

Study of the Relationship between the Rutting Values and the Properties of Materials for Flexible Pavement using Computer Modeling

Dr. Rami Hanna*
Mahasen Allahibe**

(Received 30 / 4 / 2023. Accepted 26 / 6 / 2023)

□ ABSTRACT □

The problems associated with the cracking of flexible pavement are among the issues for which solutions have been incomplete for decades, due to the difficulty of linking the properties of the materials formed for the pavement and the thicknesses of the pavement, as well as the mutual relationship between the various layers that form them, especially using traditional relationships and methods. However, during the past decades, mathematical methods have been successfully used, the most important of which is the finite element method, in the careful analysis of various pavement problems. In this study, the pavement layers were modeled and analyzed using two-dimensional analysis (the use of specific two-dimensional elements) using the Abaqus program in order to verify the effect of repeated wheel load on the occurrence of rutting through the response and interaction of the pavement layers with it and with time.

Our model is real pavement layers with different material properties and subject to different loads using finite element theories in order to properly predict the rutting values and their location, where the behavior of unbound materials was considered (linear elastic behavior) based on the (Drucker Prager) model, as for the behavior of the asphalt layer it was modeled as a visco plastic behavior. We considered the design load as the tire inflation pressure (0.7 MPa) with a cyclic load of 100,000 load cycles within a time of 100 seconds. The expected rutting depth through the Abaqus program was compared with the rutting depth calculated from traditional relations, and the results showed that the rutting depth using the visco plasticity model of the asphalt layer matches the rutting depth calculated by 86% for the Jableh Highways model, and 95% for the northern Highways model of Lattakia city, in addition to It is indicated that the time periods for the occurrence of rutting exceed the design life of the pavement (15 years).

Keywords: Rutting in The Flexible pavement, Finit Element Method, Stresses, Strains, Abaqus Programme.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor - Dep. Of Transport& Traffic Engineering -Tishreen University-Lattakia- Syria.

** Master Student - Dep. Of Transport& Traffic Engineering -Tishreen University - Lattakia- Syria- mahasen.an1234@gmail.com

دراسة العلاقة بين قيم التحدد وخواص المواد المشكلة للرصيف المرن باستخدام النمذجة الحاسوبية

د. رامي حنا*

محاسن وفيق اللهيبي**

(تاريخ الإيداع 30 / 4 / 2023. قُبِلَ للنشر في 26 / 6 / 2023)

□ ملخص □

تعتبر المشاكل المرتبطة بتصعد الرصيف المرن من الأمور التي كانت الحلول الموضوعية لها غير كاملة على مدى عقود وذلك بسبب صعوبة ربط خواص المواد المشكلة للرصيف وسماكات الرصيف وكذلك العلاقة المتبادلة بين الطبقات المتنوعة المشكلة لها خاصة باستخدام العلاقات والطرائق التقليدية. لكن خلال العقود الماضية، تم بنجاح استخدام طرائق رياضية ومن أهمها طريقة العناصر المحددة في التحليل الدقيق لمشاكل الرصيف المختلفة. في هذه الدراسة تم نمذجة وتحليل طبقات الرصيف باستخدام التحليل الثنائي البعد (استخدام عناصر محددة ثنائية البعد) باستخدام برنامج الأباكوس من أجل التحقق من تأثير حمولة العجلات المتكررة على حدوث التحدد من خلال استجابة وتفاعل طبقات الرصيف معها ومع الزمن.

نمذجنا طبقات رصيف حقيقية بخصائص مواد مختلفة وخاضعة لأحمال مختلفة باستخدام نظريات العناصر المحددة وذلك للتنبؤ بشكل سليم بقيم التحدد ومكان حدوثها، حيث تم اعتبار سلوك المواد المفككة (سلوك لدن مرن خطي) اعتماداً على نموذج (Drucker Prager)، أما بالنسبة لسلوك الطبقة الأسفلتية تم نمذجتها سلوك لدن لزج. اعتبرنا الحمولة التصميمية ضغط النفخ للإطار (0.7MPa) مع حمولة دورية تصل إلى 100000 دورة تحميل وذلك خلال زمن قدره 100 ثانية.

تم مقارنة عمق التحدد المتوقع من خلال برنامج الأباكوس مع عمق التحدد المحسوب من العلاقات التقليدية، وأظهرت النتائج أن عمق التحدد باستخدام نموذج اللزجة للطبقة الأسفلتية يطابق عمق التحدد المحسوب بنسبة 86% لنموذج رصيف متعلق جبلة، و95% بالنسبة لنموذج المتعلق الشمالي لمدينة اللاذقية، بالإضافة إلى أن المدد الزمنية لحدوث التحدد تتجاوز العمر التصميمي للرصيف (15 سنة).

الكلمات المفتاحية: التحدد في طبقات الرصيف المرن، طريقة العناصر المحددة، الإجهادات، التشوهات، برنامج الأباكوس.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ - قسم المواصلات والنقل - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** طالبة ماجستير - قسم المواصلات والنقل - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

mahasen.an1234@gmail.com

مقدمة:

اليوم ومع ازدياد حركة المرور، وتتوع الحركة على الطرق من حمولات خفيفة وثقيلة استدعي البحث وتطوير مرافق النقل بشكل أوسع، وخاصة طبقات رصف الطرق التي تختلف أنواعها بحسب نوع الحركة وحجمها وطبيعة المناخ. هناك أنواع مختلفة من الأرصفة المستخدمة في هندسة الطرق (مرنة، صلبة، ومركبة)، يتكون الرصف المرن من طبقة رقيقة من الأسفلت عالي الجودة (طبقة التغطية)، حيث توضع أعلى طبقة الأساس الحصوي التي تتكون من حصويات فقط، يعد تدرج وحجم وشكل الحصويات من العوامل الرئيسية التي تحدد قدرة الطريق على تحمل الإجهادات الناتجة عن الأحمال المرورية، تتوضع طبقة الأساس أعلى طبقة ما تحت الأساس التي تتكون من خليط من الركام والحجر المكسر وتكون ذات جودة أقل من الطبقة العليا.

تشوه الرصف هو مؤشر لتدهور طبقات الرصف كلياً أو جزئياً، حيث تعد الظروف البيئية، الأحمال المرورية، ومواد الرصف العوامل الرئيسية التي تؤثر على أداء الرصف المرن، حيث أن معدل التشوه يعتمد على مقدار وتغير شدة الأحمال المرورية ومقدار تحمل الرصف بكافة مكوناته. [2]

هناك نوعان من تشوهات الرصف المرن:

- التشوه الإنشائي: يؤدي لتشوهات وظيفية حيث يصبح الرصف الذي يعاني من تشوهات إنشائية عاجز عن تحمل أحمال حركة المرور، ويحتاج إلى صيانة فورية.

- التشوهات الوظيفية: حيث يؤثر على جودة وسلامة حركة المرور ويزيد من كلف الصيانة. [8]

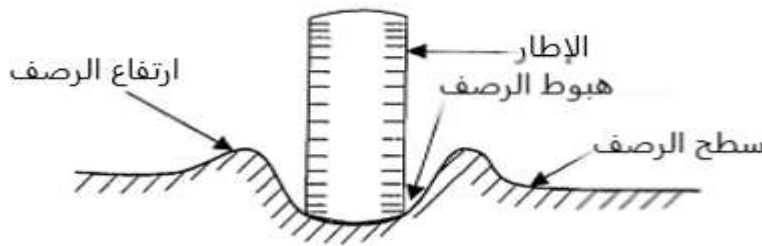
يمكن أن تؤثر أنواع مختلفة من التشوهات على الرصف بما فيها التخذد الذي يسبب مشاكل في جودة السلامة والخدمة على الطريق وتسجل عادة قيم التخذد على الطرق والشوارع في المواقع عالية الكثافات مثل التقاطعات، المنحدرات، ومناطق توقف المركبات الثقيلة. عموماً قد يعرض التخذد سلامة المركبات للخطر عندما يصل إلى الأعماق الحرجة. [4]

عزف الباحث (Miller) عام 2003 التخذد على أنه عبارة عن تشوه دائم لسطح الرصف يسبب هبوطات طولية (تجاويف) محدثاً قنوات وفق مسارات إطارات الحمولات الثقيلة ويتأثر ذلك بالحركة الجانبية للمواد بسبب الأحمال

المرورية والرص غير الكافي أثناء عملية الإنشاء والخلط الغير منتظم وفشل الطبقات التحتية للرصف. [5]

أنواع التخذد:

