

Modeling the Structural Behavior and Evaluating the Performance of Pavement Layers for Lattakia Airport Using the Finite Element Method

Rouba Adel Mohammed* 

Dr. Rami Hanna**

Dr. Adel Deeb***

(Received 10 / 7 / 2025. Accepted 17 / 9 / 2025)

□ ABSTRACT □

The problems associated with flexible pavement deformation have been incompletely resolved for decades due to the difficulty of linking the properties of the pavement materials and pavement thicknesses, as well as the interrelationship between the various layers comprising them, particularly using traditional relationships and methods. However, over the past decades, mathematical methods, most notably the finite element method.

In this study, the pavement layers at Lattakia Airport were modeled and analyzed using Plaxis 2D software to investigate the impact of the large wheel loads generated by heavy aircraft wheels and the effects resulting from repeated application through the response and interaction of the pavement layers.

The results of modeling the flexible pavement layers on the eastern runway of Lattakia International Airport showed that they failed to receive modern aircraft such as the design aircraft B:747-400 due to the unacceptable value of the resulting subsidence 6.11 mm. Therefore, a new model was proposed with reinforcing the pavement layers with geogrid which reduces the subsidence in the pavement layers to 3.4 mm, reduces the stress affecting the pavement layers.

Keywords: Flexible pavement, stresses, deformations, translations, finite element

Copyright



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

* Postgraduate Student (Master) - Department of Transportation Engineering - Faculty of Civil Engineering - Lattakia University (Formerly Tishreen) - Lattakia - Syria.
roubamohamad14@gmail.com

** Associate Professor- Transportation Engineering Department- Civil Engineering Faculty- Lattakia University (Formerly Tishreen) - Lattakia-Syria.

*** Associate Professor - Transportation Engineering Department- Civil Engineering Faculty- Lattakia University (Formerly Tishreen) - Lattakia- Syria.

نمذجة السلوك الإنشائي وتقييم أداء طبقات الرصف لمطار اللاذقية باستخدام طريقة العناصر المحددة

ربا عادل محمد *

الدكتور رامي حنا **

الدكتور عادل ديب ***

تاريخ الإيداع 2025 / 7 / 10. قُبِلَ للنشر في 2025 / 9 / 17

□ ملخّص □

تُعتبر المشاكل المرتبطة بتشوّه الرصف المرن من الأمور التي كانت الحلول الموضوعية لها غير كاملة على مدى عقود بسبب صعوبة ربط خواص المواد المُشكّلة للرصف وسماكات الرصف وكذلك العلاقة المتبادلة بين الطبقات المتنوّعة المُشكّلة لها خاصة باستخدام العلاقات والطرائق التقليدية. لكن خلال العقود الماضية، تمّ بنجاح استخدام طرائق رياضية ومن أهمّها طريقة العناصر المحددة.

في هذه الدراسة تمّ نمذجة وتحليل طبقات الرصف في مطار اللاذقية باستخدام برنامج Plaxis 2D ، من أجل التحقق من تأثير حمولة العجلات الكبيرة الناتجة عن دواليب الطائرات الثقيلة والتأثيرات الناتجة عن تكرار تطبيقها من خلال استجابة وتفاعل طبقات الرصف معها.

عند نمذجة المهبط الشرقي في مطار اللاذقية الدولي أوضحت طبقات الرصف المرن فشلها في استقبال الطائرات الحديثة كالطائرة التصميمية B:747-400 نظراً لقيمة الهبوط الحاصل الغير مسموح (6.11mm)، لذلك تمّ اقتراح تسليح طبقات الرصف بالجيوجريد الذي قلّل الهبوط الحاصل في طبقات الرصف إلى 3.4mm وقلّل الإجهاد المؤثر على طبقات الرصف.

الكلمات المفتاحية: الرصف المرن، الإجهادات، التشوهات، الانتقالات، طريقة العناصر المحددة



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب

الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة المواصلات والنقل - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سورية.

roubamohamad14@gmail.com

** أستاذ مساعد - قسم هندسة المواصلات والنقل - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سورية.

*** أستاذ مساعد - قسم هندسة المواصلات والنقل - كلية الهندسة المدنية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

طبقات الرصف تشغل حيزاً كبيراً من مدة وكلفة الإنشاء، وتكلفة إنشائها قد تصل حتى 70% من تكلفة إنشاء المهبط في المطار، فهذه الطبقات يجب أن تتمتع بمتانة وصلابة عالية وثوَمَن الاستخدام الآمن لها من قِبَل الطائرات الثقيلة والخفيفة على مدى عمر تصميمي معين، فالحلول الإنشائية والتصميمية لهذه الطبقات لا تعطي حلول مثلى لتصوير أداء طبقات الرصف وخاصةً عندما يكون الوضع الجيوتكنيكي الهندسي في أساسات المهابط مُعقداً، لكن ظهرت في العقود الأربعة الأخيرة طرائق عددية ساهمت في وضع الحلول الدقيقة لطبقات الرصف المرنة والصلب للمطارات والطرق على حدٍ سواء، ومن هذه الطرائق طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method) التي تدرس السلوك غير الخطي للمواد المشكّلة لطبقات الرصف و تتنبأ بدوام العمل الجيد للطبقات خلال عمر تصميمي معين [1].

تظهر أهمية طريقة العناصر المحددة بشكل كبير في دراسة المطارات، حيث أنّ طبقات الرصف المرنة والصلبة تتعرض لعدة عوامل تُسبب حدوث تشوهات وتصدعات في الطبقة العليا للرصف ومنها الحمولات الكبيرة الناتجة عن دواليب الطائرات والتأثيرات الناتجة عن تكرار تطبيقها [2-3].

بالإضافة للعوامل المناخية وأهمها اختلاف درجات الحرارة، سوء نظام التصريف المائي وتجمّع مياه الأمطار فوق الطبقة العليا للرصف، فيجب معرفة تلك التشوهات والتشققات التي يمكن أن تحدث في مهابط الطيران وأخذها بعين الاعتبار أثناء تصميم طبقات الرصف وتحديد سماكتها وأنواع المواد المستعملة ومواصفاتها وكذلك معرفة عجز مستوى الأداء وأسباب حدوثه من أجل التقليل من عمليات الصيانة المُرهقة والمُكلفة أثناء مرحلة الاستثمار [4].

في بحثنا هذا ركّزنا على طريقة العناصر المحددة في نمذجة مهابط الطيران المرنة في مطار اللاذقية الدولي باستخدام برنامج PLAXIS 2D الذي يسمح لنا بتحليل الإجهادات والتشوهات والانتقالات في طبقات الرصف تبعاً لتغيّر معاملات الطبقات من مُعامل المرونة ومُعامل بواسون والتماسك وزاوية الاحتكاك لضمان الدقة في التحليل والحساب.

أهمية البحث وأهدافه:**إشكالية البحث (Research Problem):**

الطريقة الكلاسيكية المستعملة في دراسة طبقات الرصف لا تأخذ بعين الاعتبار تغيّر الإجهادات بين طبقة وأخرى أو عند سطوح الفصل أو الانتقال وهذا قد يُسبب عدم دقة في حساب سماكات طبقات الرصف وبالتالي قد يكون لدينا سماكات إضافية تزيد من كلفة الإنشاء، علماً أنّ الطرائق الحديثة تأخذ بعين الاعتبار الأحمال المتكررة باستخدام نظرية المرونة واللادونة بحيث تضمن الحد من تشقّق وتصدّع الطبقات تحت تأثير إجهادات الشد.

