والحمل الزائد على الاستجابة المرنة لآلية الرصف. أجريت هذه الدراسة لاستقصاء وتحليل تأثير قوة الطبقة السفلية على الاستجابة الميكانيكية المرنة للأرصفة مع التحميل والحمل الزائد لحركة المرور العادية (٢٥٪ إلى ١٠٠٪) باستخدام برنامج KENPAVE. حيث تفاوتت نسبة CBR من ٣٪ إلى ١٠٪ مع زيادة كل ٠.٥٪. تم استخدام انفعال الشد الأفقي لتقدير عمر الإنهاك للرصف (N_f) كما تم استخدام إجهاد الضغط العمودي لتقدير عمر التخدد للرصف (N_r) أوضحت نتائج الدراسة أن إجهاد الشد الأفقي وإجهاد الضغط العمودي ينخفضان مع زيادة قيمة CBR للطبقة السفلية. كما يؤدي إضافة الأحمال إلى زيادة في قيم الضغط الذي تسلطه المركبة على الرصف بحيث يكون إجهاد الشد الأفقي والضغط العمودي أعلى. كما لوحظ أيضاً زيادة كل من N_f و N_r مع انخفاض إجهاد الشد الأفقي والضغط العمودي، مما يعني أن قيمة CBR الأعلى ستزيد قيم N_f و N_r . يحدث التخدد عند CBR بقيمة ٣٪، ٥٪ إلى ٧٪ مع التحميل الزائد بنسبة ٧٥٪ و ١٠٠٪ بينما يحدث تشقق الإنهاك عند CBR بقيمة ٣٪، ٥٪ إلى ٩٪ مع التحميل الزائد بنسبة ٥٠٪ و ٧٥٪ و ١٠٠٪ [9].

٢. عرض المشكلة:

أن أغلب مقاطع الطرق الإسفلتية لشبكة الطرق في العراق تعاني من الانهيار المبكر للرصف المرن والذي يعد إحدى أكبر المشاكل في الطرق العراقية. كما وتحدث هذه المشكلة في الغالب بسبب التحميل الزائد لأحمال محاور الشاحنات في ظل غياب الرقابة على أوزان المحاور وعدم تفعيل محطات الوزن على الشاحنات على الحدود



على السطح. تفترض النماذج المرنة ذات الطبقات أن كل طبقة هيكلية للرصيف متجانسة ومتماثلة ومرنة خطياً، وقد اعتبرت الانفعالات الناتجة عن الإنهاك والتخدد أكثر أهمية لتصميم رصف الإسفلت. أحدهما هو انفعال الشد الأفقي (Et) في الجزء السفلي من الطبقة الإسفلتية والذي يتسبب في حدوث الإنهاك، والآخر هو انفعال الضغط العمودي (Ec) على سطح الطبقة السفلية مما يتسبب في حدوث تشوه دائم أو تخدد [9].

نموذج الإنهاك في الرصف المرن (Fatigue Cracking Models):

تم استخدام مفهوم الضرر التراكمي على نطاق واسع للتنبؤ بالإنهاك في الرصف المرن. من المتوقع عليه عموماً أن العدد المسموح به من تكرار الحمل مرتبط بإجهاد الشد في أسفل طبقة الإسفلت. يتم التعبير عن مقدار الضرر كضرر النسبة، وهي النسبة بين العدد المتوقع والمسموح به لتكرار الحمل. يحدث الضرر عندما يصل مجموع نسبة الضرر إلى واحد، يمكن حساب العدد المسموح به من تكرار الحمل باستخدام المعادلة (1) [12].

$$Nf = f1 (Et) - f2 (E1) - f3 \dots \dots \dots (1)$$

حيث أن:

Nf: العدد المسموح به لتكرار الأحمال لمنع فشل الإنهاك (fatigue failure)

Et: انفعال الشد في أسفل طبقة الإسفلت

E1: معامل المرونة لطبقة الإسفلت.

f1, f2, f3 هي ثوابت تم تحديدها من اختبارات الإجهاد المختبرية، مع تعديل f1 لتتوافق مع ملاحظات الأداء الميداني. استخدم معهد الأسفلت الأمريكي Asphalt Institute القيم (0.854, 3.291, 0.0796) لكل من f1 و f2 و f3 على التوالي في إجراءات التصميم القائمة على التحليل [13].

نموذج التخدد في الرصف المرن (Rutting Models):

تستخدم نماذج التخدد للحد من انفعال الضغط العمودي في الجزء العلوي من الطبقة السفلية وتستخدم على نطاق واسع. يرتبط العدد المسموح به من تكرار الحمل (Nr) للحد من التخدد بانفعال الضغط العمودي (Ec) أعلى الطبقة السفلية باستخدام المعادلة (2) [12].

$$Nr = f4 (Ec) - f5 \dots \dots \dots (2)$$

حيث أن:

Nr: العدد المسموح به لتكرار الأحمال لمنع فشل التخدد (rutting failure)

Ec: انفعال الضغط في أعلى الطبقة السفلية (subgrade).

f4 و f5 ثوابت تم تحديدها من اختبارات الطريق أو الأداء الميداني. تم اقتراح قيمها من قبل معهد الأسفلت الأمريكي Asphalt Institute بقيم (9-10*1.365 و 4.477) لكل من f4 و f5 على التوالي [13].

في عام 1943 أولاً حلاً لنظام من طبقتين ثم وسعها إلى نظام ثلاثي الطبقات في عام 1945، ومع ظهور أجهزة الكمبيوتر، يمكن تطبيق النظرية على نظام متعدد الطبقات بأي عدد من الطبقات. تم وضع الافتراضات التالية أثناء استخدام نظام الطبقات [3]:

1. جميع الطبقات في نظام الرصف متجانسة الخواص، مرنة خطياً مع معامل المرونة ونسبة بواسون.
2. المواد عديمة الوزن ولانهائية.
3. كل الطبقات لها سمك محدد مع سمك لانهائي للطبقة السفلى.
4. يتم تطبيق ضغط موحد على سطح النظام ذي الطبقات على مساحة دائرية بنصف قطر.
5. أخيراً، يتم استيفاء شروط الاستمرارية في واجهات الطبقة (interface)، ويُشار إلى ذلك من خلال نفس الأجهادات الرأسية، وإجهاد القص، والإزاحة الرأسية، والإزاحة الشعاعية، وبالنسبة للواجهة عديمة الاحتكاك، يتم استبدال استمرارية إجهادات القص والإزاحة الشعاعية بقص صفري الضغط على كل جانب من جوانب الواجهة