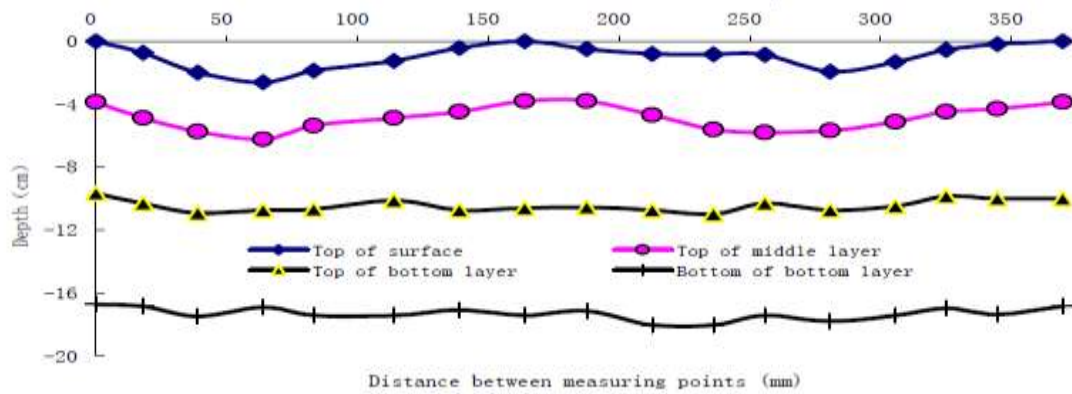
- 1- **منخفض:** أقل من 1 انش (13-25 مم).
- 2- **متوسط:** 1-2 انش (25-50 مم).
- 3- **مرتفع:** أكبر من 2 انش (أكبر من 50 مم). [1]



الشكل (1): نموذج تشوه سطح الرصف

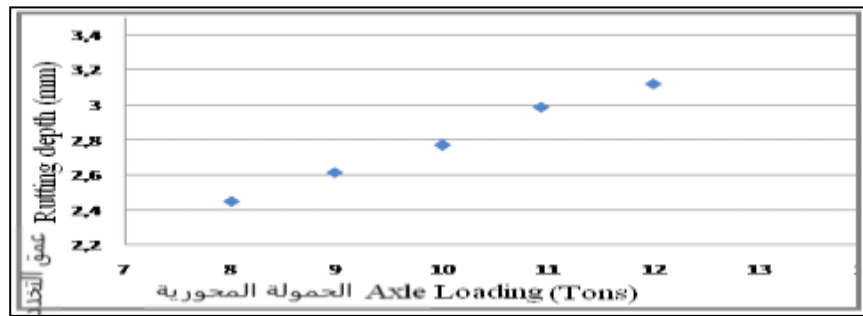
قام الباحث Zang Qi-sen وآخرون عام 2009 بالتحقق من فشل الرصف لتحديد سبب ومصدر التخذد، تم تحليل خصائص التخذد في كل طبقة من الرصف الاسفلتي من خلال مسح عمق التخذد وتحليل المقاطع العرضية وأخذ عينات من المقاطع النموذجية وتم التوصل إلى:

- ✓ أكبر تشوه قد حدث في طبقة الأساس الوسطى حوالي 60% من التخذد الإجمالي.
- ✓ 25% من التخذد جاء من الطبقة السطحية.
- ✓ 15% من التخذد جاء من أسفل طبقة الأساس الوسطى. [10]



الشكل (2): مقطع عرضي نموذجي للتخذد الحاصل في طبقات الرصف

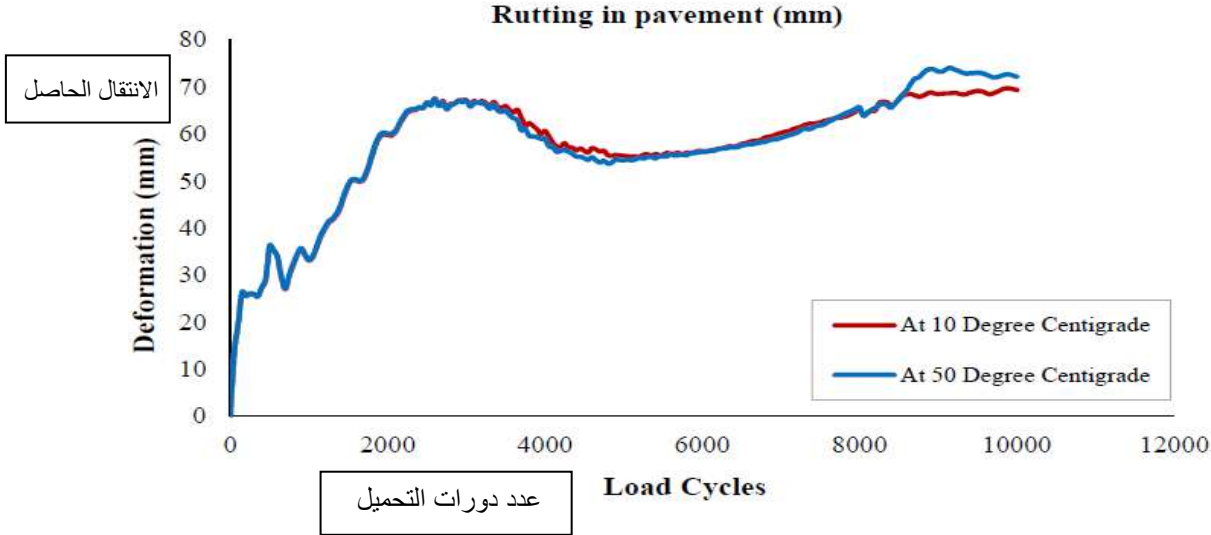
درس الباحث Gilbert Tchémou وآخرون عام 2009 العوامل المؤثرة على التخذد ومنها الحمولة المحورية وضغط نفخ الإطار حيث قام بوضع نموذج لطبقات الرصف بطريقة العناصر المحددة وتبين أن زيادة الحمل من 8 إلى 12 طن (زيادة بنسبة 50%) تؤدي إلى زيادة بنسبة 22% في عمق التخذد كما موضح في الشكل التالي: [10]



الشكل (3): مقطع عرضي نموذجي للتخذد الحاصل في طبقات الرصف

يؤدي زيادة ضغط النفخ للإطار إلى تقليل سطح التلامس للإطار، مما يؤدي إلى تركيز الاجهاد وتشوه الرصف، حيث لاحظ أن تغيير الضغط النفخ من 600 إلى 800kpa (34%) ينتج زيادة في عمق التخذد حوالي (5%).

كما قام الباحث (Sahid Ali et al) عام 2021 بإجراء تحليل العناصر المحددة ثلاثية الأبعاد على رصيف مرن بخصائص مواد ودرجة حرارة وظروف تحميل مختلفة، تم تطوير نموذج عناصر محددة باستخدام برنامج Abaqus لتوقع سلوك الرصيف. قام بدراسة تأثير درجة الحرارة على التخذد الحاصل في طبقات الرصيف، وتم التوصل إلى أن زيادة درجة الحرارة من 10 إلى 50 درجة مئوية زاد عمق التخذد بمقدار 3mm أي 9% أي أن لدرجة الحرارة تأثير كبير عمق التخذد الحاصل كما هو موضح في الشكل التالي: [12]



الشكل (4): مقارنة في تحليل درجة الحرارة

في بحثنا هذا قدمنا نمذجة حاسوبية لرصيف متعلق جبلة والمتعلق الشمالي لمدينة اللاذقية باستخدام برنامج ال Abaqus وكانت النتائج المستخلصة من النمذجة تقارب القيم المتوقعة خلال العمر التصميمي للرصيف.

الإشكالية (The problem):

أولاً: التخذد في طبقات الرصيف يمثل مشكلة تؤثر على أداء الرصيف وديمومته، فالتخذد لا يقلل من حياة الرصيف فحسب بل يشكل خطراً على خدمة الطريق وسلامة حركة المرور عندما يصل إلى الأعماق الحرجة.

ثانياً: تتطلب النمذجة المخبرية للتخذد تجهيزات معقدة وأماكن كبيرة في منشآت المخابر الخاصة والعامة، ودورات تحميل كبيرة جداً والتي تحتاج إلى زمن طويل للحصول على نتائج مرجوة، بالإضافة للكلف الباهظة في المعدات والتجهيزات المخبرية.

ثالثاً: تحديد أسباب التخذد كلياً كان ولا يزال يأخذ أهمية قليلة بالقياس بالنسبة لباقي مشاكل الرصيف.

أهمية البحث وأهدافه:

وضع موديل رياضي على الحاسب يمكننا باستخدام طريقة العناصر المحددة من الحصول على قيم التخذد في طبقات الرصيف مهما تعقدت تركيبها وموادها الإنشائية، بالإضافة لإمكانية التنبؤ بحدوث التخذد بعد عدد دورات تحميل معينة. يعتبر تطبيق طريقة العناصر المحددة بأهمية تطبيق نمذجة مخبرية مثالية لنمذجة سلوك مواد وطبقات الرصيف

المتنوعة، ويمكننا التحليل السليم باستخدام العناصر المحددة تحسين فهم سلوك المادة وأداء الرصف، وتوفير رؤى حول المواقع الحرجة في بنية الرصف والمساعدة في تصميم هياكل مواد أكثر فاعلية.