لازالت أساليب التصميم والتقييم محلياً تعتمد على طرائق تقليدية غير دقيقة مما يدفعنا للبحث عن نماذج قادرة على تحليل طبقات الرصف بشكل دقيق.

أهمية البحث (The importance of research):

طبقات الرصف لمهابط الطائرات وساحات الوقوف في مطار اللاذقية تُعاني من مشاكل واضحة على سطح طبقات الرصف بشكل شقوق وتصدعات سطحية وعميقة المنشأ، وهذا دفعنا لإجراء تحليل إنشائي لطبقات الرصف باستخدام طريقة العناصر المحددة، أي وضع آلية فعّالة لتقييم أداء طبقات الرصف تعتمد على البرمجيات الحاسوبية (حساب الإجهادات والتشوهات والانتقالات في الجملة الإنشائية المشكّلة لطبقات الرصف) وتحديد المشاكل التي تُعاني منها

طبقات الرصف في مطار اللاذقية الدولي وتحديد أسباب حدوثها والتنبؤ بتطور هذه المشاكل مع الزمن وتكوين رؤى حول المواقع الحرجة في بنية الرصف استناداً إلى البرمجيات ومن ثمّ تقليل كلف الصيانة على المدى الطويل بعد تحديد مسببات العيوب والمساعدة في تصميم هياكل ومواد أكثر فاعلية.

أهداف البحث (Research objectives):

وضع نماذج رياضية باستخدام طريقة العناصر المحددة تمكّنا من التوصل إلى التحليل الإنشائي لطبقات الرصف في مطار اللاذقية وبالتالي تحديد أسباب العجز في طبقات الرصف ومنشأ التشوهات فيها.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد البحث على نمذجة مهبط الرصف المرن باستخدام طريقة العناصر المحددة (FEM) بتطبيق برنامج PLAXIS 2D الذي يؤمّن تحليل ودراسة تشوهات التربة والصخور تحت تأثير الحمولات المختلفة، إضافةً إلى دراسة مختلف المنشآت الترابية ويتألف البرنامج من أربعة برامج رئيسية .

1. برنامج الإدخالات (INPUT PROGRAM): يتم في هذه المرحلة توصيف البارامترات والمعطيات الأساسية اللازمة لتوصيف المسألة قيد الدراسة وتشمل تحديد أبعاد وشكل النموذج الهندسي، وإدخال خصائص المواد المختلفة المؤلفة للنموذج، وتعريف نظام التحميل المؤثر، بالإضافة إلى تحديد الشروط الحدودية والشروط الابتدائية للمسألة المدروسة، بما فيها المياه الجوفية في حال وجودها.

2. برنامج الحساب والمعالجة (CALCULATION PROGRAM): يتم نمذجة المراحل المختلفة لإنشاء المشروع في الواقع بشكل دقيق، مما يساعد على حساب إجهادات وتشوهات كل مرحلة على حدة إضافةً إلى أنّه يُوفّر إمكانية تحليل أمان المنشأ العام وحساب عوامل الأمان.

3. برنامج المخرجات (OUTPUT PROGRAM): وهي مرحلة ما بعد المعالجة، التي تختص بإخراج نتائج الحسابات، حيث تُعرض تشوهات النموذج المدروس والإجهادات المؤثرة فيه بمختلف أشكالها، كما يُوفّر البرنامج إمكانية عرض نتائج المخرجات ضمن جداول.

4. برنامج المنحنيات (CURVES PROGRAM): يُعرض منحنيات العلاقة بين الحمولات - التشوهات الإجهادات - التشوهات النسبية، ومسارات الإجهادات والتشوهات، في نقاط مُختارة من النموذج الهندسي إضافةً إلى إمكانية عرض تورّع ضغوط المياه الجوفية، كما أنّ البرنامج يُوفّر إمكانية اختيار مقاطع عرضية لعرض توزع الإجهادات، التشوهات، والقوى المؤثرة في الجسم الترابي أو العناصر الإنشائية المستخدمة في الموديل المدروس [5].

منطقة الدراسة:

نبذة عن مطار اللاذقية الدولي:

يُعتبر مطار اللاذقية من ثالث المطارات السورية من حيث الأهمية والميناء الجوي الوحيد في المنطقة الساحلية و رديف لمطار دمشق الدولي، يقع على بعد 25km إلى جنوب مدينة اللاذقية، وعلى بعد 6km من مدينة جبلة، عُرف سابقاً باسم مطار حميميم نسبةً للقرية المجاورة التي أنشئ فيها، وقد تمّ تدشين صالة الركاب فيه منذ عام 1983 وتمّ تدشين المبنى الفني وبرج المراقبة عام 1989، تُقدّر مساحته الإجمالية 1.6 m^2 مليون ومساحة ساحاته حوالي 82000 m^2 ، طاقته الاستيعابية أربع طائرات وطول المهبط 3100m وقد تمّ إنشاء مهبط موازي للمهبط السابق بطول 3600m

ويعرض 45m إضافةً لتقوية المهبط وإنشاء مبنى جديد للركاب ومستودعات شحن وممرات مع ساحة وقوف جديدة، وأخيراً بناء قاعة شرف جديدة في المطار، وتُقدَّر طاقته السنوية بـ 5000000 راكب ويوضح الشكل رقم 1 الموقع الجغرافي للمطار



الشكل رقم (1): يوضح الشكل الموقع الجغرافي لمطار اللاذقية

تمت عملية النمذجة تحديداً للمهبط الشرقي ذي الرصف المرن وتطبيق منهجيات البرنامج في تحليل ودراسة طبقات رصف المهبط الشرقي لمعرفة السلوك الإنشائي لها وتحليل الإجهادات والتشوهات والانتقالات وتحديد أسباب العجز في طبقات الرصف ومنشأ التشوهات فيها نتيجة عمليات إقلاع وهبوط الطائرات الحديثة B:747-400 .

منهجية البحث:

- نمذجة رقمية لطبقات رصف مهبط الطائرات المرن بالاعتماد على المعلومات السابقة باستخدام طريقة العناصر المنتهية واقتراح نماذج رياضية لسلوك المادة تأخذ بعين الاعتبار العوامل الأساسية وتحليل الإجهادات والتشوهات في الجملة الإنشائية الحالية لطبقات رصف مطار اللاذقية الدولي.
- استخدام نتائج التجارب على مواد الرصف الموجودة في دراسات مهبط الطائرات الشرقي في مطار اللاذقية وتوصيفها لتصبح بارامترات الموديل الرياضي الحالي لطبقات الرصف المرن كل على حدة.
- بناء النموذج الرياضي لطبقات الرصف المرنة.
- استنتاج جميع العوامل التي أدت إلى حدوث التشوهات في طبقات الرصف إن كانت تشوهات عميقة أو سطحية وبالتالي تقييم أداء هذه الطبقات والتنبؤ بسلوكها المستقبلي ووضع الحلول المثلى لها.
- معالجة النتائج وتقديم المقترحات والتوصيات.