4. أنواع الانفعال في أنظمة الطبقات:

هناك انفعالان رئيسيان في أنظمة الطبقات من الرصف المرن على النحو التالي:

انفعال الضغط (Compressive Strain):

يعد الأجهاد العمودي (أجهاد الضغط) على الجزء العلوي من الطبقة السفلى عاملاً مهماً في تصميم الرصف. تتمثل وظيفة الرصف في تقليل الإجهاد الرأسي على الطبقة السفلى بحيث لا تحدث تشوهات ضارة للرصيف. يعتمد الإجهاد الرأسي المسموح به على طبقة سفلية معينة على قوة أو معامل الطبقة السفلية. للجمع بين تأثير الإجهاد والمقاومة، تم استخدام انفعال الضغط العمودي بشكل متكرر كمعيار تصميمي [5].

انفعال الشد (Tensile Strain):

تم استخدام انفعال الشد في الجزء السفلي من طبقة الإسفلت كمعيار تصميم لمنع حدوث الإنهاك، وهناك نوعين من الانفعالات الرئيسية التي تؤخذ بنظر الاعتبار. أحدهما هو الانفعالات الرئيسية الكلية التي تعتمد على جميع المكونات للإجهادات العادية وإجهادات القص. بينما الآخر وهو الأكثر شيوعاً والذي تم استخدامه في برنامج KENLAYER هو الانفعالات الرئيسية الأفقية بناءً على الإجهادات الأفقية والقص فقط [5].

النماذج التدميرية للرصيف (Distress Models):

يمكن استخدام النماذج التدميرية للتنبؤ بعمر الرصف الجديد. حيث يمكن للنموذج المرن ذو الطبقات أن يحسب الإجهادات والانفعالات والتشوهات في أي نقطة في بنية الرصف الناتجة عن تطبيق الحمل

٤. توسط الى مركز التباعد بين عجلتين لمحورين مختلفين (XW) X، تم اخذ هذه المسافة بقيمة (١٥٠سم) [١٧].

من المهم تحديد منطقة التلامس بحيث يمكن افتراض أن الحمل المحوري موزع بشكل موحد في هذه الدراسة. كما يجب مراعاة العجلات الموجودة على جانب واحد فقط (مسار العجلة الخارجية) ويفترض أن يكون لكل إطار منطقة تلامس دائرية [١٨].

أن هذا البرنامج يمكن استخدامه لتحليل وتصميم كل من الرصف الصلب والرصف المرن [١٠]، يتكون البرنامج من جزئين أساسيين هما KENSLAB و KENLAYER، يستخدم جزء KENSLAB هذا البرنامج لتحليل وتصميم الرصف الصلب بينما يستخدم جزء KENLAYER لتحليل وتصميم الرصف المرن. يمكن من خلال هذا البرنامج إيجاد كل من الاجهادات والانفعالات والتشوهات في الرصف الأسفلتي وكما يستخدم أيضا في حساب التخذد وفشل الانهالك. يعتمد في الحسابات على نماذج أو صيغ تصميم معهد الإسفلت الأميركي [13]، حيث يتم فحص مقاومة التخذد عن طريق حساب إجهاد الضغط الرأسي vertical compressive strain في الجزء العلوي من طبقة التربة subgrade layer، بينما يتم فحص مقاومة فشل الإنهالك عن طريق حساب انفعال الشد الأفقي horizontal tensile strain في الجزء السفلي من الطبقة الإسفلتية. ان برنامج KENLAYER مصمم للعمل في نظام مرن متعدد الطبقات تحت منطقة تحميل دائرية [١٩]، كما يمكن لهذا البرنامج أن يحل خواص المواد المرنة الخطية وغير الخطية والمرنة اللزجة ويقوم بتقييم عمر تصميم الرصف عن طريق إجراء تحليل الأضرار damage analysis والأضرار الناجمة عن الإنهالك والتخذد [٢٠].

ان نسبة الضرر هي النسبة بين عدد التكرار المتوقع والمسموح به ويحدث الفشل عندما يصل مجموع نسبة الضرر الى واحد. يتم حسابها لكل مجموعة تحميل في كل فترة ويتم تجميعها على مدار العام باستخدام المعادلة (٣) [٢]:

$$D_r = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \frac{n_{i,j}}{N_{i,j}} \dots \dots \dots (3) \text{ حيث ان}$$

Dr: نسبة الضرر المتوقع في نهاية السنة

ni,j: العدد المتوقع لتكرار الحمل iأ في الحمل

Ni,j: العدد المسموح به لتكرار الحمل iأ في الحمل

P: عدد الفترات في كل عام

m: عدد مجاميع التحميل.

يتم حساب العمر التصميمي من خلال المعادلة (٤). ويتم حسابه للتشقق الناتج عن الانهالك والتشوه الدائم ويكون العمر التصميمي الاقصر هو المتحكم [٢].

$$Design\ life = \frac{l}{D_r} \dots \dots \dots (4)$$

٥. النتائج ومناقشتها:

طريقة تحليل البيانات:

ان طريقة تحليل البيانات المستخدمة ضمن البرنامج هي الطريقة الميكانيكية-التجريبية. يتم تقييم البيانات الثانوية في عدة سيناريوهات لتحليل هذه البيانات نتيجة للتباين في التحميل الزائد وخصائص المواد لتحديد أداء الرصف والعمر التصميمي. تم استخدام برنامج KENLAYER لتحليل النماذج التدميرية على طبقة الرصف المرنة. يتكون مدخل التحليل من معلمتين رئيسيتين: تحميل حركة المرور وخصائص المواد، والتي تم تحديدها في برنامج KENLAYER باستخدام القائمة LAYERINP. تم إجراء تحليل الضرر الناتج عن الإنهالك والتخذد، كما تم استخدام نتائج التحليل لحساب نسبة الضرر والعمر التصميمي للتبليط وقد تم إجراؤه في فترة واحدة فقط، حيث يُفترض أن تكون البيئة ثابتة [2]. أن الخصائص الرئيسية للمواد تعتمد على العوامل الرئيسية في التحليل بالطريقة الميكانيكية-التجريبية تم اعتماد مقطع الطريق السريع رقم ١- في العراق في عملية التحليل. الجدول (١) يبين سمك وخصائص الطبقات المتمثلة بمعامل المرونة ونسبة بواسون المستخدمة في التحليل [14] [15] [3]. يؤثر تكوين الحمل على توزيع الجهد والإجهاد والتشوه داخل الرصف المرن. تم الاعتماد على بيانات الحجم المروري للطرق الرئيسية المؤدية لمدينة الموصل من مشروع الخطة الرئيسية للنقل العراقي (Iraqi Transport Master Plan, ITMP) [١٦]. حيث كان اجمالي عدد مرات تكرار التحميل وكما يلي:

المحاور الاحادية باطار منفرد: ٦٠٣٥

المحاور الاحادية باطار مزدوج: ١٥٠٨٥

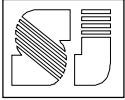
المحاور الترادفية: ٣٠١٧

كما ان عناصر المعلومات المدخلة في البرنامج ضمن هذه الدراسة في LAYERINP هي:

١. نصف قطر التلامس لمنطقة التحميل الدائرية (CR=12.7 cm) [3].

٢. ضغط التلامس على منطقة التحميل الدائرية (CP)، تم أخذها للمحور الأحادي بالنسبة للحمل القياسي ١٠٠٪ بقيمة (٦٧٧ KPa) أما بالنسبة للمحور الأحادي ذو الإطارات المزدوجة بقيمة (628 KPa) والمحور الترادفي بقيمة (484 KPa) وتتغير هذه القيم عند الزيادة أو النقصان في نسب التحميل [6].

٣. توسط إلى مركز التباعد بين عجلتين مزدوجتين على طول المحور Y (YW)، تم أخذ هذه المسافة بالنسبة للمحور الأحادي (0) وبالنسبة للمحور الأحادي ذو الإطارات المزدوجة وكذلك المحور الترادفي بقيمة (٣٠ سم) [3].

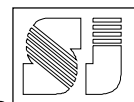


الخصائص وقيم معامل الرجوعية (resilient modulus, Mr) للطبقتين متقاربة وكذلك اعتبار الطبقتين مرتبطتين مع بعضهما (interface bonded). كما يلاحظ أن قيم الانفعال للطبقات الإسفلتية سالبة أي انفعال شد أسفل الطبقة الإسفلتية، بينما الانفعال لطبقة ما تحت الأساس والأرض الطبيعية موجبة أي انفعال ضغط أعلى الطبقة الترابية. أعلى قيم انفعال الشد كان أسفل طبقة الأساس الإسفلتي وهذا يتوافق مع ماتوصل اليه (Abdel-Motaleb,) (2007) [21] ، حيث كانت للمحور الأحادي بقيمة ($10 \cdot 1.5$ -4) عند المحور القياسي وازدادت هذه القيمة بنسبة (51%) و (6.86%) للمحاور الأحادية ذات الإطارات المزوجة والمحاور الترادفية على التوالي. بينما لوحظ أن أعلى قيم انفعال الضغط كان في أعلى طبقة ما تحت الأساس للمحور الأحادي ذات الإطارات المزوجة بقيمة ($10 \cdot 4.761$) عند المحور القياسي بينما قلت هذه القيم بنسبة (25.1%) و (20.8%) للمحاور الأحادية والترادفية على التوالي. كما لوحظ زيادة في قيم الانفعال عند زيادة نسب التحميل.

تم دراسة علاقة التشوه مع عمق طبقات التبليل للمحاور الأحادية وأحادية المحور ذو الإطارات المزوجة والمحاور الترادفية مع حالات التحميل وكانت النتائج كما موضحة في الشكل (4). يلاحظ من الأشكال ان معظم التشوه يحدث في طبقة الأرض الطبيعية يليها طبقة ما تحت الأساس أي الطبقات الترابية حيث يلاحظ ان قيمة التشوه على الطبقة السطحية للمحور الترادفي كانت بمقدار (0.08998cm) عند الحمل القياسي، في حين تقل قيمة التشوه السطحي بنسبة (46%) و (8.7%) للمحاور الأحادية والاحادية ذات الإطارات المزوجة على التوالي، وأن (84%) من هذا التشوه كان في طبقة الأرض الطبيعية. الشكل (5) يوضح علاقة قيمة الضرر مع طبقات التبليل وحالات التحميل. من خلال الشكل يلاحظ أن أعلى قيمة للضرر تكمن في طبقة الأساس الإسفلتي يليها طبقة ما تحت الأساس. كما يلاحظ أيضا أن قيمة الضرر في طبقة الأساس كانت بمقدار (0.04426) عند الحمل القياسي وتقل هذه القيمة بنسبة (60.1%) و (90.4%) و (100%) (لطبقات ما تحت الأساس والرابطة والأرض الطبيعية على التوالي. ولتحسين مقطع هذا التبليل ينبغي تحسين مواصفات مواد طبقة الأساس الإسفلتي وماتحت الأساس او زيادة سمكها لتقليل قيمة الضرر في هاتين الطبقتين.

علاقة أعلى قيمة للضرر مع حالات التحميل موضحة في الشكل (6). حيث يلاحظ من الشكل أن أعلى قيمة للضرر تزداد بزيادة الأحمال، وان أعلى قيمة للضرر كانت بقيمة (0.04426) عند الحمل القياسي كما تزداد القيمة بنسبة (255.2%) و (801.2%) عند زيادة نسبة التحميل الي 150% و 200% على التوالي، بينما تقل النسبة بمقدار (81.8%) عند تقليل نسبة التحميل الي 50%.