طرائق البحث ومواده:

طريقة العناصر المحددة (برنامج الأباكوس (Abaqus Program):

توفر طريقة العناصر المحددة تقريب منطقي عددي للمسائل التي يصعب حلها تحليلياً، وهي صيغة متقطعة تنقسم فيها المسألة الواحدة إلى العديد من المسائل الصغيرة (العناصر) التي يتم حلها في وقت واحد. ترتبط العناصر مع بعضها في العقد وعادة ما تكون في الزوايا، ولكن أيضاً في بعض الأحيان تتواجد في نقاط أخرى (على سبيل المثال منتصف النقاط على جوانب العنصر).

يتم تعريف دالة متعددة الحدود مستمرة للاستجابة المطلوبة (على سبيل المثال الإزاحات) داخل العقد بين العناصر وتشكيل تمثيل تقريبي جزئي للاستجابة، يتم تطبيق الحملات والشروط الطرفية على العقد، يتم تجميع المعادلات التي تصف سلوك كل عنصر وتفاعل العناصر بين العقد لتشكيل مجموعة من المعادلات الخطية التي يتم حلها للحصول على الاستجابة الأولية المطلوبة إذ يستخدم برنامج الأباكوس العديد من الوحدات النمطية لمحاكاة التفاعلات المادية للأحمال والمواد على النحو للسلوك الفعلي لها من قبل المستخدم.

حيث تتضمن النمذجة الحاسوبية باستخدام طريقة العناصر المحددة من ست خطوات:

- النمذجة الهندسية بما في ذلك تعريف الشروط الحدودية.
- الشبكة وتعريف العنصر.
- تحديد خصائص المواد.
- تطبيق شروط التحميل.
- المحاكاة.
- التصور (إخراج النتائج). [13]

النمذجة الميكانيكية للخرسانة الأسفلتية:

النمذجة الميكانيكية المتقدمة تستخدم نظريات الميكانيك المناسبة لوصف السلوك المادي الحقيقي، لكن هناك عيب هو تعقيد هذه النظريات، وخاصة النماذج التأسيسية.

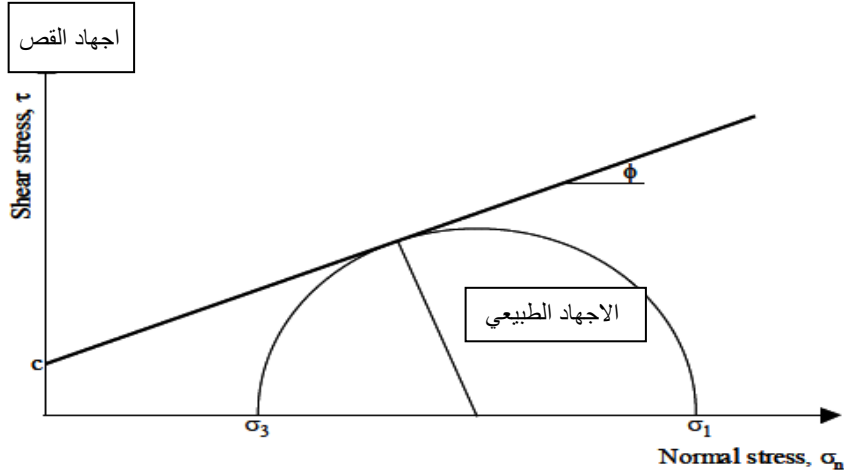
النموذج التأسيسي هو الصيغة الرياضية التي تمثل العلاقة بين الإجهادات والتشوهات ودرجة الحرارة (وربما متغيرات الأخرى للحالة) وتتشبه المادة هنا تحت تأثير الحملات والتغيرات في درجة الحرارة، وهنا تعتبر الخرسانة الأسفلتية مادة معقدة تعتمد فيها التشوهات القابلة للاسترداد وغير القابلة للاسترداد على معدلات الإجهاد والتشوه ودرجات الحرارة.

لذلك نظريات (اللدونة-اللزجة) و(المرونة اللزجة) هي الأنسب لنمذجة السلوك القابل للاسترداد وغير القابل للاسترداد على التوالي، لكن هناك العديد من الطرق لنمذجة السلوك الغير قابل للاسترداد للخرسانة الأسفلتية. [9]

نماذج (اللدونة المرنة):

✓ معيار مور كولومب (Mohr-Coulomb yield criteria):

نجد معيار الخضوع وفق مور كولومب في محاكاة سلوك المادة الاحتكاكية لحظة تطوره، يعتمد معيار الخضوع على أقصى إجهاد للمادة، يفترض نموذج مور كولومب وجود علاقة خطية بين مقاومة القص والإجهاد الطبيعي كما هو موضح في الشكل (5):



الشكل (5): دوائر/معيار فشل مور كولومب التقليدي
المعادلة (1) $\tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$

حيث:

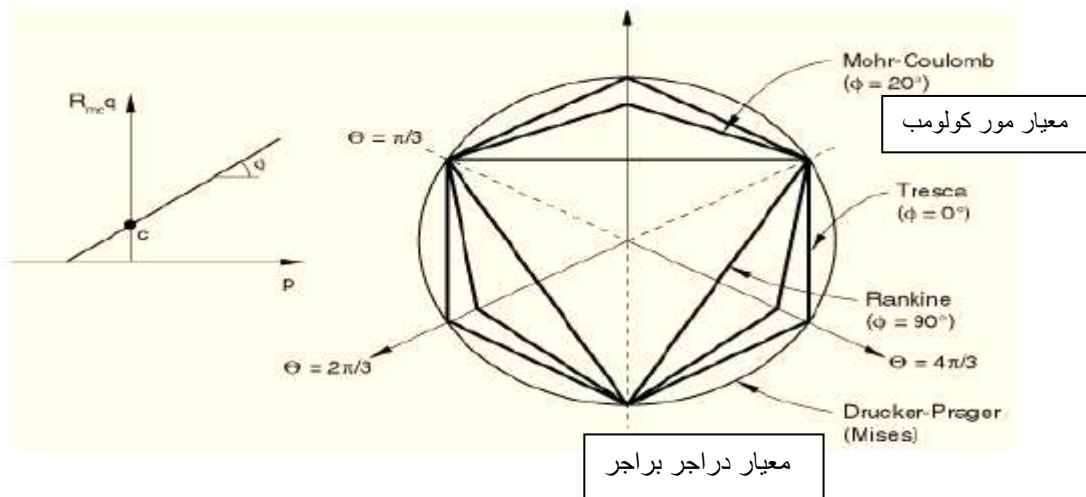
τ_f : إجهاد القص

σ_n : الإجهاد الطبيعي

c: التماسك الظاهري

ϕ : زاوية مقاومة الاحتكاك

يمكن تمثيل سطح الخضوع (سطح الانهيار) لمعيار مور كولومب كهرم سداسي ممتد إلى فضاء إجهاد الضغط الرئيسي كما هو موضح في الشكل (6): [7]



شكل رقم (6): مقطع عرضي لمعيار مور كولومب ودراجر براجر

✓ معيار الخضوع لدراجر براجر (Drucker-Prager yield criteria):

بالنسبة للتربة والمواد الحبيبية المفككة، على عكس المعادن، يوجد عدد من معايير الخضوع تعتمد على مكونات الإجهاد الهيدروستاتيكي، يمكن تعريف هذا المعيار أيضاً كسطح خضوع Drucker-Prager (F_s)، العلاقة بين p (الإجهاد الطبيعي الرئيسي) و q (فرق الإجهاد الرئيسي) في فضاء الإجهاد، والمعطى بالعلاقة: [6]

$$F_s = q - p \tan \beta - d = 0 \quad \text{المعادلة (2)}$$

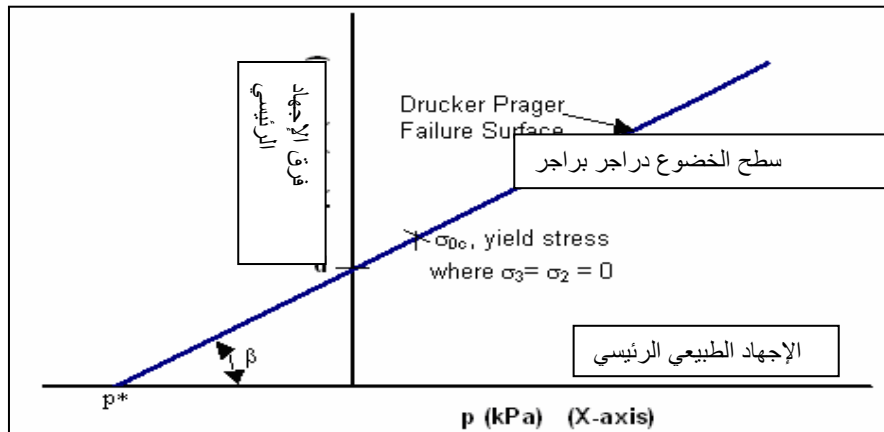
حيث:

β : زاوية سطح الخضوع في فضاء الإجهاد p - q .

d : تقاطع سطح الخضوع مع q في فضاء الإجهاد p - q .

q : فرق الإجهاد الرئيسي.