المواد والبيانات اللازمة:

أولاً: البيانات

- جمع البيانات عن تشكيلة طبقات الرصف المرن لمهبط الطائرات الشرقي ذي الرصف المرن.
 - تحديد الخواص الهندسية والإنشائية لمواد طبقات الرصف كلاً على حدة.
 - جمع البيانات المتعلقة بمواصفات الطائرة التصميمية B:747-400 [6].
- من خلال الاستطلاع المحلي والزيارات العديدة لمطار اللاذقية عام (2023-2024) تم جمع البيانات عن تشكيلة طبقات الرصف المرن للمهبط الشرقي كما تم الإطلاع على المشاكل التي اعترضت استخدام المهابط من قبل الطائرات

الحديثة مثل B:747-400 (معاينة حقلية للتشوهات الحاصلة في المهبط)، حيث يُبين الجدول رقم 1 خواص المواد المكونة لطبقات الرصف.

الجدول (1) المواصفات الفنية للمواد المكونة لطبقات الرصف

التماسك	زاوية الاحتكاك (درجة)	كثافة رطبة kpa	كثافة جافة عظمى kpa	معامل بواسون	معامل المرونة Kg/cm ²	السماكة cm	نوع الموديل	
-	-	24	24	0.3	25000	11	خطي مرن	طبقة إسفلت مُعدّل بالبوليمر (SBS)
-	-	23	23	0.3	15000	10	خطي مرن	طبقة إسفلت عادي
1	40	22	21	0.33	5000	50	مور كولومب	طبقة الأساس الحصوي
1	35	20	19	0.33	3000	45	مور كولومب	طبقة ما تحت الأساس
1	35	18	16	0.33	2000	20	مور كولومب	طبقة فلتر
40	25	20	17	0.35	1000	50	مور كولومب	تربة المسار
37	17	17	15	0.35	800	-	مور كولومب	الطابق الترابي

وفق ما دُكر في الجدول رقم 1 إنَّ طبقة الإسفلت السطحية مُعالجة باستخدام بوليمر من نوع SBS (Styrene Butadiene Styrene) الذي يُعطي سلوكاً مرناً لئلاَّ للإسفلت بحيث يُحقّق الصلابة العالية في درجات الحرارة المرتفعة والمرونة عند الدرجات المنخفضة، ويُحسّن مقاومة التشوه عند درجات الحرارة العالية كما يقلّل التشققات الانعكاسية و يُطيل من عمر الرصف [7,8].

إعداد بيانات الطائرة:

يُبين الجدول رقم 2 مواصفات الطائرة التصميمية B:747-400

الجدول رقم (2) مواصفات الطائرة التصميمية

الأبعاد بين الدواليب cm			ضغط النفخ Kg/cm ²	عدد الدواليب	حمولة الدواب kg	حمولة المجموعة الرئيسية kg	حمولة اجمالية Kg
A1	A _d	A _s					
112	95.2	184.8	14	4	28390.6	90850	386900

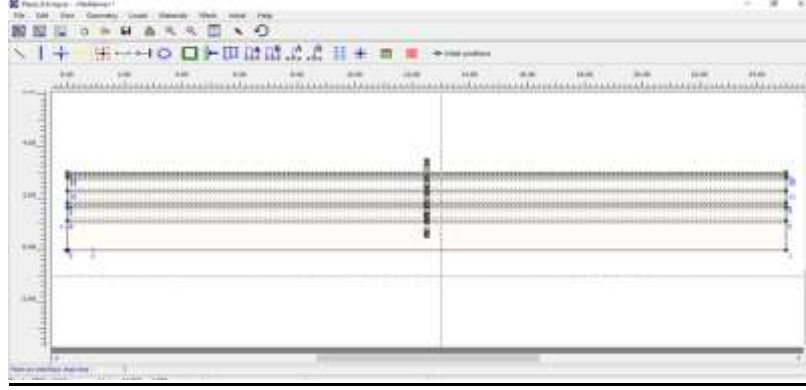
ثانياً: الأدوات والبرامج المستخدمة:

تمَّ استخدام برنامج PLAXIS 2D لنمذجة موديلات المهبط الشرقي (الرصف المرن) في مطار اللاذقية الدولي بهدف تحليل الجملة الإنشائية لطبقات الرصف بعد تحليل الإجهادات والتشوهات والانتقالات فيها.

استناداً إلى كل المعطيات السابقة يمكن بناء النماذج لطبقات الرصف للمهبط الشرقي وفق ما يلي:

بناء النموذج للمهبط الشرقي القائم:

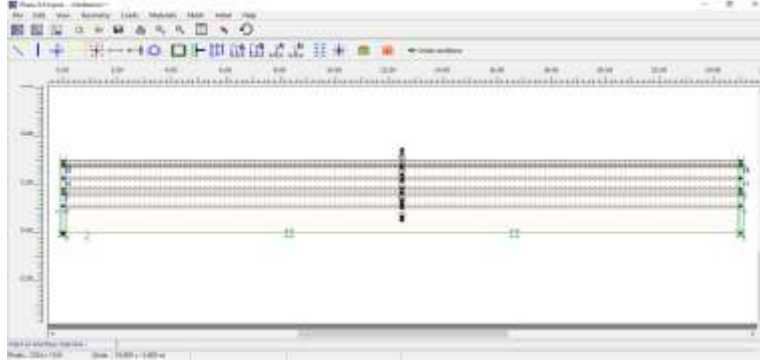
تمَّ بناء النموذج التجريبي بعرض 25 m وعمق 10m وتقسيم الطبقات وفق السماكات المذكورة في الجدول رقم 1 مع افتراض وجود سطح فاصل بين كل طبقة وأخرى حيث يُوضّح الشكل رقم 2 النموذج ضمن بيئة عمل البرنامج في مرحلة الإدخالات:



الشكل رقم (2): يوضح النموذج المدروس ضمن بيئة عمل برنامج المدخلات

تعيين الشروط الحدودية:

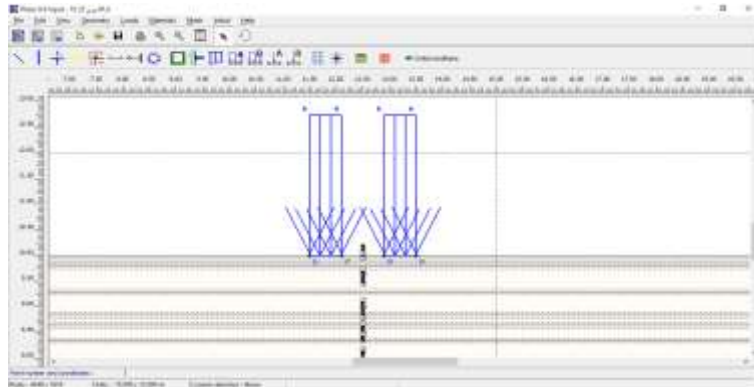
نفترض أن يكون الحد السفلي للطبقة التحتية ثابتاً (تقييد الحركة أفقياً و شاقولياً) أما الحدود الشاقولية للنموذج فهي مُقيّدة أفقياً فقط كما في الشكل رقم 3 :



الشكل رقم (3): يوضح الشروط الحدودية للنموذج

ظروف التحميل:

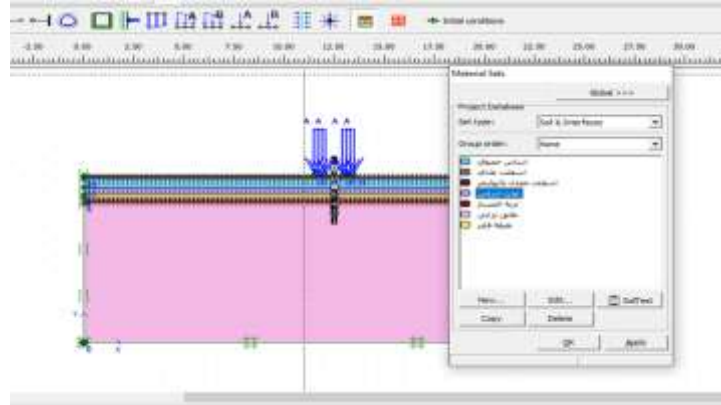
من أجل محاكاة ظروف التحميل تم اعتبار منطقة تماس الإطارات في هذه النمذجة منطقة مستطيلة الشكل مكافئة (60cm) بالمقطع للمجموعة الواحدة المكونة من أربع عجلات، حيث استُخدم في هذه الدراسة ضغط مُوحّد للإطارات (1400Kpa) ومع إهمال تأثير الصلابة لجدار الإطار فإن ضغط تماس الإطار على المهبط يساوي ضغط النفخ للإطار. تم تطبيق ضغط النفخ كحمولة موزعة على مسافة 0.6m لكل مجموعة من الدواليب مع وجود فاصل قدره 0.8m بين محوري الدواليب المجموعة الرئيسية كما هو موضح في الشكل رقم 4 :



الشكل رقم (4): يوضح شكل الحمولة المؤثرة على الرصف

تعيين مواصفات خواص المواد:

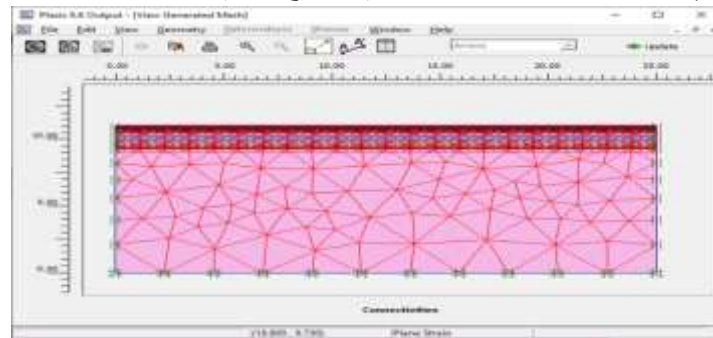
يتم تعريف المواد المستخدمة في كل طبقة من الرصف على أنها عناصر صلبة ثم نسب هذه الخصائص إلى الشكل الهندسي للنموذج وتعريف الطبقات كما هو موضح في الشكل رقم 5:



الشكل رقم (5): يوضح طبقات النموذج المدروس

تعيين الشبكة:

يتم توليد الميش (Mesh) أي شبكة العناصر المحددة، حيث يقوم البرنامج بتقسيم التربة لعناصر مثلثية كما في الشكل رقم 6 :



الشكل رقم (6): يوضح توليد شبكة العناصر المحددة المتولدة في المقطع المدروس

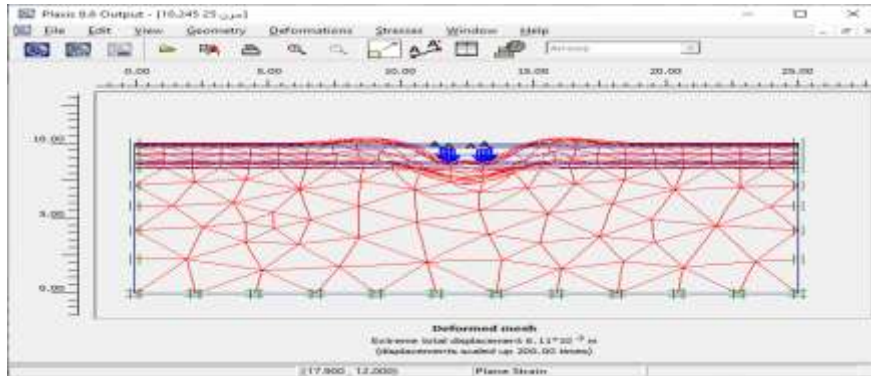
توليد الشروط الابتدائية للتربة (الإجهادات الابتدائية للتربة وضغط الماء المسامي) للوصول لمرحلة الحساب حيث يتم تعريف كل طبقة على حدة ثم توليد شبكة العناصر المحددة لكامل الطبقات لكي تبدأ مرحلة التحليل، يوضح الشكل رقم 7 عامل الأمان للموديل المدروس والبالغ 1.15:



الشكل رقم (7): يوضح مراحل التحليل وعامل الأمان

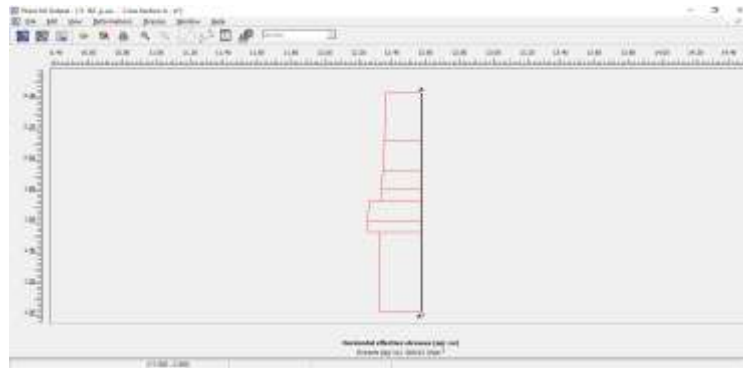
مرحلة المخرجات:

يُوضّح الشكل رقم 8 أكبر انتقال حاصل في طبقات الرصف والبالغ 6.11mm مُتركَز بقيمته العظمى تحت العجلات.



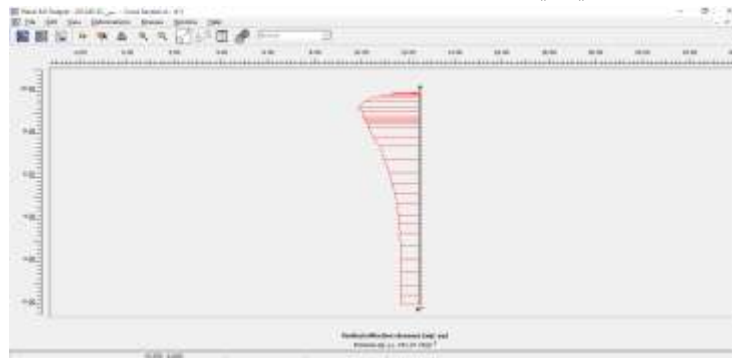
الشكل رقم(8): يُوضّح الانتقال الكلي في طبقات الرصف

يُوضّح الشكل رقم 9 قيمة الإجهاد الأفقي في المنطقة الحرجة حيث بلغ 269 Kpa تحت العجلات