تم تمثيل المخرجات باستخدام برنامج KENPAVE، حيث تم استخدام نموذج معهد الإسفلت الأمريكي [12] لكل من الإنهاك والتخدد في التنبؤ بأداء الرصف الإسفلتي. كانت المخرجات التي تم حسابها من خلال البرنامج هي انفعال الشد الأفقي في الجزء السفلي من طبقة الإسفلت والذي سيعطي قيمة حرجة تتسبب في الإنهاك، وانفعال الضغط الرأسي في الجزء العلوي من الطبقة السفلية والذي يعطي قيمة حرجة تتسبب في التخدد. تم تحليل جميع خصائص الإجهاد والانفعال والتشوه لجميع الطبقات والحفاظ على نفس السمك وخصائص المواد مع تغيير في أحمال المحاور حيث تم فرض أربعة حالات تحميل والتي تمثل 50%، 100%، 150%، 200% من أوزان المحاور القياسية حسب المواصفة العراقية [15]. فيما اعتبرت المحاور على أنها أحادية المحور وأحادية المحور ذو إطارات مزوجة ومحور ترادفي [16] وباستخدام برنامج KENPAVE كانت نتائج التحليل كالتالي: الشكل (2) يوضح علاقة الجهد العمودي مع طبقات التبليل للمحاور الأحادية وأحادية المحور ذو الإطارات المزوجة والمحاور الترادفية مع حالات التحميل و قد تم اعتبار حمل المحور الأحادي من نوع المحور القياسي والذي هو محور كابينة السائق على اعتبار أن هذا المحور لا يتأثر بزيادة أو نقصان أحمال المركبات. يلاحظ من الشكل ان الجهد العمودي على الطبقات يقل مع العمق حيث أن الجهد العمودي في المحور الأحادي على الطبقة السطحية كان (639.753 KPa) وكانت نسبة النقصان في الجهد العمودي مقارنة بالطبقة السطحية وعلى الطبقة الرابطة والأساس وأعلى ما تحت الأساس والأرض الطبيعية هي (42.3%) و (95%) و (95%) على التوالي. يلاحظ أن قيم طبقة الأساس وما تحت الأساس متساوية ويعود السبب في ذلك الى أن قيم طبقة أسفل الأساس هي نفس قيم أعلى طبقة ما تحت الأساس. كما يلاحظ زيادة في الجهد العمودي عند زيادة احمال المحور ونقصانها في حالة نقصان أحمال المحور اذ أن الجهد العمودي للمحور الأحادي ذو الإطارات المزوجة على الطبقة السطحية كان بمقدار (593.641 Kpa) عند الحمل القياسي كما لوحظ زيادة هذه القيمة بنسبة (50%) و (100%) عند زيادة الحمل 150% و 200% على التوالي بينما لوحظ نقصان هذه القيم بنسبة (50%) عند 50% حمل. كما لوحظ أن أعلى قيم للجهد العمودي كان على المحور الأحادي على الرغم من ان وزن المحور اقل ويعود السبب في ذلك إلى أن تركيز الحمل على إطارين فقط. تم دراسة علاقة الانفعال مع طبقات التبليل للمحاور الأحادية وأحادية المحور ذو الإطارات المزوجة والمحاور الترادفية مع حالات التحميل وكما موضحة في الشكل (3). يلاحظ عدم ظهور قيم انفعال الشد للطبقة السطحية، يمكن تفسير ذلك بسبب اعتبار أن الطبقتين السطحية والرابطة في التحليل على أساس أنها طبقة واحدة وذلك لكون



الإسفلتي لزجة-مرنة والطبقات الحبيبية مرنة غير خطية ومقارنتها مع نتائج هذه الدراسة.

المصادر :

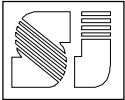
- [١] Rind, T. A., Jhatial, A. A., Sandhu, A. R., Bhatti, I. A., & Ahmed, S. (2019). Fatigue and Rutting Analysis of Asphaltic Pavement Using “KENLAYER” Software. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 9(2), 177–182. <https://doi.org/10.2478/jaes-2019-0024>.
- [٢] Samad, E. (2011). Sensitivity Analysis in Flexible Pavement Performance Using Mechanistic-Empirical Method. *Civil Engineering Forum*, Volume XX/1 - September 2011, 1189-1200.
- [٣] Huang, Y.H., (2012). *Pavement Analysis and Design*. 2nd Edition, New Jersey, Prentice-Hall.
- [٤] Mallick, R.B. (2013). *Pavement Engineering in Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1201/b14161>.
- [٥] Jasim, A.A. (2015). Effect of Pavement Layers Properties on Optimum Performance by Mechanistic-Empirical Method.
- [٦] Highway Design Manual, Ministry of Reconstruction & Housing, State Corporation for Roads & Bridges, Iraq. 2nd edition, 2005.
- [٧] Muniandy, R., & Aburkaba, E.E. (2013). Comparison of Flexible Pavement Performance Using Kenlayer and Chev PC Software Program. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, January, 112–119.
- [٨] Priyanka, B.A. (2015). Kenpave Analysis for Low Volume Roads with Reduced Resilient Modulus Values. 2nd Conference on Transportation Systems Engineering and Management, NIT Tiruchirappalli, India, p-140.
- [٩] Tajudin, A., Setyarini, N.L., & Darmawati, D. (2019). The Influence of CBR Value and Overloading on Flexible Pavement Mechanistic Response. 186 (Apte 2018), 67–72. <https://doi.org/10.2991/apte-18.2019.13>
- [١٠] Ameri, M., and Khavandi, A. (2009). Development of Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design in Iran. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 9, Issue 2, pp. 354–359. <https://doi.org/10.3923/jas.2009.354.359>.
- [١١] Usman, R.S., Setyawan, A., and Suprpto, M. (2018). Prediction of Pavement Remaining Service Life Based on Repetition of Load and Permanent Deformation. IOP Conference

علاقة عمر التبليط مع حالات التحميل موضحة في الشكل (7). يبين الشكل أن عمر التبليط يقل بزيادة الأحمال على المحاور. فعند الحمل القياسي فالعمر التصميمي للتبليط هو (22.59 سنة) حيث يقل العمر بنسبة (٣٠.٥) و (٩) أضعاف عند زيادة نسبة التحميل ١٥٠٪ و ٢٠٠٪ على التوالي. بينما يزداد العمر (٥.٥) ضعف عند نسبة التحميل ٥٠٪.