P : الإجهاد الطبيعي الرئيسي.



الشكل (7): يوضح حالة الخضوع لنموذج دراجر براجر في فضاء الإجهاد p - q

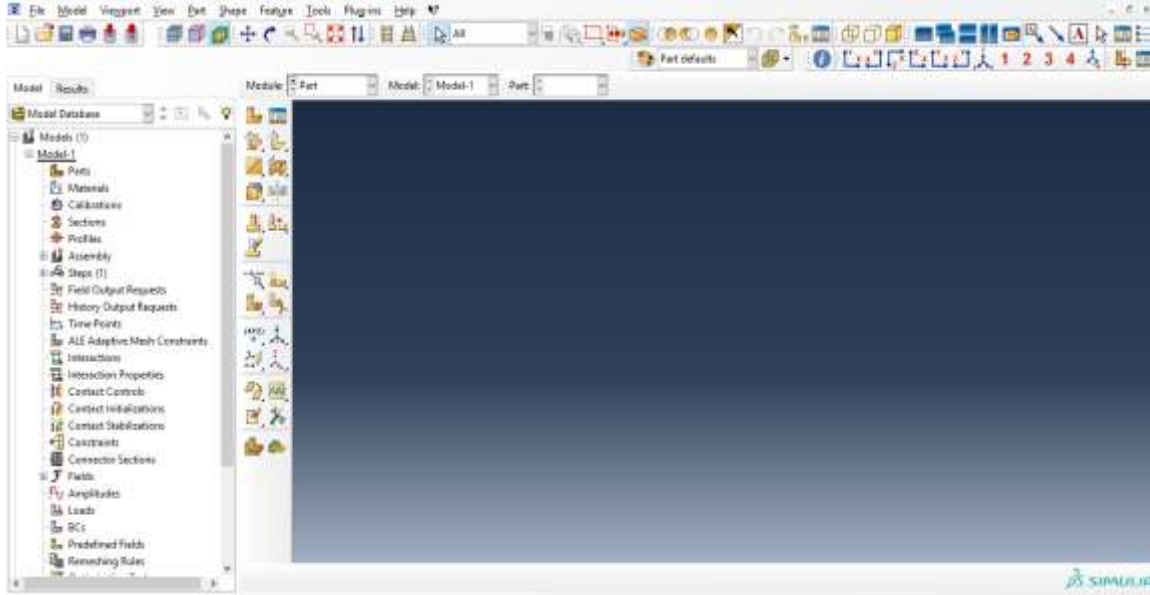
كما يتم حساب إجهاد الخضوع σ_{oc} المطلوبة في برنامج الأباكوس من خلال المعادلة التالية:

$$\sigma_{oc} = \frac{d}{(1 - 1/3 \tan \beta)} \quad \text{المعادلة (3)}$$

النتائج والمناقشة:

المرحلة الأولى:

تقديم فكرة عن واجهة برنامج Abaqus وإمكانياته، Abaqus هو عبارة عن مجموعة من برامج المحاكاة الهندسية القوية المبنية على طريقة العناصر المحددة، يحتوي على مكتبة واسعة من العناصر التي يمكن أن تقوم بتصميم أي شكل هندسي، يستخدم نماذج مادية مختلفة لمحاكاة نماذج معظم المواد الهندسية النموذجية بما في ذلك المطاط، المعادن، البوليميرات، المواد المركبة، الخرسانة المسلحة، والمواد الجيوتكنيكية مثل التربة والصخور، ويمكن استخدامه أيضاً لحل المسائل البسيطة نسبياً باستخدام التحليلات الخطية بالإضافة إلى المسائل المعقدة غير الخطية. [13]



الشكل (8): يوضح واجهة برنامج الأباكوس

المرحلة الثانية:

اقتراح نموذجين لطبقات رصف حقيقية مصممة فعلياً في محافظة اللاذقية (المتعلق الشمالي/ طريق الشحن المرأفي باللاذقية / - متعلق جبلة)، تختلف هذه النماذج عن بعضها البعض بالخواص الهندسية والإنشائية لمواد طبقات الرصف كما هو موضح في الجدول (1).

❖ النموذج الأول نموذج متعلق جبلة:

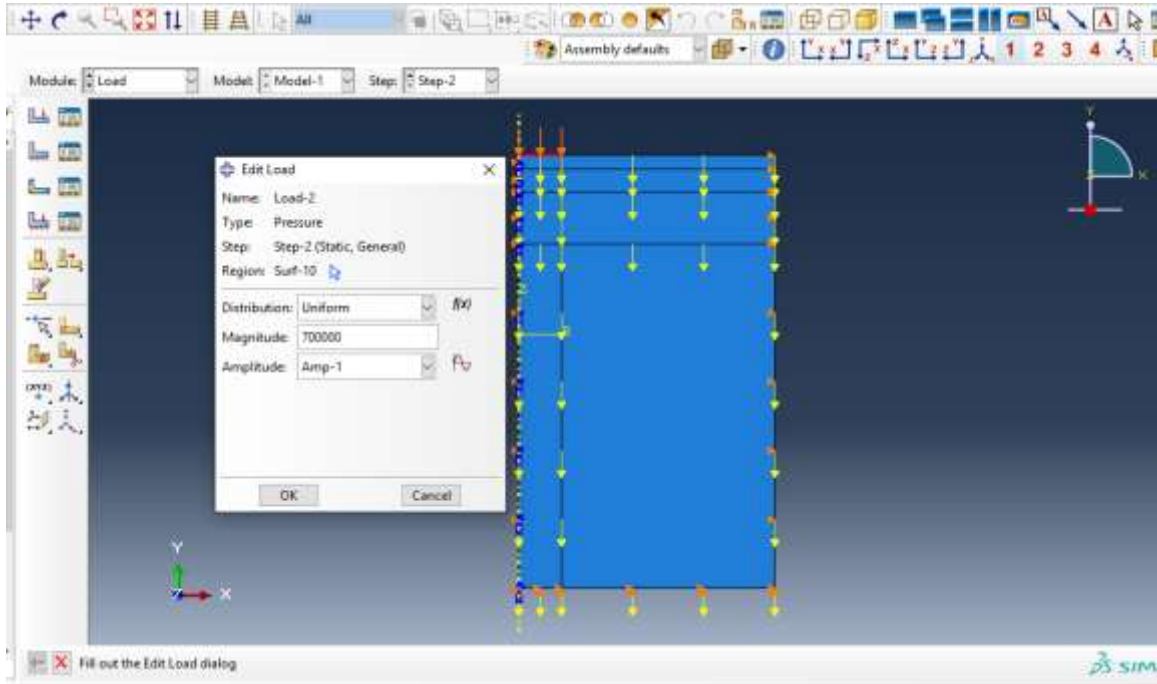
من أجل محاكاة تشوه الرصف المرن، يتم استخدام نموذج Drucker-Prager الخطي اللدن-المرن تماماً لتوصيف مواد طبقة الأساس، ما تحت الأساس، والترية التحتية، أما بالنسبة لطبقة الأسفلتية يتم استخدام نموذج لدن-لزج.

الجدول (1) يوضح بارامترات مواد الرصف لمتعلق جبلة (نموذج لدن - لزج)

اسم الطبقة	سماعة الطبقة (cm)	معامل المرونة (M.pa)	الكتلة الحجمية (kg/m^3)	معامل بواسون μ	زاوية الاحتكاك (درجة)	التماسك (K.pa)	إجهاد الخضوع (Pa)
الطبقة الاسفلتية	12	1500	2300	0.4	28	120	—
طبقة الأساس	20	400	2200	0.35	40	10	2110
طبقة ما تحت الأساس	45	200	2200	0.35	37	30	63582
الترية التحتية	—	50	1700	0.4	17	45	89659

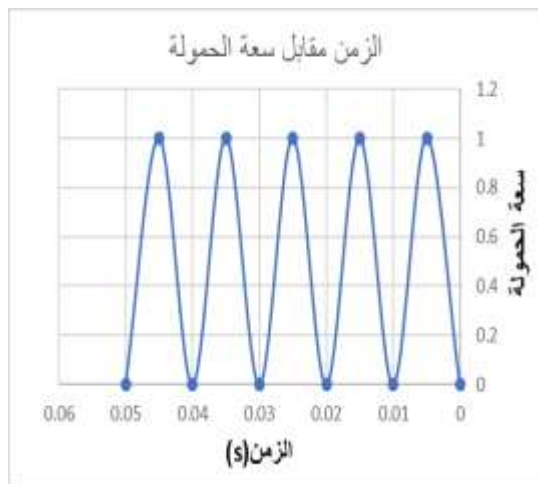
استخدمت في هذه الدراسة ضغط موحد للإطارات (0.7Mpa)، ومع إهمال تأثير الصلابة لجدار الإطار، فإن ضغط تماس الإطار على الطريق يساوي ضغط الإطار، تم تطبيق ضغط النفخ بطول 16cm (نصف طول منطقة تماس الإطار مع سطح الرصف لأن النموذج متناظر) كما هو موضح في الشكل (9).