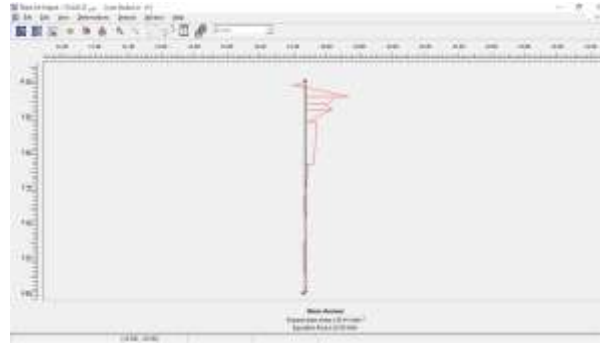
الشكل رقم (9): يُوضّح مخطّط الإجهاد الأفقي σ_{xx}

يُوضّح الشكل رقم 10 الإجهاد الشاقولي في المنطقة الحرجة 751kpa ونلاحظ تناقص تأثير الإجهاد مع زيادة العمق



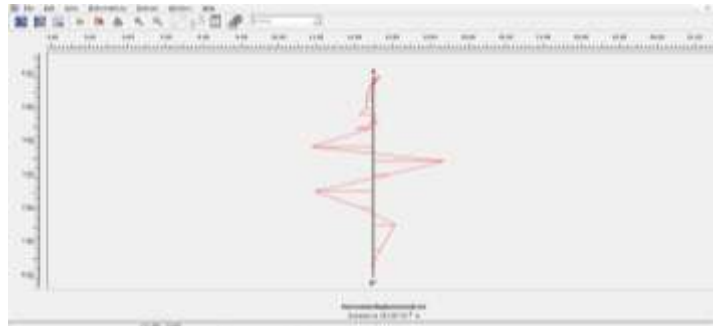
الشكل رقم(10): يُوضّح مخطّط الإجهاد الشاقولي σ_{yy}

يُوضّح الشكل رقم 11 إجهاد القص في المنطقة الحرجة 139 kpa



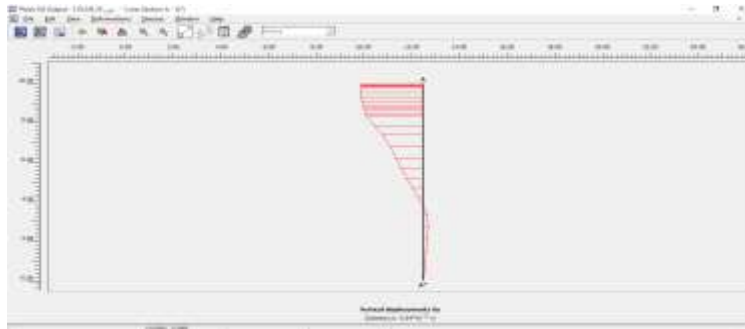
الشكل رقم (11): يُوضِّح مُخَطَّط إجهاد القص τ_{xy}

كما تُبين في الشكل رقم 12 مُخَطَّط الانتقال الأفقي في المنطقة الحرجة والبالغ 0.19mm .



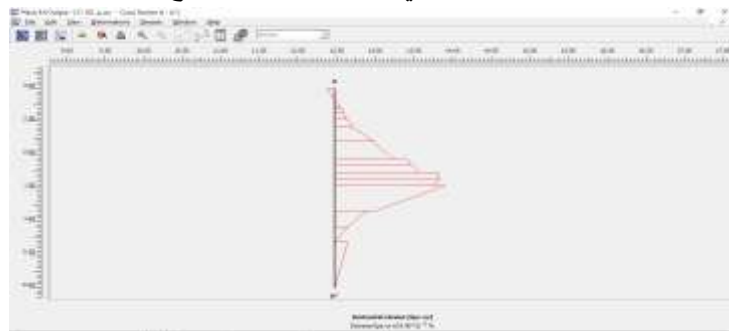
الشكل رقم (12): يُوضِّح مُخَطَّط الانتقال الأفقي

يُوضِّح الشكل رقم 13 مُخَطَّط الانتقال الشاقولي في المنطقة الحرجة والبالغ 5.64mm .



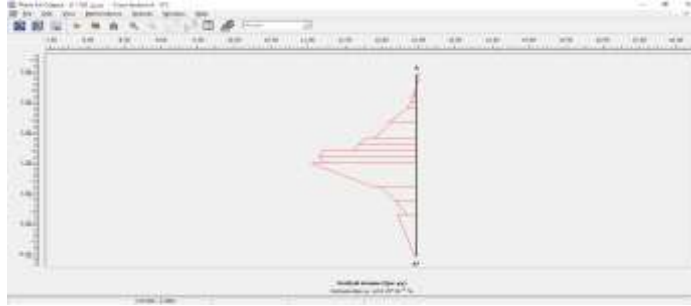
الشكل رقم (13): يُوضِّح مُخَطَّط الانتقال الشاقولي

كما تُبين في الشكل رقم 14 مُخَطَّط التشوهات الأفقية في المنطقة الحرجة والبالغ 0.63% .



الشكل رقم (14): يُوضِّح مُخَطَّط التشوهات الأفقية EPS_{xx}

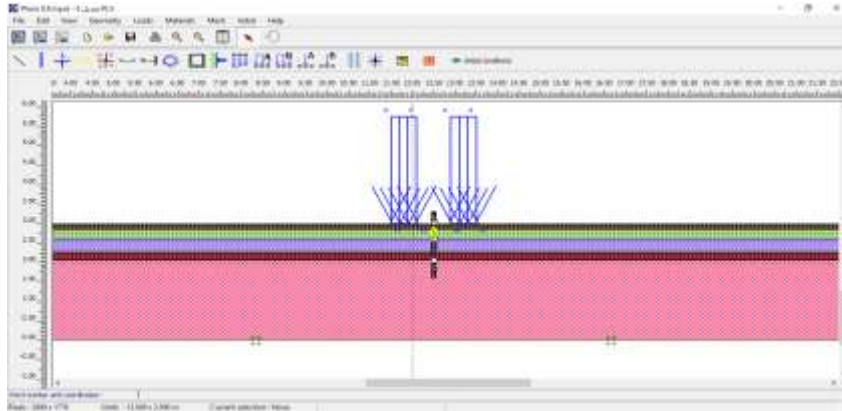
يُوضِّح الشكل رقم 15 مُخَطَّط التشوهات الشاقولية في المنطقة الحرجة والبالغ 0.67% .



الشكل رقم (15): يوضح مخطط التشوهات الشاقولية EPS

نلاحظ مما سبق أنّ نتائج النمذجة الحاسوبية للمهبط الشرقي الحالي ذي الرصف المرن تُؤكّد أنّ طبقات الرصف لا تُحقّق المواصفات الفنية للتصميم ومن الواضح أنّ الرصف غير مُلائم وليس قادراً على تحمل مرور الطائرة وذلك يُبرّر وجود عمليات صيانة مستمرة للمهبط نتيجة للهبوطات التي تجاوزت 3mm أي أنّ المهبط لا يمكنه استقبال الطائرة التصميمية Boeing 747-400 وإلا سيكوّن المهبط عرضةً للتشوهات المتصاعدة مع الزمن إلى أن يخرج نهائياً من الخدمة [9].

