

التحليل المرن الخطي للأغطية الإسفلتية المقواة بشبكات تسليح معدنية

المهندسة ندى شحود (1)

المشرف : أ.د.م محمد هاجم الوادي (2)

المشرف المشارك : د.م محمد فواز مسوتي (3)

الملخص

يتطلب تصميم وبناء الرصف المرن المستدام للطرق فهماً شاملاً لسلوك المواد المختلفة والتفاعل بينها (أي الإسفلت، طبقة الأساس، الطابق الترابي). إن السماكات التصميمية لطبقات الرصف المترافقة مع زيادة في الحمولات المحورية، كما هو الحال في مناطق مختلفة من سوريا تكون كبيرة مما يؤدي إلى زيادة تكاليف الإنشاء كما يؤدي إلى ظهور عيوب في الرصف الطرقي. تم في هذا البحث التحليل المرن الخطي لطبقات الرصف الإسفلتي المرن باستخدام برنامج KENPAVE لبيان تأثير استخدام شبكات التسليح المعدنية لمقاومة تشوهات الشد ولممانعة انتشار التشققات القادمة من طبقة الأساس الحصوية باتجاه الأعلى. بينت نتائج التحليل المرن الخطي أن إضافة التسليح بشبك معدني أسفل طبقة المجدول الإسفلتي أدى إلى تحسن في قيمة التشوه في الاتجاه الأفقي أسفل طبقة المجدول الإسفلتي بنسبة 11% والذي يعبر عن معيار التعب كما أدى إلى زيادة عدد الحمولات التكرارية بنسبة 48%.

الكلمات المفتاحية: الرصف المرن، التحليل المرن الخطي، شبكات التسليح المعدنية، برنامج KENPAVE

(1) طالبة دكتوراه في قسم هندسة النقل ومواد البناء - كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق

(2) أستاذ في قسم هندسة النقل ومواد البناء - كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق

(3) مدرس في قسم هندسة النقل ومواد البناء - كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق

Linear elastic analysis for asphaltic pavement enhanced with steel mesh

⁽¹⁾Eng. Nada Shahoud

⁽²⁾Adviser: Prof. Dr, Eng. Mhd Hajem Alwadi

⁽³⁾Co-Adviser: Mhd. Fawaz Msoti

Abstract

The design and construction of sustainable flexible pavement require a comprehensive understanding of the behavior of different materials and the interaction between them (i.e. asphalt, base layer, subgrade). The design thicknesses of the layers associated with an increase in axial loads, as it is the case in different regions of Syria, are large, which leads to an increase in construction costs and leads to defects in road paving. In this research, linear elastic analysis of asphalt layers was done to demonstrate the effect of reinforcing with metal mesh to resist tensile deformations and to prevent cracks that coming upward from the granular base layer.

The results of the linear elastic analysis showed that adding reinforcement with a metal mesh led to an improvement in the strain value in the horizontal direction below the asphalt layer, which expresses the fatigue criterion by 11% and increased the number of repetitive loads by 48%.

Key words: flexible pavement, linear elastic analysis, metal mesh reinforcement, software KENPAVE

⁽¹⁾PhD student in the Department of Transportation and Building Materials Engineering - Faculty of Civil Engineering, University of Damascus

⁽²⁾Professor in the Department of Transportation and Building Materials Engineering - Faculty of Civil Engineering, University of Damascus

⁽³⁾Lecturer in the Department of Transport Engineering and Building Materials - Faculty of Civil Engineering, University of Damascus

1- مقدمة

يتطلب تصميم وبناء الرصف المرن المستدام للطرق فهماً شاملاً لسلوك المواد المختلفة والتفاعل بينها (أي الإسفلت، طبقة الأساس، الطابق الترابي). تتكون الأغشية المرنة عادة من طبقة سطحية من الخرسانة الإسفلتية توضع على طبقة أساس حصوية . تنتقل الحمولات المرورية عبر الحصويات الداخلة في تركيب طبقات الغطاء من خلال التشابك بين الحصويات وتأثير الاحتكاك بينها والتماسك الذي تنتجه المواد الناعمة.

أما أهمية الرصف فتتمثل في نقل الأحمال الناتجة من حركة المرور على سطح الطريق إلى طبقات الرصف المختلفة حتى يصل تأثيرها إلى طبقة التربة التي يتوقف عليها مدى صلاحية الرصف وتحمله لهذه الأحمال أو الإجهادات وكلما زادت الأحمال المارة على الطريق كلما زاد سمك مادة الرصف والذي يتوقف بدوره على نوع تربة الأساس وقوة تحملها.

2- مشكلة البحث

إن السماكات التصميمية لطبقات الرصف المترافقة مع زيادة في الحمولات المحورية كما هو الحال في مناطق مختلفة من سوريا تكون كبيرة مما يؤدي إلى زيادة تكاليف الإنشاء كما أن ضعف مقاومة المجدول الإسفلتي لقوى الشد يؤدي إلى ظهور عيوب في الرصف الطرقي ويتطلب ذلك البحث عن حلول فنية مناسبة لتحسين أداءه.

3- هدف البحث

تم في هذا البحث دراسة التحليل المرن الخطي لطبقات الغطاء عند إضافة شبكات التسليح المعدنية في طبقة المجدول الإسفلتي لمقاومة تشوهات الشد ولممانعة انتشار التشققات القادمة من طبقة الأساس الحصوية باتجاه الأعلى.