تم تطبيق ضغط النفخ لمدة 0.01s على كامل منطقة التماس وهو يساوي الوقت المطلوب لمرور الإطار مسافة مساوية مسافة تماس الإطار مع سطح الرصف، فمثلاً لمحاكاة 100000 دورة تحميل، تم تحميل النموذج لمدة 1000s، وذلك عبر الخيار Amplitude كما هو موضح في الشكل (9).

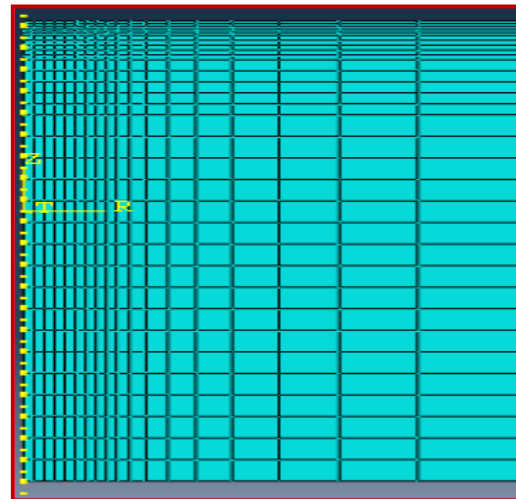


الشكل (9): يوضح إدخال ضغط النفخ في برنامج الأباكوس

تقسم الشبكة إلى مجموعة من العناصر المتصلة بعقد، تتحكم كثافة العناصر في منطقة معينة في دقة النتائج، في حالة نمذجة رصف يخضع لحمولة إطار، تكون كثافة العنصر عالية بالقرب من الحمولة، كلما زادت العناصر كلما زاد وقت الحساب المطلوب، لذلك من الضروري التقليل قدر الامكان من عدد العناصر، كان العدد الإجمالي للعناصر في الشبكة 576 عنصر، وعدد العقد 627 عقدة كما هو موضح في الشكل (10).



الشكل (11): يوضح شبكة العناصر المحددة

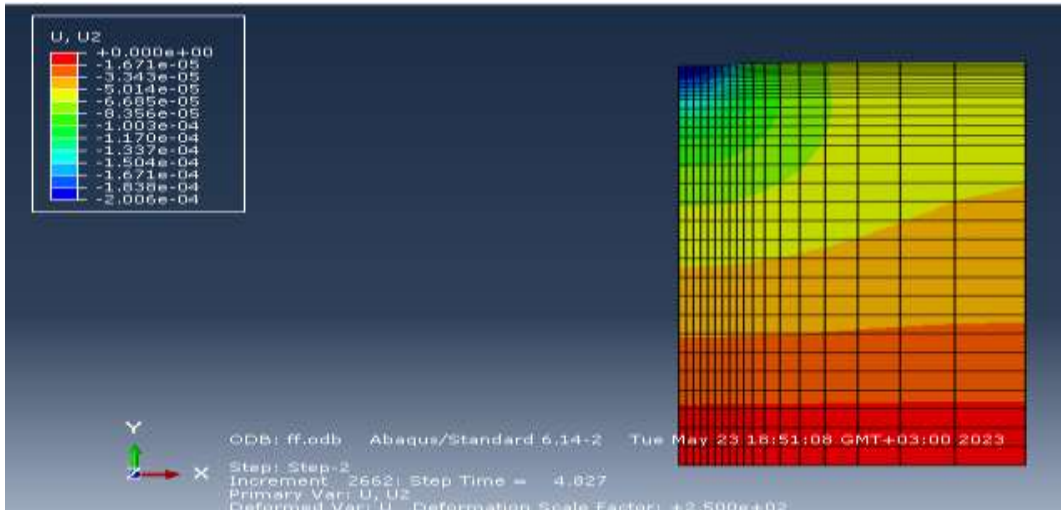


الشكل (10): يوضح دالة الزمن مقابل سعة الحمولة

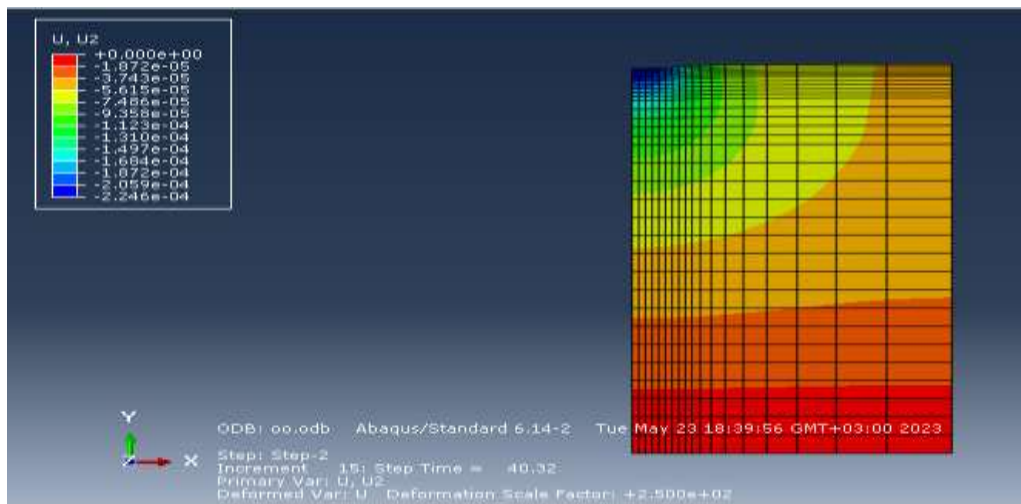
المحاكاة وإخراج النتائج:

يتم حل النموذج بعد عملية تجميع النموذج العددي، يعطي حل المعادلة الخطية قيم متغيرة الاستجابة في كل عقدة من الشبكة، يتناسب الجهد الحسابي بشكل مباشر مع عدد المعادلات التي يتم حلها في وقت واحد وهي بدورها تدل على عدد العناصر/العقد، يتم استخدام خوارزمية الحل المباشر بشكل شائع التي تعتمد على غاوس للحذف لحل مجموعة المعادلات الخطية.

يوضح الشكل (12) والشكل (13) قيمة الانتقال الشاقولي المحسوب على برنامج الأباكوس ولعدد دورات تحميل 1000 و 10000 دورة تحميل، علماً أنه تمّ حساب الانتقال الشاقولي لعدد دورات تحميل 100، 1000، 10000، 100000 دورة، تم تفرغ النتائج على برنامج الأباكوس ورسم المنحنيات وذلك لسهولة قراءة النتائج. تم حساب عمق التخذد الحاصل بجمع قيم الانتقالات الشاقولية الحاصلة في الطبقة الأسفلتية وطبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس والطبقة السفلية كما هو موضح في الجدول (2):



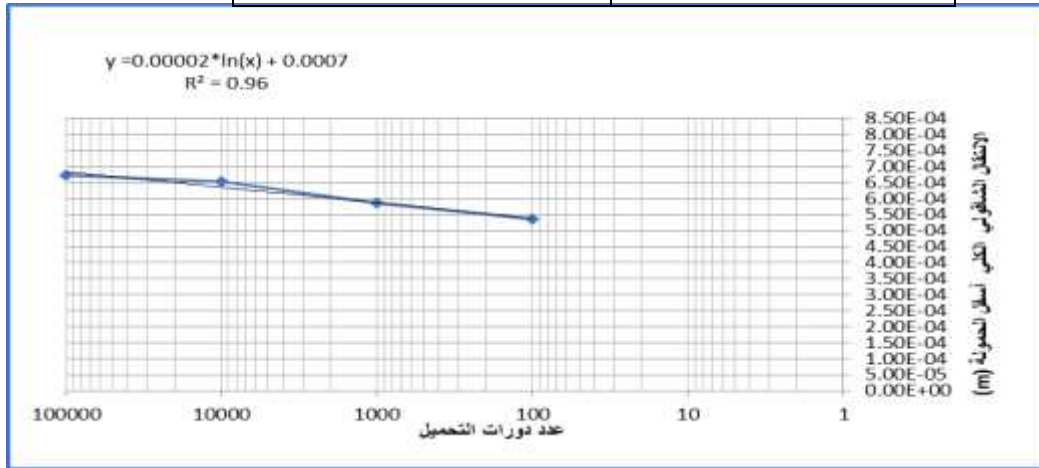
الشكل (12): يوضح الانتقال الشاقولي الحاصل لعدد دورات تحميل 1000 دورة



الشكل (13): يوضح الانتقال الشاقولي الحاصل لعدد دورات تحميل 10000 دورة

الجدول (2) يوضح عمق التخذد الكلي المحسوب من برنامج الأباكوس لمتعلق جبلة

عدد دورات التحميل (N)	عمق التخذد (mm)
100	0.5345
1000	0.586
10000	0.6514
100000	0.672



الشكل (14): يوضح عمق التخذد الكلي حسب عدد دورات التحميل (نموذج متعلق جبلة)

تم التنبؤ بعمق التخذد الحاصل خلال العمر التصميمي للرصيف (15 سنة) وذلك بالتعويض بمعادلة الارتباط الموضحة في الشكل (14) حيث كان عمق التخذد الحاصل خلال العمر التصميمي 1.01mm.

