استخدام الشبكة العصبونية لتقييم أثر إضافة البوليمر الأكريليكي في تحسين مواصفات الطابق الترابي (CBR)

أحمد هيثم علي _ طالب دراسات عليا(دكتوراه)،قسم النقل والمواصلات،كلية الهندسة المدنية جامعة حمص

الدكتور أكرم سلامة _ أستاذ مساعد، قسم النقل والمواصلات، كلية الهندسة المدنية جامعة حمص

الملخص

تُعدّ التربة الضعيفة أحد التحديات الرئيسية في مشاريع إنشاء الطرق، مما يستلزم معالجتها لتحسين خصائصها الهندسية. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نموذج تنبؤي دقيق باستخدام الشبكات العصبونية الاصطناعية (ANN) لتقدير قيم نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) للترب المعالجة بالبوليمر الأكريليكي. تم بناء قاعدة بيانات تجريبية متكاملة ضمت بيانات تجريبية (15 عينة) مأخوذة من ثلاثة مواقع في سهل الغاب، سوريا، حيث كانت نسب الإضافة للبوليمر الأكرليكي (0.5%، 1.0%، 1.5%، 2.0% من الوزن الجاف للتربة) ، و (60 عينة) منشورة من دراسات محكمة، ليصبح إجمالي عينات التدريب 75 عينة. تم تصميم النموذج بمعمارية متعددة الطبقات ذات تغذية أمامية ببنية (1–10–9) .

حيث شملت المدخلات تسعة متغيرات (الوزن النوعي، حدود أتربرغ، الكثافة الجافة، زاوية الاحتكاك، التماسك، قيمة CBR بدون إضافة ونسبة البوليمر) .أما المخرجات فكانت قيمة (CBRالمتنبأ بها) تم تدريب الشبكة باستخدام خوارزمية L–BFGS. أظهرت النتائج تحسن ملحوظ في قيم CBR بلغ ما بين 127% و183% ، عند إضافة البوليمر بنسبة 2% معامل تحديد (R^2) يبلغ 0.85 للنموذج المدرب ودقة عالية في التنبؤ مع متوسط خطأ مطلق (MAE) بقيمة 0.447 .

الكلمات المفتاحية :الشبكات العصبونية الاصطناعية، البوليمر الأكريليكي، نسبة تحمل كاليفورنيا(CBR) ، الطابق الترابي .

Artificial Neural Network-Based Evaluation of the Effect of Acrylic Polymer Stabilization on Subgrade California Bearing Ratio (CBR)

Ahmad Hytham Ali - Postgraduate Student (PhD) - Department of Transportation Engineering - Faculty of Civil Engineering - homs University

Dr.Akram Salama - Associate Professor - Department of Transportation Engineering - Faculty of Civil Engineering - Homs University.

Abstract

Weak subgrade soils represent one of the major challenges in road construction projects, necessitating stabilization to improve their engineering properties. This study aims to develop an accurate predictive model using Artificial Neural Networks (ANN) to estimate the California Bearing Ratio (CBR) of soils treated with acrylic polymer. An integrated experimental database was established, consisting of 15 laboratory-tested samples collected from three locations in the Al-Ghab Plain, Syria, where acrylic polymer was added at dosages of 0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0% by dry soil weight, in addition to 60 experimental samples collected from previously published peer-reviewed studies, resulting in a total dataset of 75 samples. The ANN model was designed as a multilayer feed-forward network with a (9-10-1) architecture. The input layer included nine variables: specific gravity, Atterberg limits, dry density, angle of internal friction, cohesion, untreated CBR value, and polymer content. The output variable was the predicted CBR value. The network was trained using the L-BFGS optimization algorithm. The results demonstrated a significant improvement in CBR values, ranging from 127% to 183% at a polymer content of 2%. The developed model achieved a coefficient of determination (R^2) of 0.85 and showed high predictive accuracy with a Mean Absolute Error (MAE) of 0.447.

Keywords: Artificial Neural Networks (ANN); Acrylic Polymer; California Bearing Ratio (CBR); Subgrade Layer.

1- مقدمة

تشكل قدرة تحمل التربة للطابق الترابي العامل الأساسي في أداء الرصف واستدامته، إذ تعتمد مقاومة سطح الطريق للتشوهات والهبوطات بشكل مباشر على مقاومة التربة الأساسية للأحمال المتكررة. ويُعد اختبار نسبة التحمل في كاليفورنيا (CBR) المؤشر الأكثر اعتماداً في تصميم طبقات الرصف، حيث يمثل معياراً عملياً لتقييم متانة التربة وقدرتها على تحمل الإجهادات المرورية .إلا أن العديد من الترب الطبيعية، خصوصاً الترب الطينية، تُظهر قيماً منخفضة منCBR ، مما يستدعي تحسينها قبل استخدامها في مشاريع البنية التحتية.

برزت البوليمرات الاكريليكية كبديل حديث وفعّال عن المواد التقليدية في مجال تثبيت التربة [1] [2]، لما تمتلكه من قدرة على تكوين شبكة ترابط مرنة بين الحبيبات، مما يعزز مقاومة القص ويزيد من تماسك البنية الداخلية للتربة [3] .وقد أثبتت الدراسات أن إضافة البوليمر تؤدي إلى تحسين ملحوظ في قيمCBR ، إلا أن هذا التحسن لا يتبع سلوكاً خطياً بسيطاً [4].

تُظهر هذه النتائج أن العلاقة بين نسبة البوليمر وخصائص التربة علاقة معقدة وغير خطية [5]، تتأثر بتداخل عدة متغيرات مثل حدود أتربرغ، الكثافة الجافة، زاوية الاحتكاك، والتماسك [6]. وبالتالي، فإن استخدام النماذج الإحصائية التقليدية قد لا يكون كافياً لتمثيل هذا السلوك المركب بدقة[7] .