تعديل ونمذجة المهبط للتغلب على مشاكل التشوهات ليُصبح قادراً على استقبال الطائرة Boeing 747-400
طريقة الحل المُقترحة هي تسليح النموذج السابق مع الحفاظ على السماكات وخصائص المواد الداخلة في النموذج السابق، حيث تمّ إدراج شبكة جيوغريد صناعي ضمن الطبقات في موضعين مُوضحين في الشكل رقم 16.



الشكل رقم (16): يوضح الشكل النموذج المسلح بالجيوغريد ضمن بيئة عمل البرنامج

الموضع الأوّل للتسليح: في التلّث السّفلي من طبقة الإسفلت الوسطى لِمَنع تضرُّر شبكات الجيوغريد أثناء عمليات الكشط والصيانة أو الاستبدال المُستقبلي للطبقة السطحية [10].

تمّ تسليح طبقة التغطية الإسفلتية بشبكات من GlasGrid CG(100*100 kn/m) الذي يُعطي مقاومة مكافئة (80*80 kn/m) عند استطالة 2% وذلك للحد من الشقوق الانعكاسية والتخدد تحت تأثير الحمولات الثقيلة [12,11].

الموضع الثاني للتسليح: في مُنتصف طبقة الأساس الحصوي، حيثُ أثبتت الدراسات أنّ وجود الجيوغريد تُنأئ المحاور في طبقة الأساس يُعزّز التشابك بين الحصويات مما يزيد صلابة الطبقة و ينعكس ذلك على انخفاض الهبوط والتشوه وتحسين الأداء البنيوي الكلي للرصف [13,14,15,16].

تمّ تسليح طبقة الأساس الحصوي بشبكات من Basetrac Grid (PP or PET 80*80 kn/m) HUESKER ثنائية المحاور بفتحات مربعة أو مستطيلة الشكل مع ضبط فتحة الشبكة وفق مقياس الحصويات الأصغري لتأمين التشابك الجيد [17].
يُظهر الشكل رقم 17 نوعي الجيوغريد المستخدم لتسليح كل من طبقة التغطية الإسفلتية و طبقة الأساس الحصوي على الترتيب.



الشكل رقم (17): يوضح شكل شبكات الجيوغريد المستخدمة لتسليح طبقتي التغطية الإسفلتية والأساس الحصوي
أما خصائص مادة الجيوغريد المستخدمة في تسليح طبقتي التغطية الإسفلتية والأساس الحصوي المدخلة ضمن بيئة عمل برنامج المدخلات موضحة في الجدول رقم 3.

الجدول 3 خواص الجيوغريد الصناعي المستخدم

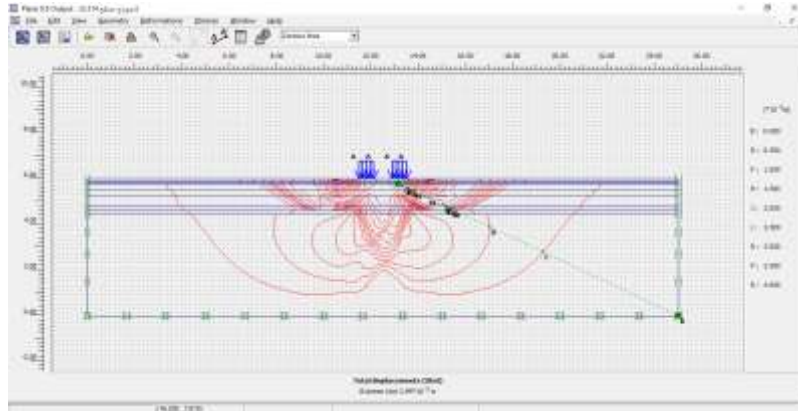
المادة	موديل المادة	مقاومة الشد القصوى (KN/m) (القيمة المطلوبة لمدخلات البرنامج)
جيوغريد صناعي	خطي - مرن	81.55

تمّت عملية الحساب والتحليل وفق ثلاث مراحل حيث يُظهر الشكل رقم 18 عامل الأمان للموديل المدروس
MSF=1.53



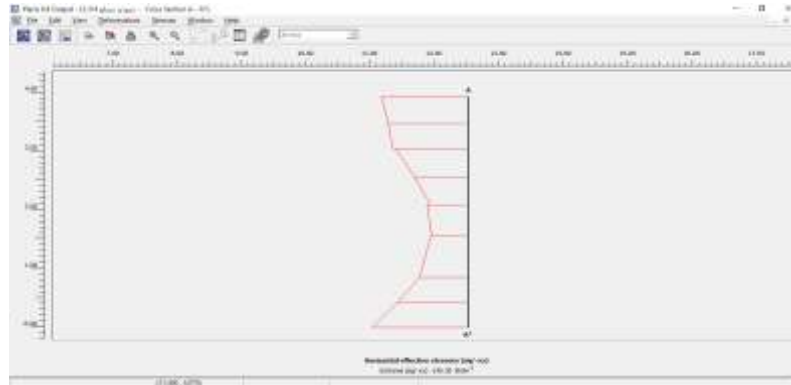
الشكل رقم (18): يوضح مراحل التحليل وعامل الأمان

في مرحلة المُخرجات يُظهر الشكل رقم 19 أكبر انتقال حاصل في طبقات الرصف للنموذج المسلح بالجيوغريد الصناعي حيث بلغت قيمته 3.9 mm تحت مركز تطبيق كل من الحمولتين وينخفض باتجاه العمق لينعدم عند الحدود الطرفية.



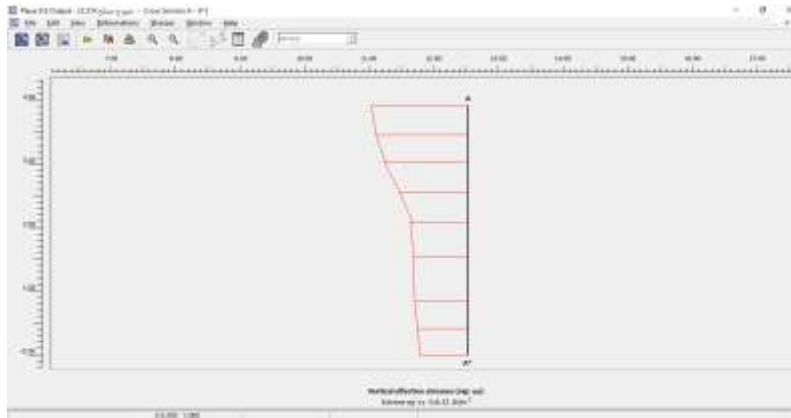
الشكل رقم (19): يوضح الانتقال الكلي في طبقات الرصف

أما نتائج الإجهادات و الانتقالات والتشوهات في المنطقة الحرجة مبينة في المخططات التالية:
يُوضَّح الشكل رقم 20 الإجهاد الأفقي الأعظمي في المنطقة الحرجة 140 kpa