❖ النموذج الثاني نموذج المتعلق الشمالي:

يتم توضيح جميع البارامترات اللازمة للحساب ضمن الجدول (3):

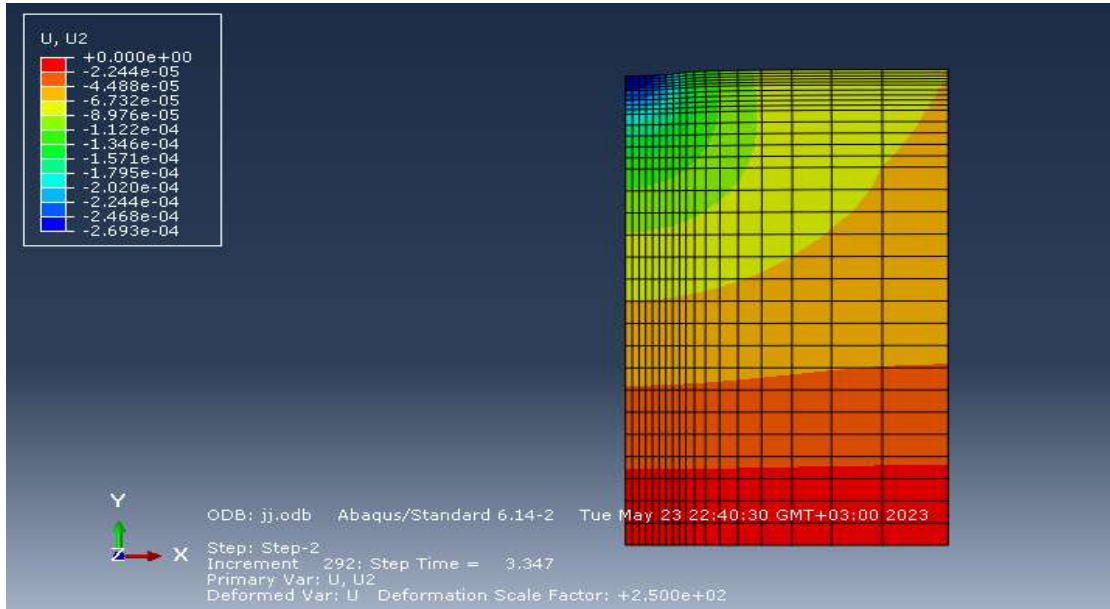
جدول (3) يوضح بارامترات مواد الرصف للمتعلق الشمالي

اسم الطبقة	سماكة الطبقة (cm)	معامل المرونة (M.pa)	الكتلة الحجمية (kg/m ³)	معامل بواسون μ	زاوية الاحتكاك (درجة)	التماسك (K.pa)	إجهاد الخضوع (Pa)
الطبقة الاسفلتية	15	1200	2300	0.4	28	120	—
طبقة الأساس	25	300	2200	0.35	40	10	2110
طبقة ما تحت الأساس	65	150	2200	0.35	37	30	63582
التربة التحتية	3	15	1700	0.4	17	45	89659

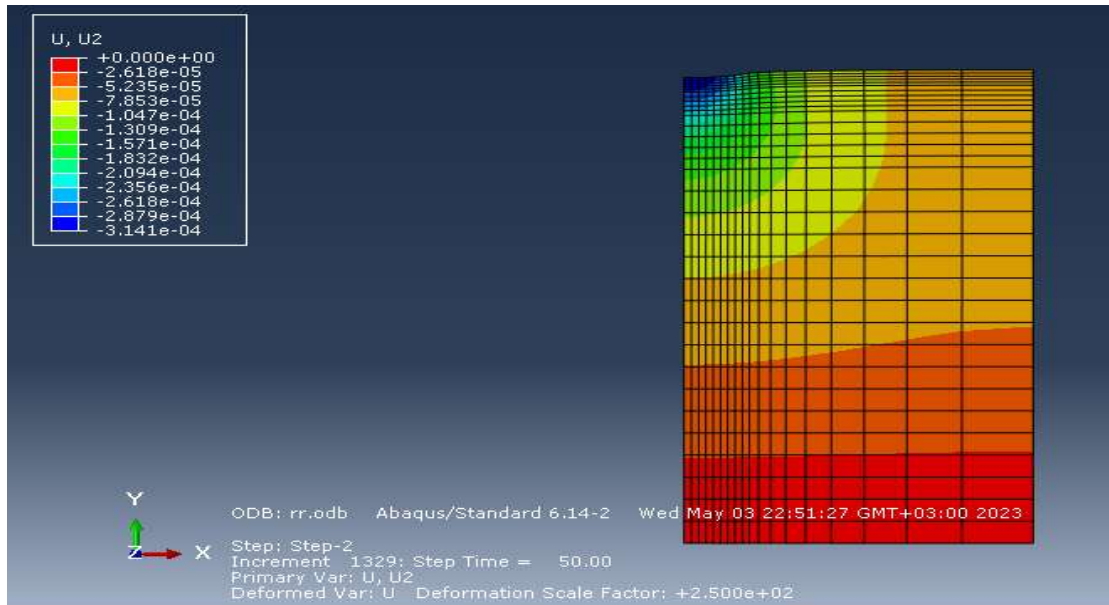
تم توصيف مواد طبقات الرصيف المرن وضغط النفخ للإطار والشروط الحدودية للنموذج بالإضافة إلى تعريف العنصر والشبكة كما تم إدخالها في النموذج الأول.

المحاكاة وإخراج النتائج:

يوضح الشكل (15) والشكل (16) قيمة الانتقال الشاقولي المحسوب على برنامج الأباكوس ولعدد دورات تحميل 1000، 10000، 100000، 1000000 دورة تحميل، علماً أنه تم حساب الانتقال الشاقولي لعدد دورات تحميل 100، 1000، 10000، 100000 دورة، تم تفرغ النتائج على برنامج الأباكوس ورسم المنحنيات وذلك لسهولة قراءة النتائج. تم حساب عمق التخذد الحاصل بجمع قيم الانتقالات الشاقولية الحاصلة في الطبقة الاسفلتية وطبقة الأساس وطبقة ما تحت الأساس والطبقة السفلية كما هو موضح في الجدول (4).



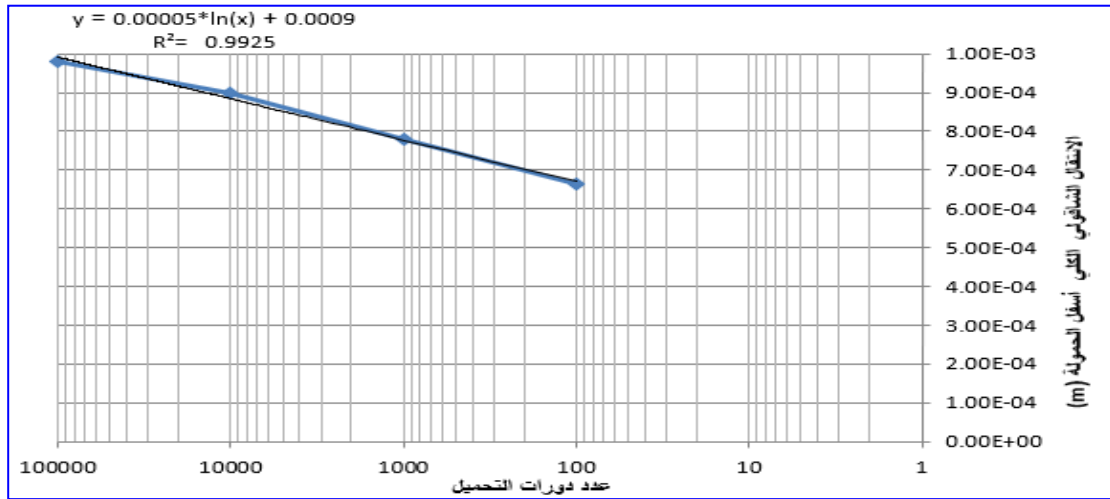
الشكل (15): يوضح الانتقال الشاقولي الحاصل لعدد دورات تحميل 1000 دورة تحميل



الشكل (16): يوضح الانتقال الشاقولي الحاصل لعدد دورات تحميل 10000 دورة تحميل

الجدول (4) يوضح عمق التخذد الكلي المحسوب من برنامج الأباكوس للمتعلق الشمالي

عمق التخذد (mm)	عدد دورات التحميل (N)
0.6663	100
0.7798	1000
0.9	10000
0.98	100000



الشكل (17): يوضح عمق التخذد الكلي حسب عدد دورات التحميل (نموذج المتعلق الشمالي)

تم التنبؤ بعمق التخذد الحاصل خلال العمر التصميمي للرصيف (15 سنة) وذلك بالتعويض بمعادلة الارتباط الموضحة في الشكل (17) حيث كان عمق التخذد الحاصل خلال العمر التصميمي 1.80mm.