4- الدراسات المرجعية

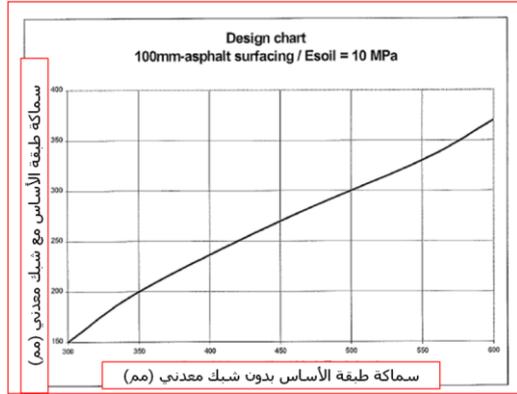
استخدم G. Narendra- 2016 شبكة تسليح معدنية سداسية. نفذت تجربة بمقياس كبير بأبعاد 1×1×1 م حيث تم وضع طبقة غطاء غير معبد وتعرضت لحمولة ستاتيكية باستخدام صفيحة دائرية بقطر 150 مم. بلغت درجة الرص للطابق الترابي 70%. نفذت التجربة على خمسة أنواع: عينة مرجعية بدون تسليح، ثلاثة عينات مسلحة بأنواع مختلفة من الجيوغريد، عينة مسلحة بشبك معدني. بينت النتائج تحسن معامل التحميل Load improvement factors (وهو نسبة قدرة التحمل مع وجود التقوية الى قدرة التحمل بدونها) من أجل التقوية بالشبك المعدني بمقدار 1,4 الى 1,9 ومن أجل التقوية بالجيوغريد بلغ 1,1 الى 1,7 [10]

قام E, Romeo 2012 بإجراء اختبار الغطاء الإسفلتي على الانعطاف لذلك استخدمت عينات موشورية (جوائز) بأبعاد 100×400 مم وبسماكة 60 مم على طبقتين الأولى

السطحية 20 مم والثانية طبقة الاهنراء 40 مم. كما حضرت بلاطات بنفس السماكة وعلى طبقتين وبأبعاد 500×500 مم. ابعاد الحصويات في الطبقة الأولى 4,5 مم وفي الثانية 12,5 مم. تم اضافة الشبك المعدني أسفل القالب وتم صب المجدول الإسفلتي فوقه. كما تم تحضير عينات مقواة بالألياف الزجاجية وعينات مرجعية غير مقواة. يبين الشكل (1) تأثير اضافة التسليح من أجل

العينات الموشورية. [19]

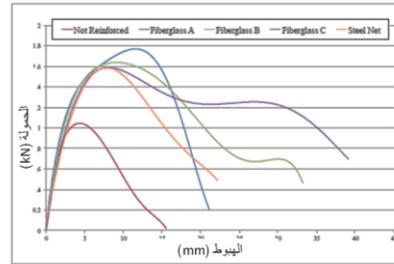
غطاء إسفلتي بسماكة 100 مم وترتبة ضعيفة (معامل مرونتها 10 ميغاباسكال) [14]



الشكل (2) مخطط سماكة طبقة الأساس مع وبدون شبك تقوية [14]

في البحث Elseifi, M. A. 2005 يتحرى الباحث عن اضافة شبك معدني الى طبقة المجبول الاسفلتي HMA في نظام جديد للرصف المرين. تم اضافة ثلاثة أنواع من الشبك المعدني لمقطعين من طريق لتقييم اداء الرصف المرين ومقاومته لشقوق التعب بالاضافة الى نمذجته بطريقة العناصر المحدودة FE وقد أضيفت شبكة التسليح ضمن الغطاء HMA وأسفله. كانت مساهمة الشبك المعدني مهمة جدا بعد بدء نشوء التشققات. [8]

تتحرى هذه الدراسة التي اجراها Mohamady A 2005- في تأثير استخدام الشبك المعدني على اداء الرصف الطريقي. باستخدام برنامج ADINA للعناصر المحددة. قام بهذه الدراسة باحثين من مصر. تم نمذجة ثلاثة مقاطع: المقطع الأول غطاء مستخدم في طريق محلي (A) والثاني لطريق سريع (B) والثالث لطريق حر (C) ووضع الشبك المعدني على أعماق مختلفة. بينت الدراسة أن العمق المكان الأنسب لوضع الشبك هو أسفل طبقة الاساس. كما بينت أن اداء الغطاء كان أفضل



الشكل (1) تأثير اضافة التسليح من أجل العينات المشورية على منحنى الحمولة- الهبوط [19]

درس Ibrahim, S. F. 2013 سلوك طبقات الغطاء الاسفلتي المقواة بشبك معدني حيث تم تحضير عينات مشورية (جوائز) وبلاطات واختبرت على الانعطاف. بينت النتائج ظهور تشققات متعددة أسفل الجوائز في العينات المقواة بالشبك المعدني بينما في الجوائز العادية ظهر شق وحيد. [12]

استخدم Coni, M. 2000 الباحث النمذجة الرقمية برنامج ANSYS® حيث استخدم أربعة نماذج مع وبدون وجود شقوق أولية ومع وبدون وجود شبكة تقوية معدنية. بينت النتائج وجود تناقص في التشوهات الشاقولية كما تناقصت بشكل كبير اجهادات الشد في قاعدة طبقة الأساس. [6]

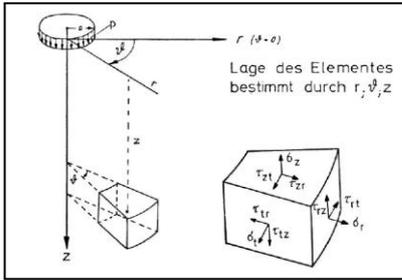
استخدم الباحثون Montepara et al 2005- النمذجة العددية ببرنامج ABAQUS 6.4 والتجارب المخبرية والحقلية. في التجارب المخبرية استخدم نوعان من العينات للغطاء أحدهما مسلح بشبك معدني والآخر بدون تسليح. [17]

يعالج البحث لذي اجراه Léonard, D. 2002- التصميم الانشائي للرصف المرين المقوى بالشبك المعدني. والهدف هو تقدير التحسن في مواد طبقة الأساس المستخدمة في هذا التصميم. يبين الشكل (2) مخطط سماكة طبقة الأساس مع وبدون شبك تقوية من أجل طبقة

الحمولات المطبقة الناتجة عن حركة المرور والتي تسبب التشققات والتشوهات الدائمة.