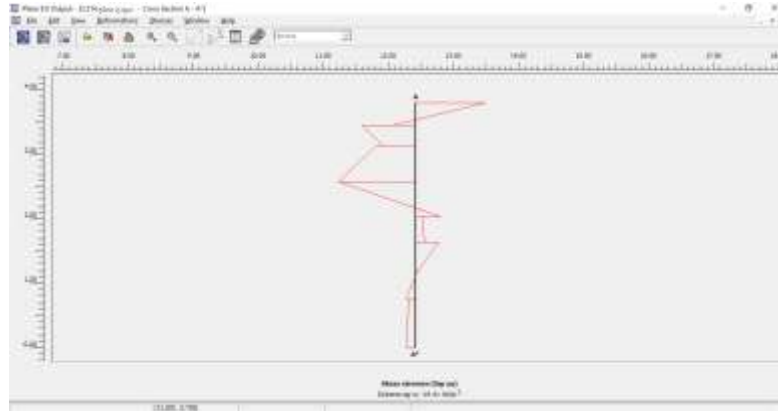
الشكل رقم (20): يوضح مخطط الإجهاد الأفقي σ_{xx}

يُوضَّح الشكل رقم 21 الإجهاد الشاقولي في المنطقة الحرجة 516 kpa ويتناقص الإجهاد مع زيادة العمق



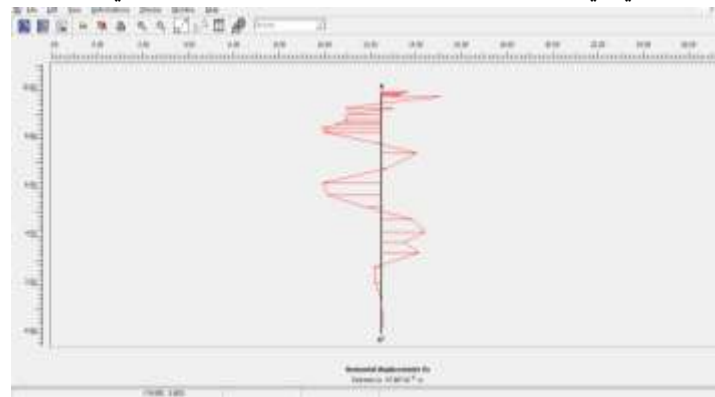
الشكل رقم (21): يوضح مخطط الإجهاد الشاقولي σ_{yy}

يُوضَّح الشكل رقم 22 إجهاد القص في المنطقة الحرجة 19 kpa

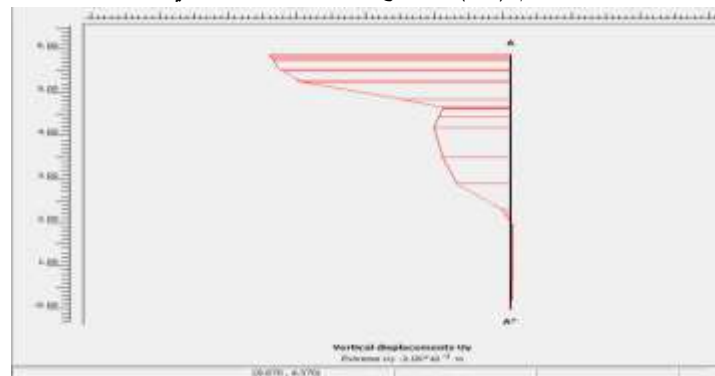


الشكل رقم (22): يُوضِّح مُخَطَّطُ إجهاد القص τ_{xy}

يُوضِّح الشكل رقم 23 الانتقال الأفقي في المنطقة الحرجة 0.047mm، أما الانتقال الشاقولي 2mm مُبيَّن في الشكل رقم 24.

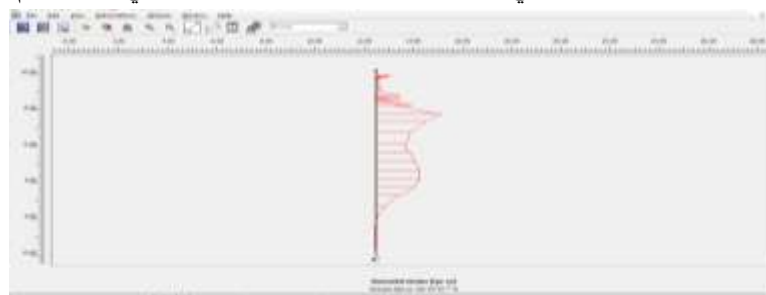


الشكل رقم (23): يُوضِّح مُخَطَّطُ الانتقال الأفقي U_x



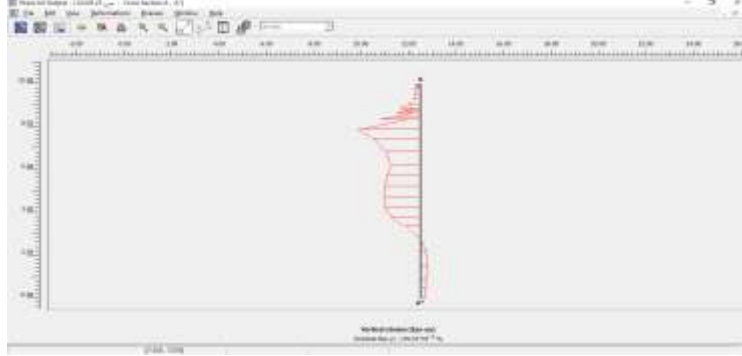
الشكل رقم (24): يُوضِّح مُخَطَّطُ الانتقال الشاقولي U_y

نتيجة الإجهادات الأفقية تتولَّد تشوهات أفقية في طبقات الرصف 0.15% مُوضحة في الشكل رقم 25



الشكل رقم (25): يُوضِّح التشوهات الأفقية المتولدة في طبقات الرصف EPS-XX

كما يُظهر الشكل رقم 26 التشوهات الشاقولية المتولدة في طبقات الرصف 0.18%



الشكل رقم (26): يوضح التشوه الشاقولي المتولد في طبقات الرصف EPS-YY

يمكننا تلخيص نتائج النمذجة للمهبط الشرقي ذي الرصف المرن ضمن الجدول رقم 4 الذي يوضح أهم الفروقات الكمية لنتائج (الإجهادات-الانتقالات-التشوهات-عامل الأمان) بين النموذج القائم و النموذج المقترح وذلك في المنطقة الحرجة (بين نقطتي تمرکز عجلات الطائرة).

الجدول 4 مقارنة نتائج النمذجة للمهبط الشرقي (النموذج القائم والنموذج المقترح)

وجه المقارنة	مخرجات النمذجة للمهبط الشرقي (النموذج القائم)	مخرجات النمذجة للمهبط الشرقي (النموذج المقترح)
الانتقال الشاقولي (mm) Uy	5.64	2
الانتقال الأفقي (mm) Ux	0.19	0.047
الإجهاد الشاقولي (kpa) σ_y	751	516
الإجهاد الأفقي (kpa) σ_x	269	140
إجهاد القص (kpa) τ_{xy}	139	19
التشوه الشاقولي (%) ξ_{yy}	0.67	0.18
التشوه الأفقي (%) ξ_{xx}	0.63	0.15
عامل الأمان MSF	1.15	1.53

النتائج والمناقشة:

مناقشة نتائج الدراسة:

- بناءً على عملية النمذجة السابقة لطبقات الرصف للمهبط الشرقي ذي الرصف المرن تبين أن الحل الأمثل لتقليل الهبوطات والتشوهات الحاصلة في طبقات الرصف بعد عمليات هبوط وإقلاع الطائرات الحديثة B:400-747 هو تسليح طبقات الرصف بالجيوريد الصناعي (تسليح طبقة التغطية الإسفلتية الأساس وطبقة الأساس الحصوية).
- تسليح طبقات الرصف يُقلل الهبوط الشاقولي الحاصل في الطبقات السطحية من 5.64mm إلى 2mm أي أن وجود الجيوريد الصناعي سيقلل معدل انتشار الشقوق في الطبقات السطحية بشكل جيد [18].
- تسليح طبقات الرصف بالجيوريد الصناعي (ثنائي المحاور) يُقلل التشوه الشاقولي المتولد في طبقات الرصف من 0.6% إلى 0.18% ، أي سوف تتمتع الطبقات بفائدة إضافية من خلال تحمل حمولات أكبر وتأخير ظهور التشوهات في طبقات الرصف مما يزيد من عمر خدمة هيكل الرصف [19-20].