المرحلة الثالثة:

حساب الانتقال الكلي (عمق التخذد) خلال العمر التصميمي للرصيف من منظومة الطبقتين:

- ❖ إن تأثير الطبقات فوق الطبقة السفلية تقلل للإجهادات والانتقالات في الطبقة السفلية.
- ❖ وضع برومستر عام 1958 مخططات لحساب الانتقال الشاقولي السطحي في نظام الطبقتين.
- ❖ يتم الحصول على عامل الانتقال الشاقولي F_2 من الشكل (17)، يعتمد على E_2/E_1 و H_1/a .
- ❖ يتم الحصول على عامل الانتقال الشاقولي F من الشكل (18)، يعتمد على E_1/E_2 و r/a .

يتم الحصول على الانتقال الشاقولي السطحي من المعادلة (4):

$$\Delta_1 = 1.5 \frac{p \cdot a}{E_2} \cdot F_2 \quad \text{المعادلة (4)}$$

حيث:

Δ_1 : الانتقال الشاقولي السطحي (مم).

p : ضغط النفخ للإطار (ميغا باسكال).

a : نصف قطر سطح تماس الإطار مع الرصيف (مم).

E_2 : عامل المرونة لتربة المسار (ميغا باسكال).

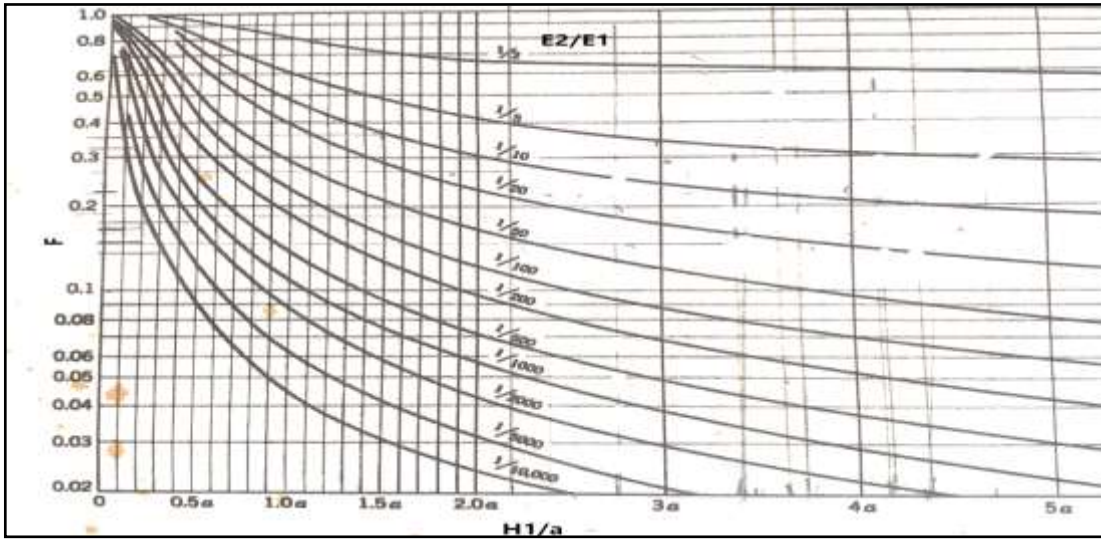
F_2 : عامل الانتقال الشاقولي.

يتم الحصول على الانتقال الشاقولي عند السطح الفاصل بين طبقات الرصف العليا والطبقة السفلية من المعادلة (5):

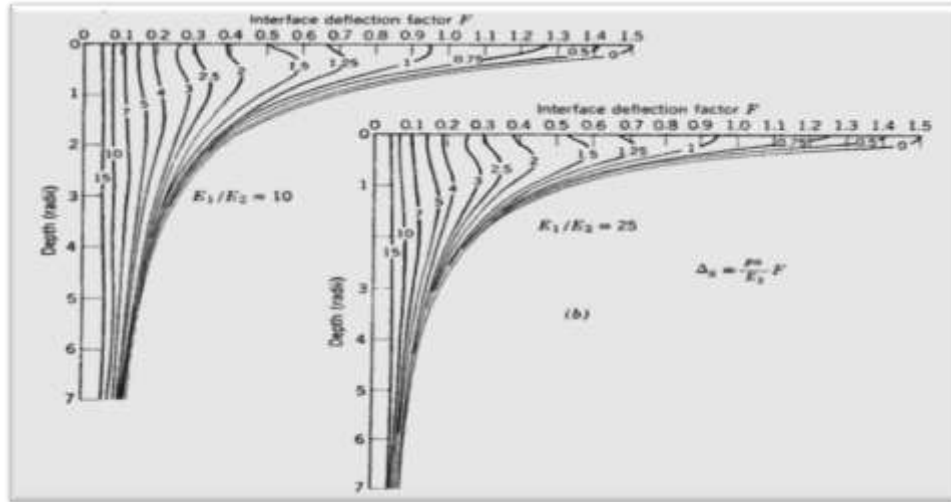
$$\Delta_2 = \frac{p \cdot a}{E_2} \cdot F \quad \text{المعادلة (5)}$$

: الانتقال الشاقولي عند السطح الفاصل (مم). Δ_2

F: عامل الانتقال الشاقولي.



الشكل (18): يوضح قيم المعامل F2



شكل (19): يوضح قيم المعامل F

○ نموذج متعلق جيلة:

حساب الانتقال الشاقولي السطحي:

$$\Delta_1 = 1.5 \frac{0.7 \cdot 160}{50} \cdot 0.23 = 0.7728 \text{mm}$$

حساب قيمة الانتقال الشاقولي عند السطح الفاصل بين طبقات الرصف العليا والطبقة السفلية:

$$\Delta_2 = \frac{0.7 * 160}{50} * 0.1873 = 0.42mm$$

حساب قيمة الانتقال الشاقولي الكلي (عمق التحدد):

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 0.7728 + 0.42 = 1.2mm$$

○ نموذج المتعلق الشمالي:

حساب الانتقال الشاقولي السطحي:

$$\Delta_1 = 1.5 \frac{0.7 * 160}{15} * 0.11 = 1.232mm$$

حساب قيمة الانتقال الشاقولي عند السطح الفاصل بين

طبقات الرصف العليا والطبقة السفلية:

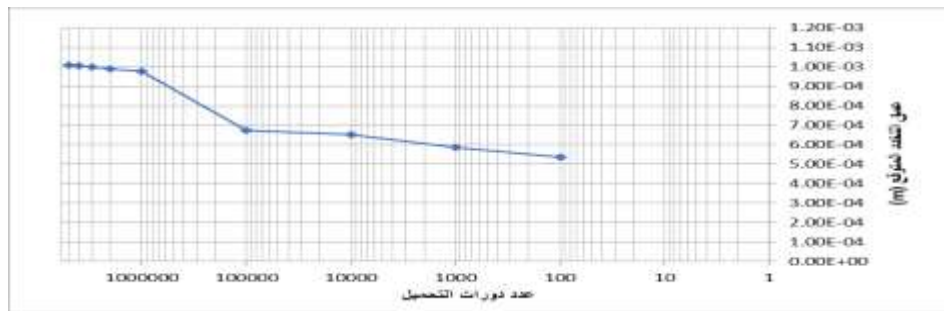
$$\Delta_2 = \frac{0.7 * 160}{15} * 0.092 = 0.686mm$$

حساب قيمة الانتقال الشاقولي الكلي (عمق التحدد):

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 1.232 + 0.686 = 1.9 mm$$

مناقشة نتائج نموذج متعلق جبلة:

كان عمق التحدد الكلي عند عدد دورات تحميل 100 مساوياً 0.5345mm، تزايد عمق التحدد بشكل تدريجي مع زيادة عدد دورات التحميل ليصبح مساوياً 0.672mm عند عدد دورات تحميل 100000 كما هو موضح في الجدول (2). تمّ التنبؤ بعمق التحدد خلال عدد دورات تحميل 1000000، 2000000، 3000000، 4000000، 5000000 عن طريق التعويض في معادلة الارتباط الموضحة في الشكل (14). حيث وصل عمق التحدد إلى 1.01mm خلال 5000000 دورة تحميل وهو عدد حمولات المرور المكافئة خلال العمر التصميمي للرصف كما هو موضح في الشكل (20).