لقد أدى استخدام الحاسوب في إيجاد حلول لنظام الطبقات المتعددة وتم اقتران هذه الحلول مع التطورات الحديثة في تقييم المواد كل ذلك ساعد في الوصول إلى طرق متعددة في تصميم طبقات الرصف التي تستند كلياً أو جزئياً إلى التحليل النظري.

يتم حساب الاجهادات والتشوهات في نظام الطبقات المتعددة وفق نظرية نصف الفراغ المرن [1]. أول من استخدمها بوسينيسك [4] حيث فرض في البداية أن التحميل يكون في نقطة واحدة ثم طورت لاحقاً إلى حالة التحميل وفق قرص دائري وهو يوافق حالة الإطار المطاطي في المركبات. تعطى الاجهادات والهبوط بالعلاقات 1,2,3



الشكل (1) حساب الاجهادات وفق نظرية نصف الفراغ المرن

$$\begin{aligned} \sigma_z &= p[-1 + z^3/(a^2 + z^2)^{3/2}] \quad (1) \\ \sigma_r = \sigma_t &= \{- (1 + 2\mu) + 2z(1 + \mu)/\sqrt{(a^2 + z^2)} - [z/\sqrt{(a^2 + z^2)}]^3\}p/2 \quad (2) \\ w &= 2pa(1 - \mu^2)/E \quad (3) \end{aligned}$$

$\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$ الاجهادات, p ضغط إطار السيارة, z العمق, a نصف قطر التحميل, بواسون معامل μ , E معامل المرونة, w الهبوط تحت محور الحمولة يتم نمذجة الغطاء الإسفلتي وفق نظام الطبقات المتعددة (الشكل 2) حيث توضع طبقات الغطاء على الطابق الترابي الذي يدخل كطبقة مرنة ذات عمق غير منته. يتم توصيف كل طبقة بمعامل المرونة ونسبة بواسون

باستخدام الشبك المعدني منه في حالة الغطاء بشبك جيوصنعي. [16]

الهدف في البحث الذي اجراه P Zielinski - 2016 هو تقييم فعالية استخدام الشبك المعدني إلى الغطاء عند اعادة تأهيل الطرق. تم استعراض حالة الطريق قبل وبعد مرور 6-10 سنوات من إعادة التأهيل. استخدم جهاز قياس التشوهات بالحمل الساقط FWD قبل وبعد الصيانة. كما تم مقارنة التشوهات عند استخدام الشبك المعدني وكانت اصغر من التشوهات المحسوبة للغطاء بدون استخدام الشبك. لاسيما عندما تكون قدرة تحمل الطابق الترابي ضعيفة. [22]

قام Vanelstraete, A - 2000 باجراء دراسة في بلجيكا على ستة مواقع تعرضت لتخريب كبير والرصف هنا رصف صلب (بيتوني) حيث اضيفت طبقة غطاء اسفلتي فوقه بسماكة 70 مم ومسلحة بشبك معدني وبعد مرور 10 سنوات وجد أن الشقوق الانعكاسية فيها قد انخفضت وفي احدها بلغت نسبتها 1%. [20]

5- الأساس النظرية لتحليل الأغطية الطرقية

الإسفلتية

تعتمد الدراسة التحليلية للرصف المرن على اعتبار الطبقات المكونة له تخضع لنظام الطبقات المتعددة multilayered elastic system حيث تدخل كل طبقة من خلال خصائصها الفيزيائية مثل معامل المرونة modulus of elasticity أو معامل الرجوعية resilient modulus ونسبة بواسون Poisson ratio.

يعتمد تصميم طبقات الغطاء على معيار التشوه strain criteria الذي يحدد التشوه في الاتجاهين الأفقي والشاقولي بحيث لا يؤدي إلى ظهور تشققات أو تشوهات دائمة غير مسموحة. هذه المعايير تعبر عن تراكم تأثير تكرار

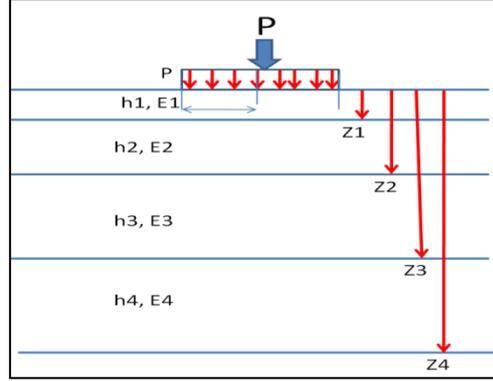
كنتاكي [11] وهو يمكن من حساب الاجهادات والتشوهات والهبوطات في طبقات الغطاء.

6- مواصفات طبقات الرصف المستخدم في التحليل المرن الخطي

نظرا لهدف البحث وهو بيان تأثير إضافة الشبك المعدني فقد تم اختيار رصف مرن بدون شبك معدني مكون من ثلاثة طبقات بالإضافة إلى الطابق الترابي. ورصف مرن مزود بشبك معدني. يتم وضع الشبك المعدني أسفل طبقة المجدول الإسفلتي. تدخل طبقة المجدول الإسفلتي كطبقة واحدة في الحالة الأولى وتدخل كطبقتين في الحالة الثانية بسماكة 8.75 سم بدون شبك أما الشبك المعدني مع طبقة الرصف الإسفلتي المحيطة به فيشكل طبقة رقيقة إضافية بسماكة تعادل قطر أكبر حصوية مستخدمة في الخلطة الإسفلتية (12.5 مم). تم تثبيت مواصفات بقية الطبقات من حيث السماكة ومعامل بواسون ومعامل المرونة. إن معامل المرونة المعتمد في التحليل هو معامل المرونة الرجوعي بالنسبة للمجدول الإسفلتي [11]. يمكن تقدير معامل المرونة لكل طبقة اعتمادا على معيار يمكن إيجاده من اختبارات مخبرية بسيطة وغير مكلفة وقابلة للتنفيذ في المخابر المحلية مثل اختبار مارشال أو اختبار CBR. ونجد في العديد من المراجع مخططات تبين العلاقة بين هذه المعايير مع معاملات المرونة [11,23]. الملحق [3]

تم تصميم الخلطة الإسفلتية في مخبر الطرق في كلية الهندسة المدنية بجامعة دمشق. الإسفلت المستخدم من منتجات مصفاة حمص له درجة غرز 93 مم. أما الحصويات فهي من مجبل محافظة دمشق في منطقة عدرا وتم إحضاره من مقلع الرحيبة وتدرجها الحبي مابين في الشكل (3). وهو مطابق للتدرج 3 لطبقة الأساس الإسفلتية

كما تعتبر الحمولة المطبقة على الغطاء أي حمولة إطار السيارة ذات شكل دائري والضغط منتظم.