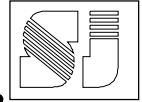
٦. الاستنتاجات والتوصيات:

تعتبر نتائج هذه الدراسة مهمة لمصمم ومنفذ الرصف للنظر في حساسية الاستجابة الميكانيكية للرصف المرن لتغيرات حركة المرور الزائدة وأحمال المحاور ووفق نتائج وتحليل هذه الدراسة تم استنتاج ما يلي:

يقل الجهد العمودي على طبقات التبليط مع العمق ويزداد بزيادة الأحمال المسلطة على التبليط. حيث أن أعلى قيم للجهد العمودي كان على المحور الأحادي في الطبقة السطحية حيث كانت قيمته (639.753 Kpa) عند الحمل القياسي. أن زيادة الأحمال سيزيد من الضغط الذي توزعه المركبة على الرصف بحيث يكون انفعال الضغط وانفعال الشد أعلى. كانت أعلى قيم انفعال الشد أسفل طبقة الأساس الإسفلتي حيث كانت للمحور الأحادي بقيمة $1.5*10^{-4}$ عند الحمل القياسي، وازدادت هذه القيمة للمحاور الأحادية ذات الإطارات المزدوجة والمحاور الترادفية. بينما أعلى قيم انفعال الضغط مسجلة كانت في أعلى طبقة ما تحت الأساس للمحور الأحادي ذات الإطارات المزدوجة بقيمة $(4.761*10^{-4})$ عند الحمل القياسي وقلت هذه القيم بالنسبة للمحاور الأحادية والترادفية. بزيادة الأحمال المسلطة على التبليط تزداد احتمالية حدوث التشوه في الرصف المرن وأن معظم التشوه حدث في طبقة الأرض الطبيعية يليها طبقة ما تحت الأساس حيث كانت قيمة التشوه في الطبقة السطحية للمحور الترادفي بمقدار (0.08998 cm) عند الحمل القياسي وأن (84%) من هذا التشوه كان في طبقة الأرض الطبيعية. بزيادة قيمة الأحمال تزداد قيم نسب الضرر على التبليط وإن أعلى قيمة للضرر ضمن الطبقات سجلت في طبقة الأساس الإسفلتي حيث كانت القيمة (0.04426) عند الحمل القياسي وتزداد هذه القيمة بنسبة (255.2%) و (801.2%) عند زيادة الحمل ١٥٠٪ و ٢٠٠٪ على التوالي. لذا فإن زيادة الأحمال يؤدي إلى التقليل من كفاءة أداء التبليط ويحتاج إلى صيانة مبكرة. كلما زادت الأحمال المسلطة على التبليط كلما قل العمر التصميمي للتبليط حيث وجد أن العمر التصميمي يقل بمقدار ٩ أضعاف عند زيادة الحمل إلى ضعف الحمل القياسي والذي يؤدي بدوره إلى تقليل كفاءة الرصف، وبالعكس فإن نقصان الأحمال يؤدي إلى زيادة العمر التصميمي للتبليط. توصي الدراسة بالقيام بأعمال التحليل باعتبار طبقات المزيج



- [^{١٨}] Islam, M.E., and Tarafder, R.A. (2020). Pavement Design: Materials, Analysis, and Highways, 1st edition. McGraw Hill Education. The United States.
- [^{١٩}] Chegenizadeh, A., Keramatikerman, M., and Nikraz, H. (2016). Flexible Pavement Modelling using Kenlayer. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(7), 2467–2479.
- [^{٢٠}] Rind, T.A., Memon, N. A., and Qureshi, A.S. (2017). Analysis and Design of Flexible Pavement using Empirical-Mechanistic based Software (KENPAVE). International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering, MUET, Pakistan, March, 120–125.
- [^{٢١}] Abdel. Motaleb (2007), "Flexible pavement components for optimum performance in rutting and fatigue", Zagazig University, Egypt.
- Series: Materials Science and Engineering, 333(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/333/1/012089>.
- [^{٢٢}] Gedafa, D.S., (2007). Performance Prediction and Maintenance of Flexible Pavement. Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, 16-17.
- [^{٢٣}] Asphalt Institute. (2004). Mix Design Method for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types. *Manual Series No. 2*.
- [^{٢٤}] Iraqi Expressway No. one, 1983, Consulting Engineers, Munich, W. Germany.
- [^{٢٥}] Standard Specification for Road & Bridges, Ministry of Housing & Construction, State Organization of Roads & Bridges, Iraq. Revised 2004.
- [^{٢٦}] ITMP. (2005). Iraqi Transport Master Plan: A joint project between the Iraqi Government and Italian Government.
- [^{٢٧}] Papagiannakis, A.T., and Masad, E.A., (2008). Pavement Design and Materials. John Wiley & Sons.



Prediction of Fatigue and Rutting Premature Distress in Linear layered Flexible Pavements for Different Loading Condition using the Mechanistic-Empirical Method

^{1,a} Noor Y. Younis

^{2,a} Asst. Prof. Amina A. Khli

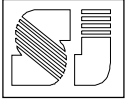
^{3,a,*} Prof. Dr. Ayman A. Abdulmawjoud