- يظهر الأثر الاقتصادي لتسليح طبقات الرصف بالجيوجريد الصناعي من خلال توفير استثمار أعلى وعمر خدمة أطول، مقاومة أفضل للتشققات الانعكاسية حيث يُؤخَّر ظهورها بنسبة تزيد عن 50% وبضائع الفترة الزمنية بين الإصلاحات الدورية من (5-7) سنوات إلى (10-12) سنة، أي تقليل كلف الصيانة الدورية بنسبة 40-60% على مدى 20 سنة وتقديم استدامة بيئية أفضل (تقليل استهلاك البيتومين والحصويات) بالمقارنة مع الحلول التي ستعتمد على زيادة سماكة الطبقات الإسفلتية التي ستظهر بها التشققات بعد (5-7) سنوات مما يتطلب إعادة صيانة للطبقة السطحية والحاجة لكلفة مالية كبيرة بتكرار عمليات الصيانة خلال هذه المدة [21].
- كلُّ ماسبق يمكن تأكيده من خلال تحسُّن عامل الأمان من 1.15 إلى 1.5 وهذا يثبت فعالية الجيوجريد في تحسين أداء الرصف وتقليل عمليات صيانته بعد هبوط وإقلاع الطائرات الحديثة B:747-400.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. أثبتت عملية النمذجة للمهبط الشرقي الحالي ذي الرصف المرن أنَّ طبقات الرصف لا تُحقِّق المواصفات الفنية والمهبط ليس قادراً على تحمُّل مرور الطائرة التصميمية B:747-400 ، حيث أنَّ حمولة الطائرة هذه تسببت مع الزمن بمشاكل للمهبط.
2. تعديل المهبط الشرقي بتسليح طبقات الرصف بالجيوجريد الصناعي خفَّض الهبوط في الطبقات السطحية بشكل كبير حيث انخفض الهبوط الشاقولي من 5.64mm إلى 2mm.
3. تسليح طبقات الرصف بالجيوجريد الصناعي يُوفِّر سماكة أقل للطبقات الإسفلتية ويُقلِّل الإجهاد الكلي المؤثِّر على طبقات الرصف ويُوفِّر عامل أمان أفضل.
4. تسليح طبقات الرصف بالجيوجريد الصناعي سيُقلِّل عمليات الصيانة المستقبلية ويرفع سويَّة أداء المهبط أثناء هبوط وإقلاع الطائرات الثقيلة.
5. أكَّدت الدراسة على أهمية استخدام البرمجيات الحاسوبية في حساب وتقييم مهابط الطائرات كي تُصبح قادرةً على استقبال الطائرات الحديثة دون حدوث تشوهات لدنة دائمة.

التوصيات:

1. إعادة تقييم المهابط الصلبة والمرنة لجميع المطارات السورية باستخدام برنامج Plaxis لما أظهره من مرونة في نمذجة وحساب مهابط الطائرات واقتراح الطريقة المثلى.
2. عند إعادة تأهيل مهابط الطائرات المحلية يُفضَّل استخدام مُحسنات مواد طبقة التغطية الإسفلتية كالبوليمرات أو تسليح الطبقات بالجيوجريد والمواد الصناعية.
3. استخدام وسائل وتقنيات الكشف المبكر عن الشقوق العميقة تقادياً لتفاجئها وصعودها إلى الأعلى.
4. تعزيز التعاون بين المؤسسة العامة السورية للطيران ومراكز الأبحاث والجامعات المحلية لاستخدام تقنيات النمذجة الحاسوبية كأداة داعمة للتخطيط ومعالجة مشاكل المهابط في المطارات السورية.

References:

- [1] J.Zhang, J.Yang"Advances in micromechanical constitutive theories and modeling" China, *Procedia Social and Behavioral Sciences*,pp. 1304-1314,2013 <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.148>
- [2] G.Shafabakhsh and E. Kashi, "Effect of aircraft wheel load and configuration on runway damages", *Period Polytech*, vol. 59, no. 1, doi: 10.3311/PPci.2103, 2015
- [3] M.Asim,M.Ahmad and S.ullah,"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
- [4] J.Williamson, Ms.Kansas," Finite Element Analysis Of Hot-Mix Asphalt Layer Interface Bonding "Matthew State University, 2007.
- [5] Plaxis Analysis,User's Guide,Volume.Plaxis 8.6.
- [6] Boieng747-400 ER Frighter Guide,Copyright ©2010 Boeing.www.Startupboeing.com
- [7] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials,M320-M332,2017.
- [8] G.D.Airy," Styrene Butadiene Styrene(SBS) POlymer Modification of Road Bitumens".*Journal of MAYERIALS TESTING*.2004
- [9] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC,T;245-1997
- [10] S.K.Ahirwara, J.Mandal, "Finite Element Analysis of Flexible Pavement with Geogrids", Transportation Geotechnics and Geocology, TGG 2017, Saint Petersburg, Russia,17-19 May 2017
- [11] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures American Association of State Highway and Transportation Officials, R50-09-2020.
- [12] S.L.Wang, "Investigation of Rutting Performance in Geogrid-Reinforced Asphalt Mixture".2023
- [13] S. Banerjee1, M. Srivastava , B.Manna and J. Shahu, "Prediction of Geogrid Reinforced Flexible Pavement Performance using Numerical Analysis" Indian Geotechnical Conference.2022.
- [14] R. Haas, J. Walls, And R. G. Carroll. Geogrid Reinforcement of Granular Bases in Flexible Pavements.1988
- [15] M.AL-Barqawi, Polymer Geogrids: A Review of Material, Design and Application *Materials Journal* 22-8-2021
- [16] N.Nazha, "The Effect of Geogrid Reinforcing Site in Improving Flexible Road Pavement", Master's thesis, Dept of transportation and communication Latakia University, Latakia, Syria,2023
- [17] American Society of Testing and Matereials. ASTM.D6637/D6637M-15.2015.
- [18] G.K.Moussa, R.A.Elsayed and W.A. Bekheet,"Reinforcement Of Asphalt Concrete Layers Using Biaxial and Triaxial Geogrids" Egypt.2019.
- [19] J.Rueda, J.Bastidas, J.Carlos, Y.Alayón and J.Olivos," Laboratory Analysis of an Asphalt Mixture Overlay Reinforced with a Biaxial Geogrid", Universidad Católica de Colombia 2023.
- [20] P.Regmi, A.Bhandari, B.Dahal," Numerical Study on Implication of Geogrid in the Pavement Construction" Tribhuvan University USA,2021
- [21] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials,M288,1990.