الشكل (2) نظام الطبقات المتعددة

إن حساب الاجهادات والتشوهات والهبوطات في نظام ثلاثي الطبقة يتطلب وقتا كبيرا جدا من أجل كل نقطة حيث تستخدم المخططات [18] أو الجداول [13] للحساب بدلالة سماكات الطبقات ومعاملات المرونة ونسب بواسون لها. وعند اعتبار وجود أكثر من 3 طبقات أي 4 أو 5 طبقات فإن هذا يتطلب عملا إضافيا يكمن في دمج طبقتين في طبقة مكافئة بحيث يمكن تخفيض عدد الطبقات إلى 3 طبقات فقط وبعدها تبدأ الحسابات باعتبارها ثلاثي الطبقات. كما يساهم إضافة طبقة رقيقة بين طبقات الغطاء الإسفلتي من الشبكات المعدنية في زيادة تعقيد الحسابات.

تم تطوير العديد من البرامج للتعامل مع وجود طبقات متعددة. مثل BISR[3], KENPAVE[11], CIRCLY[5], EVERSTRESS[9], MePADS[15], WESLEA[21]. يسمح برنامج KENPAVE باعتبار سلوك الطبقات الحصوية على أنه سلوك مرن لاخطي كما يسمح بنمذجة طبقة الخرسانة الإسفلتية على أنها طبقة ذات سلوك مرن لزج ويصل عدد الطبقات إلى 19 طبقة. طور هذا البرنامج البروفسور يانغ هوانغ من جامعة

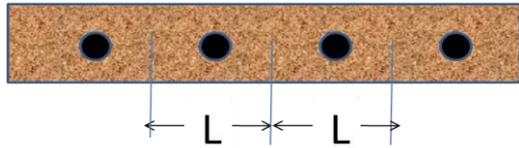
من الأسفل باتجاه الأعلى ولها معامل مرونة مكافئ يحسب وفق علاقة Nijboer الواردة في المرجع [6] (المعادلة 4). وستدخل هذه الطبقة بشكل منفصل عند التحليل المرن الخطي لطبقات الغطاء.

$$E_{eq} = E_b \left\{ \frac{[b^4 + 4b^3n + 6b^2n^2 + 4bn + n^2]}{[(b+n)(b+1)^3]} \right\} \dots (4)$$

$$n = E1/E2$$

$$b = h2/h1$$

حيث $E1, E2$ معاملي المرونة و $h1, h2$ السماكة لكل منهما. نظرا لأن الشبك المعدني لا يشكل طبقة مستمرة وإنما تظهر الأسلاك في المقطع العرضي بشكل دائري بتباعد 20 مم فيما بينها ويظهر ذلك من خلال معامل μ عند حساب n, b الواردة في المعادلة 4. (الشكل 5)



الشكل (5) مقطع عرضي توضيحي في الطبقة المختلطة المكونة من الشبك المعدني مع الخلطة الإسفلتية

$$\mu = \frac{\pi \frac{D^2}{4}}{L \cdot D} = 0.0785$$

D قطر السلك

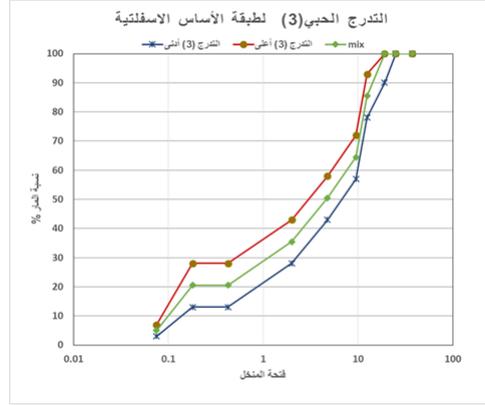
L التباعد بين الاسلاك

$$n = \frac{E1}{E2} = \frac{3Gpa}{200 * 0.0785} = 0.191$$

$$b = \frac{h2}{h1} = \frac{2}{12.5} = 0.16$$

وبتطبيق المعادلة السابقة نجد أن قيمة معامل المرونة المكافئ لهذه الطبقة يساوي 5,5 Gpa وفي التحليل اللاحق اعتمدت بقيمة مقدارها 5 Gpa.

حسب المواصفة السورية [24]. وقد اختير هذا التدرج لتحسين أداء هذا الرصف عند تعرضه لحمولات عالية. من أجل فعالية الشبك المعدني يجب أن يؤمن تماسكا جيدا مع الخرسانة الإسفلتية بحيث تسمح أبعاد الفتحة لمكونات الخرسانة الإسفلتية بالعبور بسهولة خلال الشبك. حضرت العينات بنسب اسفلت 6, 5.5, 5, 4.5 % (الملحق 3)



الشكل (3) التدرج الحبي للخصويات المستخدمة في الخلطة الإسفلتية (لمزيد من التفصيل يرجى مراجعة الملحق (3) أما الشبك المعدني فهو من الفولاذ المغلفن بفتحات ذات شكل سداسي مجدول وبقطر 2 مم. أبعاد الفتحة 20×20 مم ومعامل المرونة 200Gpa وهو متوفر في السوق المحلية على شكل بكرات بعرض 2 متر ووزن المتر الطولي منه 2.1 كغ/م (الشكل 4).