Civil Engineering Department, College of Engineering, University of Mosul

Abstract

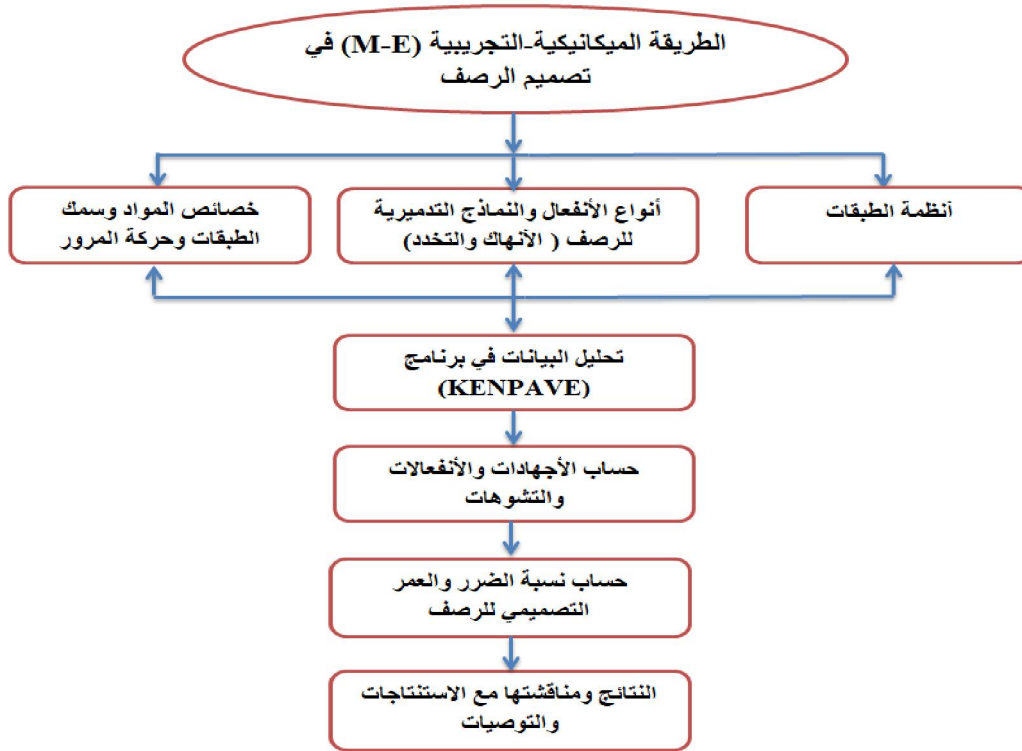
The research aims to study and analyze the damage to asphalt roads and load change based on (KENPAVE) program by evaluating the performance of flexible pavement using the Mechanistic-Empirical Method (M-E). A multi-layered structure for flexible pavement was assumed with load ratios of 50%, 100%, 150%, and 200% of the standard load according to Iraqi specifications. Depend on horizontal tensile strain at the bottom of asphalt layers to estimate the fatigue failure and on the vertical compressive strain above soil layers to estimate the rutting failure. Analysis of the results showed that the highest values of vertical stress were on the single axle in the wearing layer with a value of (639.753 KPa) for standard load, and the raising of load increased the pressure distributed by the vehicle to the pavement so that the tensile and compressive strain was higher. However, the lower tensile and compressive strain values increased both (N_f and N_r). The highest tensile strain values among the layers occurred at asphalt stabilized base coarse of the single axle of (-1.5×10^{-4}) for the standard load. While the highest compressive strain values exist at the top of the subbase layer of the single axle with dual tires of (4.761×10^{-4}) for the standard load. It was also observed that the increasing of axle loads produces an increase in the vertical displacement of the pavement, where the deformation value on the wearing layer of the tandem axle is (0.8998 mm) for standard load, and that (84%) of this deformation was in the subgrade layer. However, the highest value of damage ratio was existing at the asphalt stabilized base coarse with a value of (0.04426) at standard load. It was also found that the design life decreases by 9 times when increasing the load twice the standard load, which in turn reduces the paving efficiency.

Keywords: Flexible Pavement, Mechanistic-Empirical Method, KENPAVE, Fatigue, Rutting

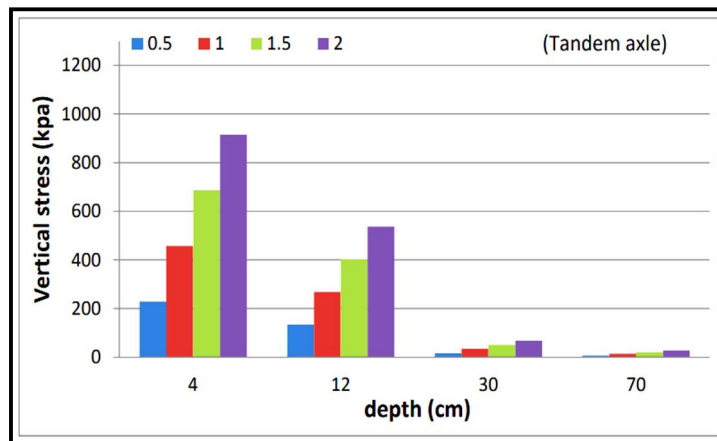
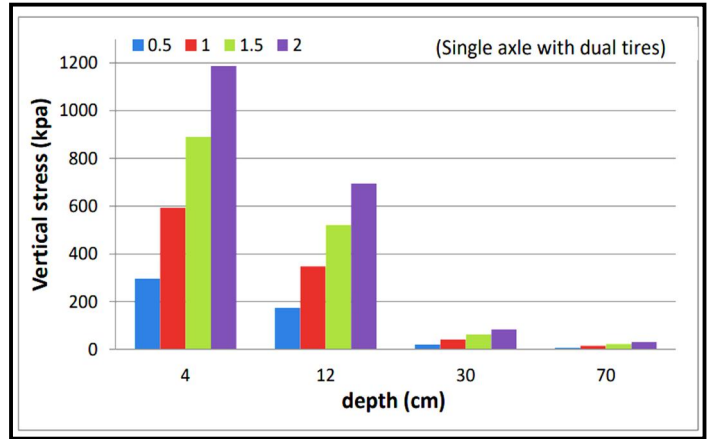
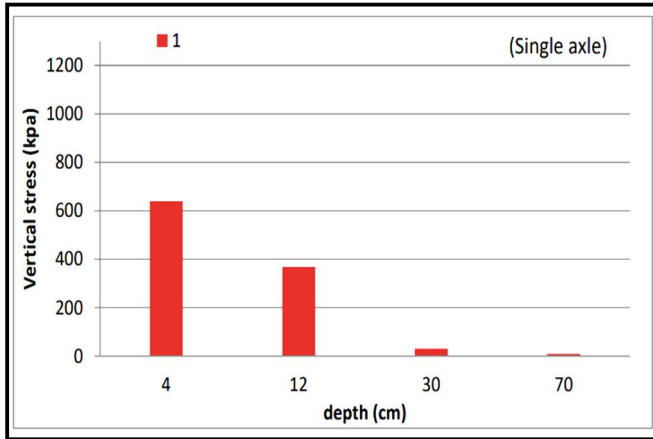
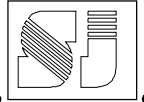