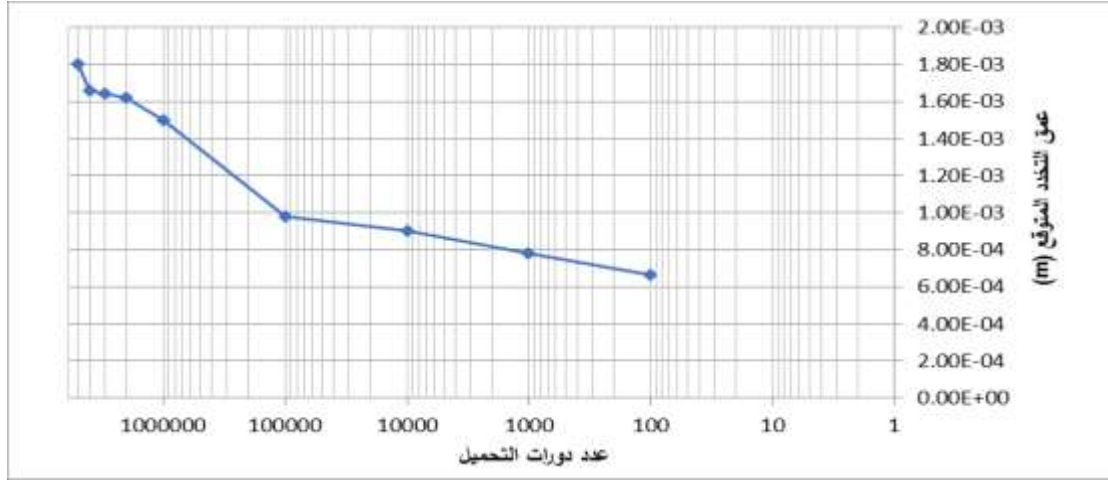
الشكل (20): يوضح عمق التحدد المتوقع خلال 5 مليون دورة تحميل لنموذج متعلق جبلة عمق التحدد حسابياً

من العلاقات التقليدية هو 1.2mm، أما عمق التحدد المتوقع من خلال برنامج الأباكوس هو 1.01mm، النتيجة متقاربتين بشكل كبير، وذلك نتيجة الأخذ بعين الاعتبار قيمة التماسك وزاوية الاحتكاك للطبقة الاسفلتية.

مناقشة نتائج نموذج المتعلق الشمالي:

كان عمق التحدد عند عدد دورات تحميل 100 مساوياً 0.6663mm، تزايد عمق التحدد بشكل تدريجي مع زيادة عدد دورات التحميل ليصبح مساوياً 0.98mm عند عدد دورات تحميل 100000 كما هو موضح في الجدول (4).

تمّ التنبؤ بعمق التخدد خلال عدد دورات تحميل 1000000، 2000000، 3000000، 4000000، 5000000 عن طريق التعويض في معادلة الارتباط الموضحة في الشكل (17). حيث وصل عمق التخدد إلى 1.80mm خلال 5000000 دورة تحميل وهو عدد حمولات المرور المكافئة خلال العمر التصميمي للرصيف كما هو موضح في الشكل (21).



الشكل (21): يوضح عمق التخدد المتوقع خلال 5 مليون دورة تحميل لنموذج المتحلق الشمالي

عمق التخدد حسابياً من العلاقات التقليدية هو 1.9mm، أما عمق التخدد المتوقع من خلال برنامج الأباكوس هو 1.80mm، النتيجة متقاربتين بشكل كبير، وذلك نتيجة الأخذ بعين الاعتبار قيمة التماسك وزاوية الاحتكاك للطبقة الأسفلتية.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- بالنسبة لنموذج متعلق جبلة زاد عمق التخدد المتوقع خلال العمر التصميمي للرصيف من خلال البرنامج إلى 1.01mm، أما حسابياً كان عمق التخدد 1.2mm (تعليل ذلك ان النماذج الحسابية لا تأخذ بعين الاعتبار الاحتكاك بين الطبقات المشكلة للرصيف)، تمّ مقارنة عمق التخدد المتوقع مع عمق التخدد الحسابي، كانت النتيجة متقاربتان بنسبة 86%، بالتالي النموذج اللدن اللزج يحاكي الواقع بشكل جيد لأنه يعكس السلوك الحقيقي للمواد تحت تأثير الحمولات.
- 2- بالنسبة لنموذج المتحلق الشمالي زاد عمق التخدد المتوقع خلال العمر التصميمي للرصيف من خلال البرنامج إلى 1.8mm، أما حسابياً كان عمق التخدد 1.9mm (تعليل ذلك ان النماذج الحسابية لا تأخذ بعين الاعتبار الاحتكاك بين الطبقات المشكلة للرصيف)، تمّ مقارنة عمق التخدد المتوقع مع عمق التخدد الحسابي، كانت النتيجة متقاربتين بنسبة 95%، بالتالي النموذج اللدن اللزج يحاكي الواقع بشكل جيد لأنه يعكس السلوك الحقيقي للمواد تحت تأثير الحمولات.
- 3- المدد الزمنية تتجاوز ال 15 سنة لحدوث التخدد النهائي، وهذا اتضح من النموذج الحاسوبي باستخدام الأباكوس، ومن المعادلات الحسابية التقليدية.
- 4- قبل البدء ببناء النموذج الرياضي يجب استنتاج البارامترات الحقيقية لمواد الإنشاء باستخدام أجهزة ثلاثي المحاور وتطبيق التحميل الديناميكي والستاتيكي.

5- يجب أن تعتمد التصميم الحديثة لطبقات الرصف استخدام موديل ثلاثي الأبعاد، من أجل الأخذ بعين الاعتبار الأحمال الدورية الحرارية المؤثرة على الرصف حيث أنه نتيجة الأمطار والمواسم يتم تجميع المياه أسفل طبقات الرصف، وخلال أشهر الصيف يحدث تمدد وتقلص ونفاذية حرارية، وبالتالي يحدث هبوط إضافي يجب إضافته إلى الهبوط الناتج عن الأحمال الدورية.

References:

- 1- Dawley, C., Hogewiede, B., and Anderson, K. (1990). "Mitigation Of Instability Rutting Of Asphalt Concrete Pavements In Lethbridge, Alberta, Canada." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 59, Association of Asphalt Paving Technologists, Paul, Minnesota, 1990.
- 2- Hasim, M. S., Hameed, A. M. A., Hye, K. T., Malek, A. F. A., and Mustafa, M. S.. "Interim Guide to Evaluation and Rehabilitation of Flexible Road Pavement." Kuala Lumpur, Malaysia, 1994.
- 3- Miller, J., and Bellinger, W.. "Distress identification manual for the long-term pavement performance program (Fourth Revised Edition)." Rep. FHWA-RD-03-031, Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration, Mclean, VA, 164, 2003.
- 4- Ashworth, L. (2003). "Factors affecting rutting potential of Superpave asphalt mixtures in New Brunswick." M.Sc.E., The University of New Brunswick (Canada), Canada, 2003.
- 5- Ashworth, L. (2003). "Factors affecting rutting potential of Superpave asphalt mixtures in New Brunswick." M.Sc.E., The University of New Brunswick (Canada), Canada, 2003.
- 6- Rutting of Granular Pavements by Gregory Kenneth Arnold Thesis submitted to The University of Nottingham For the degree of Doctor of Philosophy, August 2004.
- 7- Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G.. Soil mechanics in engineering practice, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2005.
- 8- Ali, B. (2006). "Numerical Model for the Mechanical Behavior of Pavement: Application to the Analysis of Rutting." PhD, University of Science and Technology Lille, France, 2006.
- 9- THE DEVELOPMENT OF ASPHALT MIX CREEP PARAMETERS AND FINITE ELEMENT MODELING OF ASPHALT RUTTING, Ludomir Uzarowski, presented to the University of Waterloo, 2006.
- 10- Rutting in Asphalt Pavement under Heavy Load and High Temperature, Zhang Qisen¹, Chen Yu-liang², Li Xue-lian³, University of Science and Technology, Chiling Road 45#, Changsha, Hunan, China, 410076.2009.
- 11- Prediction of Flexible Pavement Degradation: Application to Rutting in Cameroonian Highways, Gilbert Tchémou Geotechnical Engineer, Ph.D., Lecturer ENSET, The University of Douala, Cameroon, 2011.
- 12- Prediction of Rutting in Flexible Pavements using Finite Element Method Department of Civil Engineering, University of Engineering and Technology Peshawar (Bannu Campus), Bannu 28100, Pakistan, 2021.
- 13- Abaqus Analysis, User's Guide, Volume IV, ABAQUS 6.14.