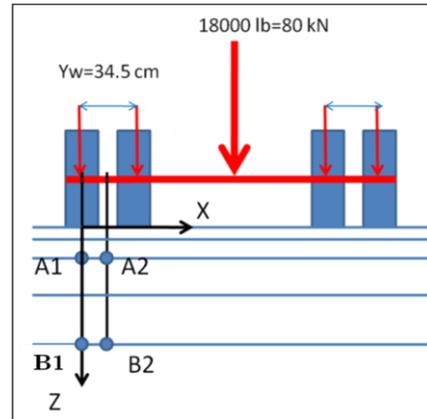
الشكل (4) الشبك المعدني المستخدم

تعمل الطبقة الرقيقة المشكّلة من الشبك المعدني مع طبقة الرصف الإسفلتي المحيطة به على مقاومة اجهادات الشد أسفل طبقة الأساس الإسفلتي ومنع انتشار التشققات

7- الحمولات

نعتبر أن الحمولات المحورية هي حمولة المحور القياسي المكافئ المعتمد في تصميم طبقات الرصف في طريقة AASHTO المبين في الشكل (6). حيث الحمولة المحورية (80kN) P تنتقل على سطح الطريق على شكل دائرة لها نصف قطره (a=11.4 cm) وهي موزعة بانتظام ويبلغ مقدار الضغط المطبق للاطار (p=485kpa).

يتم حساب الاجهادات والتشوهات في نقطتين الأولى تحت مركز دائرة التحميل (A1,B1) والثانية في منتصف المسافة بين الدولابين (A2,B2) وتعتبر النقطة الحرجة هي التي تكون عندها التشوهات الأكبر.



الشكل (6) الحمولة المحورية القياسية مع النقاط الحرجة على الانهيار

الجدول 1 : مواصفات الخلطة الإسفلتية المرجعية

النسبة	السيلان	VA%	VFA%	VMA%	الكثافة	نسبة الاسفت %
N	mm					
9000	4.25	3.36	77.18	14.64	2.43	5.5 %

الجدول (2) مواصفات طبقات الرصف المرن

معامل المرونة kpa	المعيار	نسبة بواسون (-)	السماكة (cm)	الطبقة
3000000	ثبات مارشال 9000 N	0.35	10 8.75*	المجبول الاسفلتي
5000000	المعادلة 4 لمرجع [6]	0.35	1.25	طبقة المجبول الاسفلتي المسلحة
300000	CBR=30**	0.35	20	الاساس الحصوية
100000	CBR=10**	0.4	30	ماتحت الاساس
50000	CBR=5**	0.45	∞	الطابق الترابي

* تؤخذ سماكة طبقة المجبول الاسفلتي مساوية 8.75 cm وتعتبر سماكة الطبقة المسلحة 1.25 cm
** [11] CBR=1500.Mr(psi)

8- التحليل المرن الخطي للأغطية الإسفلتية

تم التحليل لغطاء إسفلتي مكون من أربع طبقات في حالتين باستخدام برنامج KENPAVE. الأولى مرجعية بدون استخدام الشبك المعدني والثانية بوجود التسليح من الشبك المعدني. وتم حساب كل من الهبوط والإجهاد الشاقولي والإجهاد الأفقي والتشوه الشاقولي والتشوه الأفقي عند السطوح الفاصلة بين الطبقات وتحت محور دائرة التحميل وفي منتصف المسافة بينهما. يجدر التنويه انه في البرنامج تكون الإشارة السالبة في حالة الشد والإشارة الموجبة للضغط.

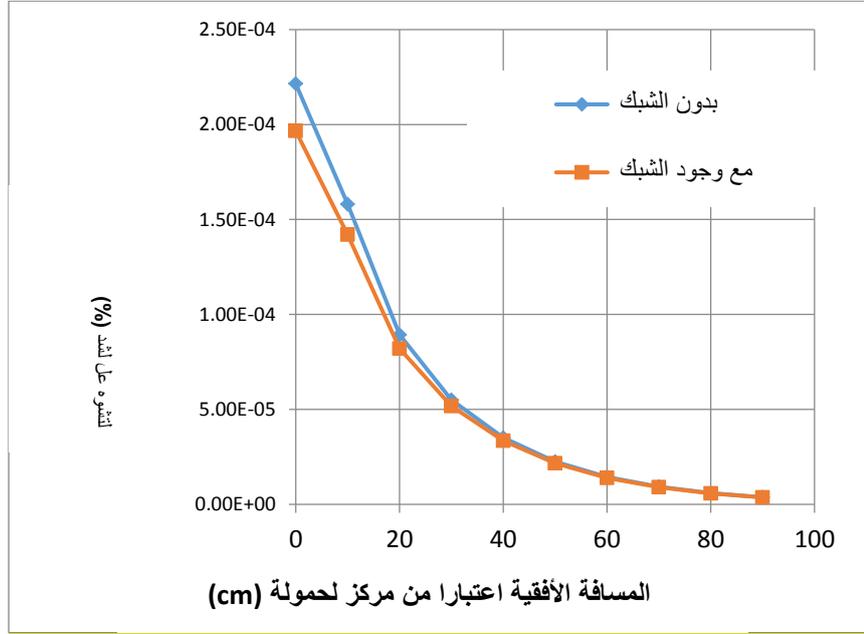
حسبت الاجهادات والتشوهات عند السطوح الفاصلة بين الطبقات بإضافة مقدار صغير 0.001 مم على المحور الشاقولي للتمييز بين الطبقتين المتجاورتين. ونجد في الملحقين (1, 2) نتائج الحسابات. لخصت النتائج في الجدول (3) وكما يبين هذا الجدول فان اضافة الشبك المعدني قد خفضت تشوه الشد الأفقي بمقدار 11% ولكن

الجدول (3): تأثير اضافة الشبك المعدني على

تشوهات الشد الأفقية وتشوهات الضغط الشاقولية

	No mesh	mesh	%
ϵ_t	2.22E-04	1.97E-04	-11%
ϵ_v	4.16E-04	4.13E-04	-1%

لم يكن لها تأثيرا يذكر بالنسبة لتشوهات الضغط الشاقولية ويفسر ذلك باعتبار أن وظيفة الشبك المعدني هي مقاومة اجهادات الشد وليس اجهادات الضغط الشاقولية. ويبين الشكل 7 تغير تشوه الشد بالاتجاه الافقي تحت محور الحمولة في اسفل طبقة الغطاء.