الجدول (١): سمك وخصائص الطبقات المستخدمة في التحليل

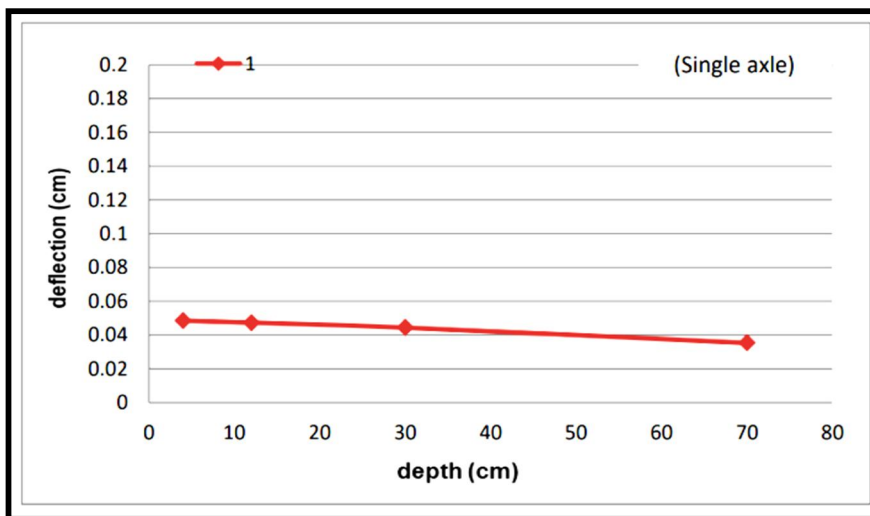
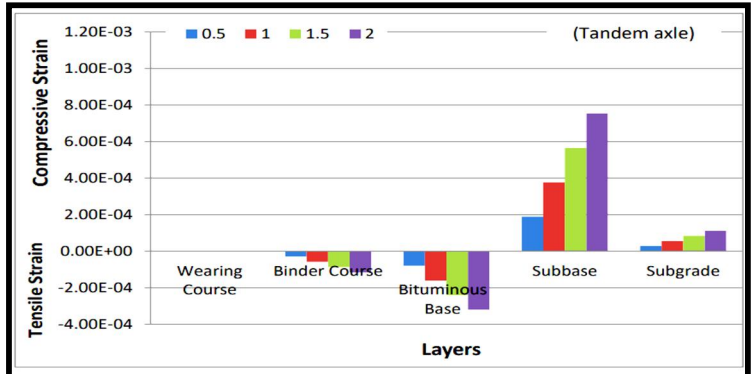
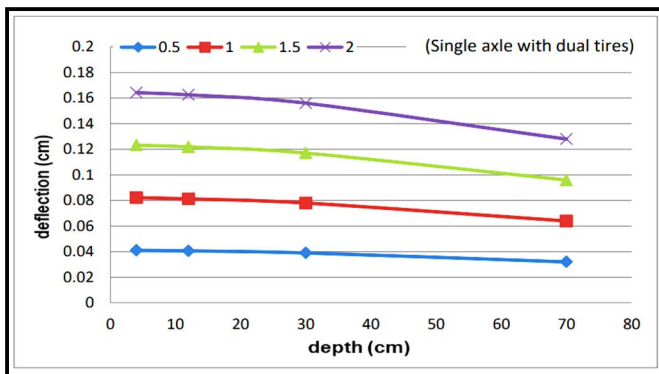
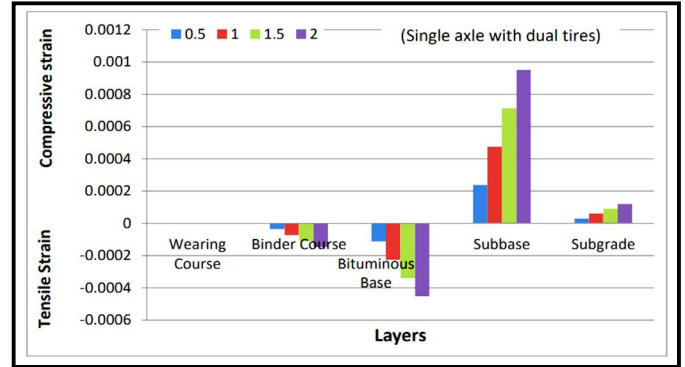
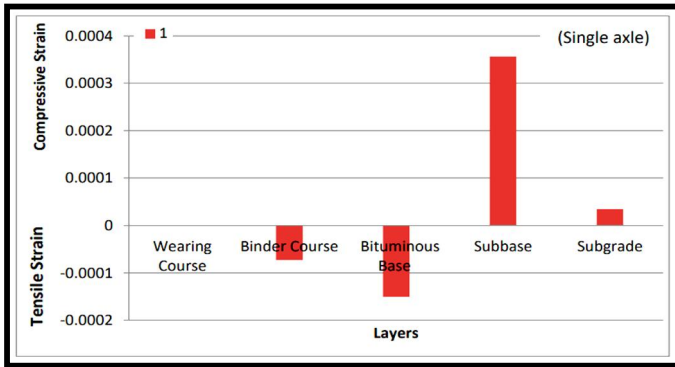
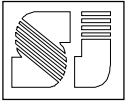
Poisson's Ratio	Modulus of Elasticity (Kpa)	Thickness (cm)	Layers
0.4	3000000	4	Wearing Course
0.4	2275000	8	Binder Course
0.35	1585700	18	Bituminous Base
0.35	99900	40	Subbase
0.45	38000	∞	Subgrade



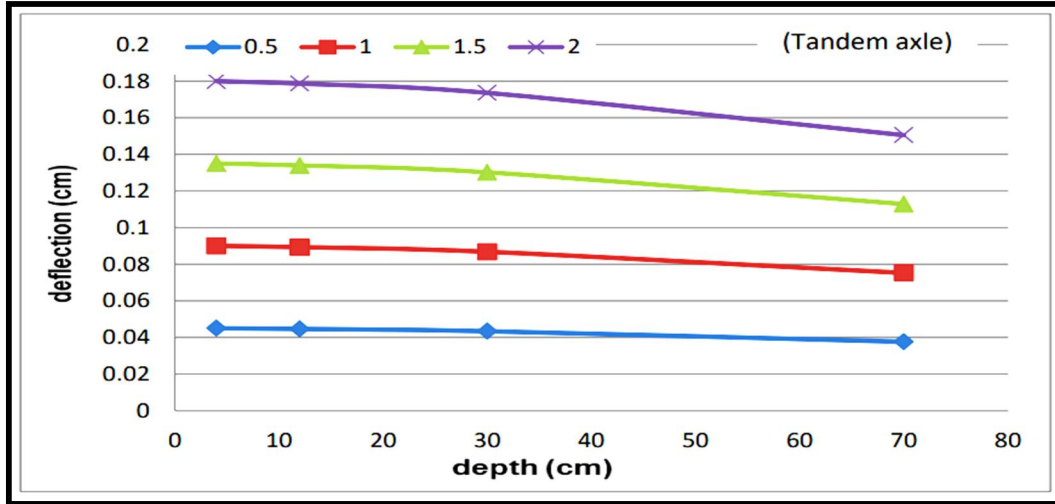
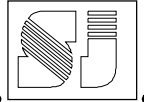
الشكل (١): الطريقة الميكانيكية-التجريبية في تصميم الرصف المستخدمة في البحث