الشكل (7) تشوه الشد الافقي في اسفل طبقة الغطاء مع وبدون شبك معدني (Z=10) - التحليل على الانهيار

تعطى قيم الثوابت f_i في نظام الواحدات المترية والمعتمدة في طريقة معهد الإسفلت الأمريكي المبينة في الجدول (4) كما بين الجدول (5) نتائج الحساب بدون تسليح بالشبك المعدني وبوجود التسليح. أدى إضافة التسليح إلى زيادة عدد الحمولات وفق معيار التعب بنسبة 48%

الجدول (4) قيم الثوابت f_i في نظام الواحدات المترية

والمعتمدة في طريقة معهد الإسفلت الأمريكي [2]

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
0,41	3,29	0,85	1,365E-09	4,477
4	1	4		

الجدول (5) نتائج الحساب بدون تسليح بالشبك المعدني

وبوجود التسليح.

	ϵ_z	ϵ_t	Nf	Nr
No mesh	4.16E-04	2.22E-04	1.30E+06	1.87E+09
mesh	4.13E-04	1.97E-04	1.92E+06	1.93E+09
%	-1%	-11%	48%	3%

يحصل الانهيار نتيجة شقوق التعب أو التشوهات الدائمة (التخدد) في كل طبقة. يتم التحليل على الانهيار في النقاط الحرجة A1,A2 B1,B2 (الشكل 5). تعتبر النقطتين A1,A2 أسفل طبقة الغطاء الإسفلتي من أجل شقوق التعب ويكون المعيار هو التشوه الأفقي على الشد ϵ_t . أما النقطتين B1,B2 أعلى الطابق الترابي من أجل التخدد ويكون المعيار هو التشوه الشاقولي على الضغط ϵ_z . حسبت الحمولات الموافقة عند النقطتين الحرجتين وفقا

للمعادلتين (5) في طريقة معهد الإسفلت الأمريكي [2]

$$N_f = f_1 \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{f_2} \left(\frac{1}{\epsilon_{ac}}\right)^{f_3} \dots (5a)$$

$$N_r = f_4 \left(\frac{1}{\epsilon_z}\right)^{f_5} \dots (5b)$$

حيث Nf حمولات الانهيار على التعب ,

Nr حمولات الانهيار على التخدد

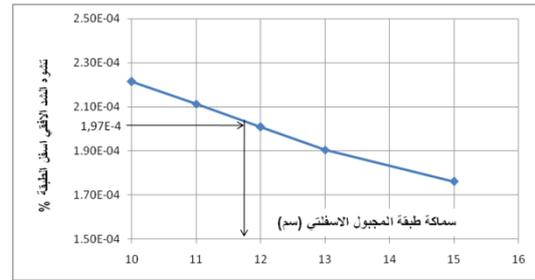
المر في منتصف المسافة بين الدولابين النقطة (B2) ويفسر ذلك باعتبار أن وظيفة الشبك المعدني هي مقاومة اجهادات الشد وليس اجهادات الضغط الشاقولية.

- أدى إضافة التسليح إلى زيادة عدد الحمولات وفق معيار التعب بنسبة 48%

10- التحليل العكسي لحساب سماكة

المجبول الإسفلتي المعادلة للشبك المعدني

في هذا التحليل يتم فرض قيمة التشوه الأفقي الناتج عن استخدام الشبك المعدني في النقطة الحرجة وبعاد حساب السماكة الموافقة للتشوه الأفقي بدون استخدام الشبك المعدني بطريقة التقريب المتتالي وكانت نتيجة الحساب المبينة في الشكل (8) أن إضافة الشبك المعدني يكافئ سماكة تساوي 1.8 سم من طبقة المجبول الإسفلتي ما يعادل 18% .



الشكل (8) العلاقة بين سماكة طبقة الغطاء

الإسفلتي وانفعال الشد

11- النتائج:

- أدى إضافة التسليح إلى تحسن التشوه الأفقي الشاد الذي يعبر عن معيار التعب (والذي يقع أسفل طبقة المجبول الإسفلتي وتحت المحور الشاقولي المر في محور الدولاب النقطة A1) بنسبة 11% وهذا يتوافق مع المهمة الأساسية للتسليح.

- إن استخدام الشبك المعدني يكافئ زيادة في سماكة طبقة المجبول الإسفلتي تساوي في الحالة المدروسة في هذا البحث 1.8 سم للحصول على نفس تشوه الشد في الاتجاه الأفقي أسفل هذه الطبقة.

- إن إضافة التسليح لم يؤدي إلى تحسن محسوس في التشوه في الاتجاه الشاقولي والذي يعبر عن معيار التخذد (أعلى الطابق الترابي وتحت المحور الشاقولي

- 14 Léonard, D., Vanelstraete, A., and Parewyck, S. (2002). "Structural design of flexible pavements using steel netting as base reinforcement". *International Journal of Geomechanics*, 2(1), 291–303. doi:10.1061/(ASCE)1532-3641(2002)2
- 15 MePADS <https://mepads.software.informer.com/5.2/>
- 16 Mohamady A, Elhady A-B M, Eisa M S 2013 Improving of Asphalt Pavement Performance using Steel wire Grid Reinforcement *International Journal of Engineering Inventions*, Vol. 2, Issue 10, pp 12-22.
- 17 Montepara et al, (2005)
- 18 Peattie, K.R.; Stress and strain factors for three layer elastic systems. *Highway Research Board Bulletin 342*. Washington D.C., 1962.
- 19 Romeo, E., and Montepara, A. (2012). "Characterization of reinforced asphalt pavement cracking behaviour using flexural analysis". *Procedia - Social and Behavioural Sciences*, 53, 356–365. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.887
- 20 Vanelstraete, A., and Francken, L. (2000). "On site behavior of interface systems." *Proc., 4th International RILEM Conference – Reflective Cracking in Pavements, E & FN Spon, Ontario, Canada, 517-526*.
- 21 WESLEA https://imapssl.eng.auburn.edu/software/software/software_showone.php?software_id=276
- 22 Zieliński P, Grzybowska W 2016 Effectiveness of the steel mesh track in strengthening cracked asphalt pavements *Proceedings of the 4rd International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA, Šibenik, Croatia*, pp. 195-202.
- 23 AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993.
- 24 – الشروط والمواصفات الفنية العامة لأعمال الطرق والجسور – الجمهورية العربية السورية – وزارة المواصلات 2002

Received	2021/6/14	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2021/6/14	قبول البحث للنشر

References

المراجع

- Ahlin, R.G.; Ulery, H.H.; Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space. *Highway Research Board Bulletin 342*. Washington D.C., 1962.
- Asphalt Institute (AI), (1981), "Thickness Design—Asphalt Pavement for Highways and Streets,"
- BISAR software Publisher: INSTITUTE OF ASPHALT TECHNOLOGY ISSN: 1369-9776
- Boussinesq, M.J.; *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Gauthier-Villars. Paris, 1885.
- CIRCLY <https://pavement-science.com.au/softover/circly/downloads/>
- Coni, M., and Bianco, P. M. (2000). "Steel reinforcement influence on the dynamic behavior of bituminous pavement." *Proc., 4th International RILEM Conference – Reflective Cracking in Pavements, E & FN Spon, Ontario, Canada, 3-12*
- Design of Flexible Pavements Prof. dr. ir. A.A.A. Molenaar Nootdorp, July 2018
- Elseifi, M. A., and Al-Qadi, I. L. (2005). "Effectiveness of steel reinforcing nettings in combating fatigue cracking in new flexible pavement systems". *Journal of Transportation Engineering*, 131(1), 37–45. doi:10.1061/(ASCE)0733 947X(2005)131:1(37)
- EVERSTRESS Developed by University Maine Civil Engineering
- G. Narendra Goud, C. Hariprasad , B.Umashanka *Experimental Study on Steel-Wire-Mesh Reinforced Flexible Pavements Conference Paper (PDF Available) • August 2016* 10.1061/9780784480151.029 DOI:
- Huang, Y.H. (2004), "Pavement Analysis and Design", 2nd Edition, New Jersey, Prentice Hall. *Design of Flexible Pavements*, Nootdorp, July 2018
- Ibrahim, S. F., Ahmed, N. G., and Jassem, N. H. (2013). "Experimental study on surface steel-reinforcement for asphalt pavements". *Journal of Engineering and Development*, 17(3), 110–127
- Jones, A.; Tables of stresses in three layer elastic systems. *Highway Research Board Bulletin 342*. Washington D.C., 1962.

الملحق 1: نتائج التحليل في حالة الغطاء بدون تسليح

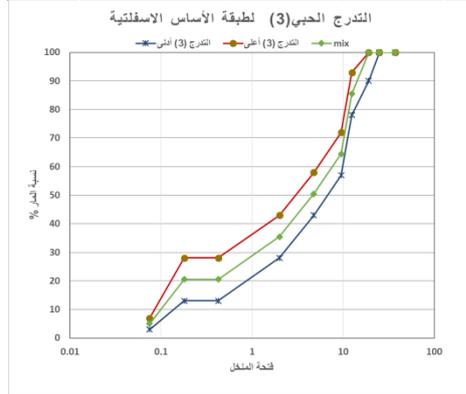
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP. (STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MAJOR P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)	MINOR P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.06168	485.000	1174.189	391.758	1134.505
	(STRAIN)	-1.388E-04	2.133E-04	-1.388E-04	1.955E-04	
1	10.00000	0.06124	182.997	183.743	-838.047	-679.894
	(STRAIN)	2.380E-04	2.383E-04	-2.215E-04	-2.215E-04	
1	10.00100	0.06124	182.975	186.854	4.877	16.888
	(STRAIN)	5.800E-04	5.975E-04	-2.214E-04	-2.214E-04	
1	30.00000	0.05317	50.581	51.602	-87.051	-67.912
	(STRAIN)	3.482E-04	3.528E-04	-2.711E-04	-2.711E-04	
1	30.00100	0.05317	50.577	52.838	-7.149	-2.930
	(STRAIN)	5.370E-04	5.687E-04	-2.711E-04	-2.711E-04	
1	60.00000	0.04164	19.868	20.144	-16.533	-14.261
	(STRAIN)	3.208E-04	3.246E-04	-1.889E-04	-1.889E-04	
1	60.00100	0.04164	19.868	20.362	0.093	0.828
	(STRAIN)	3.846E-04	3.990E-04	-1.889E-04	-1.889E-04	
2	0.00000	0.06290	0.000	1018.114	247.355	853.051
	(STRAIN)	-1.359E-04	2.110E-04	-1.359E-04	1.367E-04	
2	10.00000	0.06241	125.265	125.265	-615.664	-79.421
	(STRAIN)	1.228E-04	1.228E-04	-2.106E-04	-2.106E-04	
2	10.00100	0.06241	125.257	125.257	-0.866	52.760
	(STRAIN)	3.570E-04	3.570E-04	-2.106E-04	-2.106E-04	
2	30.00000	0.05528	54.203	54.203	-93.487	-70.965
	(STRAIN)	3.725E-04	3.725E-04	-2.921E-04	-2.921E-04	
2	30.00100	0.05528	54.201	54.201	-7.717	-0.478