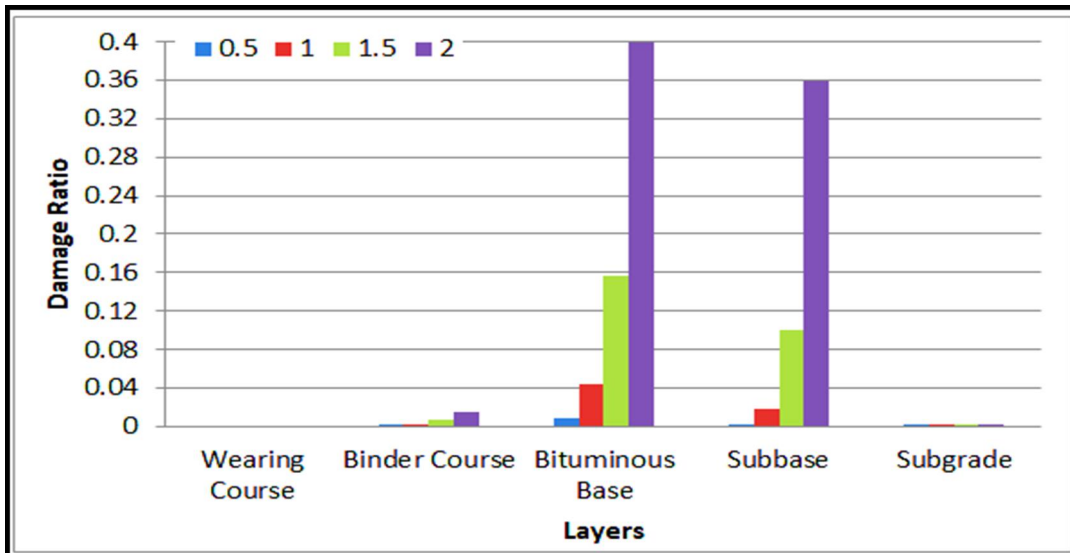
الشكل (٢): علاقة الجهد العمودي مع طبقات التبليط ومحاور التحميل



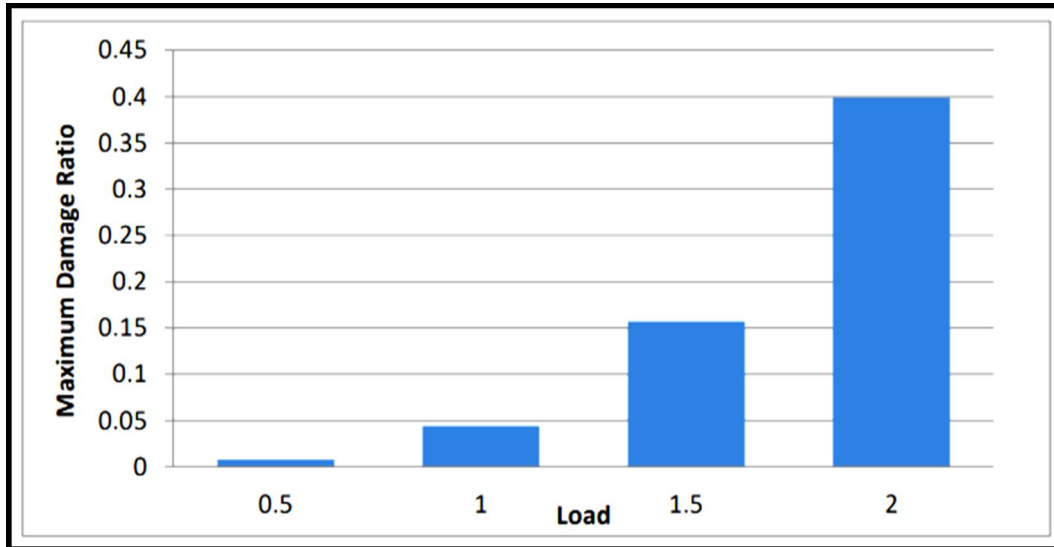
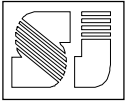
الشكل (3): علاقة الانفعال مع طبقات التبليط ومحاور التحميل



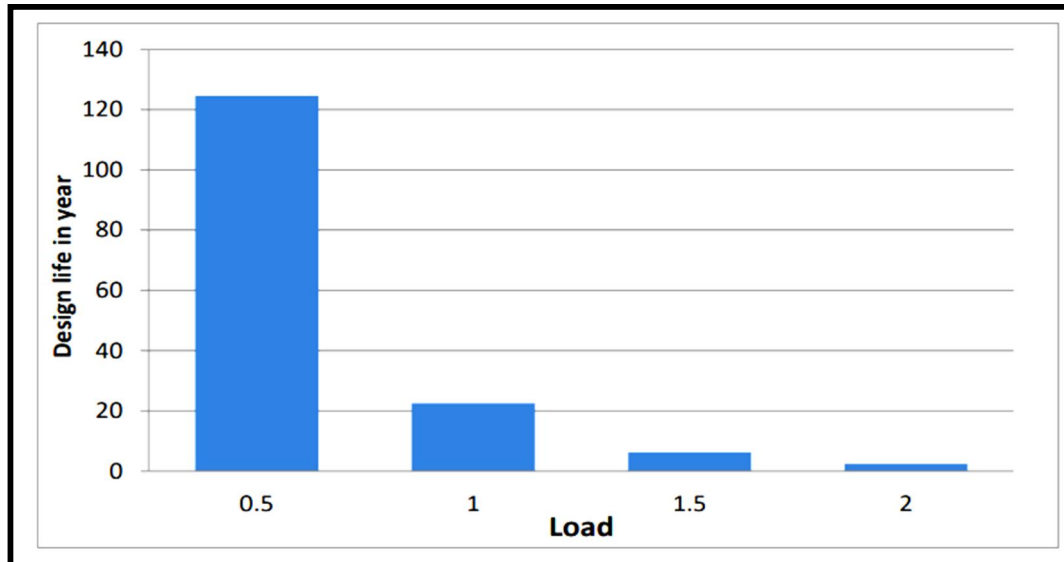
الشكل (4): علاقة التشوه مع عمق طبقات التبليط ومحاور التحميل



الشكل (5): علاقة قيمة الضرر مع طبقات التبليط وحالات التحميل



الشكل (6): علاقة أعلى قيمة للضرر مع حالات التحميل



الشكل (7): علاقة عمر التبليط مع الأحمال