الملحق 2: نتائج التحليل في حالة الغطاء مع تسليح

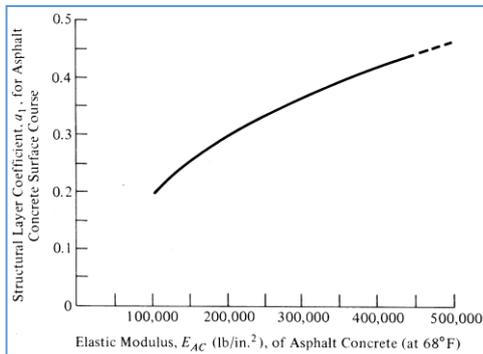
POINT INTERMEDIATE	VERTICAL	VERTICAL	VERTICAL	MAJOR	MINOR	
NO.	COORDINATE	DISP. (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.06111 (STRAIN)	485.000 -1.359E-04	1162.351 2.108E-04	391.758 -1.359E-04	1122.057 1.927E-04
1	8.75000	0.06099 (STRAIN)	204.243 1.593E-04	205.981 1.601E-04	-440.762 -1.310E-04	-342.608 -1.310E-04
1	8.75100	0.06099 (STRAIN)	204.210 1.234E-04	205.387 1.237E-04	-774.296 -1.310E-04	-602.526 -1.310E-04
1	10.00000	0.06081 (STRAIN)	175.836 1.671E-04	176.363 1.672E-04	-1222.941 -1.966E-04	-976.029 -1.966E-04
1	10.00100	0.06081 (STRAIN)	175.825 5.423E-04	179.768 5.600E-04	11.630 -1.966E-04	21.984 -1.966E-04
1	30.00000	0.05301 (STRAIN)	50.053 3.425E-04	51.049 3.470E-04	-85.044 -2.654E-04	-66.530 -2.654E-04
1	30.00100	0.05301 (STRAIN)	50.048 5.289E-04	52.253 5.598E-04	-6.686 -2.654E-04	-2.620 -2.654E-04
1	60.00000	0.04159 (STRAIN)	19.804 3.190E-04	20.076 3.229E-04	-16.382 -1.876E-04	-14.142 -1.876E-04
1	60.00100	0.04159 (STRAIN)	19.804 3.826E-04	20.292 3.967E-04	0.145 -1.876E-04	0.869 -1.876E-04
2	0.00000	0.06239 (STRAIN)	0.000 -1.362E-04	1017.964 2.106E-04	247.356 -1.362E-04	855.786 1.376E-04
2	8.75000	0.06211 (STRAIN)	116.772 8.476E-05	116.772 8.476E-05	-351.984 -1.262E-04	-40.928 -1.262E-04
2	8.75100	0.06211 (STRAIN)	116.782 6.553E-05	116.782 6.553E-05	-620.744 -1.262E-04	-82.188 -1.262E-04
2	10.00000	0.06202 (STRAIN)	121.984 9.000E-05	121.984 9.000E-05	-948.301 -1.883E-04	-145.070 -1.883E-04
2	10.00100	0.06202 (STRAIN)	121.934 3.435E-04	121.934 3.435E-04	3.764 -1.883E-04	50.217 -1.883E-04
2	30.00000	0.05510 (STRAIN)	53.530 3.657E-04	53.530 3.657E-04	-91.182 -2.855E-04	-69.309 -2.855E-04
2	30.00100	0.05509 (STRAIN)	53.528 53.528	53.528 53.528	-7.215 -7.215	-0.184 -0.184

الملحق 3: تصميم الخلطة المرجعية

VFA%	VA%	VMA %	النبات المصحح kg	عامل التصحح	الثبات N	الثبات KN	السيلان mm	الكثافة المخبرية	ارتفاع العينة mm	رقم العينة	نسبة الإسفلت
57.164	6.722	15.693	760.518	0.927	8040	8.04	5.14	2.38	66.6	1	4.50%
59.257	6.202	15.223	742.276	0.935	7780	7.78	4.8	2.39	66.58	2	
59.793	6.074	15.107	949.486	0.938	9920	9.92	5.44	2.39	66.39	3	
58.738	6.333	15.341	817.427				5.13	2.39			
68.262	5.085	16.022	706.416	0.928	7460	7.46	4.52	2.38	66.53	1	5.00%
70.261	4.650	15.638	701.000	0.98	7010	7.01	4.87	2.39	64.31	2	
70.941	4.507	15.511	759.857	0.985	7560	7.56	4.82	2.39	65.04	3	
69.821	4.748	15.724	722.424				4.74	2.39			
81.279	2.618	13.984	966.857	0.94	10080	10.08	3.88	2.45	65.58	1	5.50%
76.336	3.492	14.756	850.531	0.92	9060	9.06	4.62	2.42	66.47	2	
73.912	3.957	15.166	765.918	0.9	8340	8.34	5.09	2.41	66.078	3	
77.176	3.355	14.635	908.694		9160		4.25	2.43			
75.965	3.856	16.045	625.927	0.928	6610	6.61	4.23	2.40	66.53	1	6.00%
74.409	4.178	16.326	587.449	0.95	6060	6.06	4.24	2.39	67.13	2	
75.217	4.010	16.179	558.000	0.93	5880	5.88	4.72	2.40	66.69	3	
75.20	4.01	16.18	590.46				4.40	2.40			



التدرج الحبيبي للحصويات المستخدمة في الخلطة الإسفلتية



تقدير معامل المرونة الرجوعي للخرسانة الإسفلتية [23]

اختبارات الحصويات الناعمة الرمل

60%	المكافئ الرملي SE %
2.639	الوزن النوعي الكلي Gsb
2.701	الوزن النوعي الظاهري Gsa
2.662	الوزن النوعي المشبع والسطح جاف Gssa
0.88%	نسبة الإمتصاص W%

اختبارات الحصويات الخشنة البحص

14.42%	الفاقد بالإهتراء (لوس أنجلوس)
2.751	الوزن النوعي الكلي Gsb
2.808	الوزن النوعي الظاهري Gsa
2.771	الوزن النوعي المشبع والسطح جاف Gssa
0.75%	نسبة الإمتصاص W%