مع التطور المتسارع في تقنيات الذكاء الاصطناعي، أصبحت الشبكات العصبونية الاصطناعية (ANNs) أداة قوية في مجال هندسة الرصف [8]، نظراً لقدرتها على نمذجة العلاقات اللاخطية واستخلاص الأنماط الخفية من مجموعات بيانات محدودة [9] .وقد استُخدمت الشبكات العصبونية بنجاح في التنبؤ بقيمة CBRللتربة الطبيعية اعتماداً على خصائصها الفيزيائية [10]، كما أثبتت فعاليتها في تقدير معاملات القوة والهبوط وغيرها من الخصائص الجيوتكنيكية[11] .

على حد علم الباحث، لا تزال الدراسات التي تربط بين تثبيت التربة بالبوليمرات الأكريليكية واستخدام ANNللتنبؤ بقيم CBR محدودة، خاصة ضمن بيئات ترب محلية مشابهة لترب سهل الغاب. إن سد هذه الفجوة يمثل خطوة مهمة نحو تطوير أداة تصميم ذكية تقلل من الحاجة إلى الاختبارات المخبرية المتكررة والمكلفة، وتوفر فهماً كمياً للسلوك اللاخطي الناتج عن التفاعل بين البوليمر ومكونات التربة.

بناءً على ما سبق، يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج شبكة عصبونية اصطناعية متعدد الطبقات للتنبؤ بقيمة CBR للتربة المعالجة بالبوليمر الأكريليكي، اعتماداً على مجموعة من الخصائص الجيوتكنيكية الأساسية ونسبة الإضافة. يسهم هذا النموذج في تقديم إطار تصميمي رقمي يدعم متخذي القرار في مشاريع الطرق، ويعزز من كفاءة استخدام الموارد، ويحد من الهدر الناتج عن التجارب المخبرية التقليدية.

2 – أهمية البحث

تنبع أهمية هذا البحث من كونه يعالج تقاطعًا علميًا بين مجالين متقدمين في الهندسة المدنية :تحسين التربة باستخدام البوليمرات الأكريليكية و النمذجة الذكية باستخدام الشبكات العصبونية الاصطناعية.

تكمن الإشكالية الأساسية في الطبيعة اللاخطية المعقدة للعلاقة بين نسبة البوليمر المضاف وخصائص التربة الجيوتكنيكية من جهة، وقيمة CBR الناتجة من جهة أخرى. هذه العلاقة لا يمكن تمثيلها بدقة باستخدام النماذج الخطية التقليدية، مما يحد من إمكانية التنبؤ الأمثل بالسلوك بعد المعالجة.

من هنا تتجلى أهمية هذا البحث في:

1. تطوير نموذج تنبؤي ذكي قادر على محاكاة السلوك اللاخطي للتربة المعالجة.
2. تقليل الاعتماد على التجارب المخبرية المكلفة من خلال أداة رقمية مساعدة في اتخاذ القرار.
3. تحديد النسبة المثلى للبوليمر اقتصاديًا وفنيًا اعتمادًا على منحنى استجابة كامل.
4. دمج قاعدة بيانات تجريبية متكاملة لرفع قدرة النموذج على التعميم .

وبذلك يسهم البحث في نقل عملية تصميم الطابق الترابي من الأسلوب التجريبي التقليدي إلى نهج تنبؤي رقمي.

3 – أهداف البحث

هدف هذا البحث إلى تطوير إطار نمذجة ذكي لتقدير قيمة CBR للتربة المعالجة بالبوليمر الأكريليكي، وذلك من خلال تحقيق الأهداف التالية:

1. تحليل السلوك الجيوتكنيكي للتربة المعالجة عبر دراسة تأثير نسب مختلفة من البوليمر الأكريليكي على قيمة CBR.
2. فهم الطبيعة اللاخطية للعلاقة بين نسبة الإضافة وخصائص التربة الميكانيكية.
3. بناء قاعدة بيانات تجريبية متكاملة تضم بيانات مخبرية وبيانات منشورة ومحكمة لتعزيز كفاءة التدريب.
4. تطوير نموذج شبكة عصبونية اصطناعية متعددة الطبقات (ANN) بمعمارية مناسبة لتمثيل العلاقات المعقدة بين المتغيرات.
5. تقييم أداء النموذج باستخدام مؤشرات إحصائية مثل معامل التحديد (R^2) ومتوسط مربع الخطأ (MSE).
6. تحديد المجال الأمثل لنسبة البوليمر الذي يحقق أعلى تحسين في قيم CBR.
7. تطوير أداة تصميمية رقمية تُمكّن المهندسين من التنبؤ بأداء التربة المعالجة قبل التنفيذ.

4 – الدراسات المرجعية

شهدت السنوات الأخيرة اهتماماً متزايداً باستخدام البوليمرات الصناعية في تحسين خصائص التربة، بالتوازي مع التوسع في تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي، ولا سيما الشبكات العصبونية الاصطناعية (ANNs)، في التنبؤ بالخصائص الجيوتكنيكية. وقد ركزت الدراسات الحديثة على محورين رئيسيين: تحسين CBR باستخدام البوليمرات، والتنبؤ بقيمة CBR باستخدام النمذجة الذكية.

في دراسة، قدم Mohamed (2022) نموذج ANN للتنبؤ بقيمة CBR للترب الضعيفة، حيث حقق النموذج معامل ارتباط مرتفع وأثبت كفاءة جيدة مقارنة بالطرق التقليدية [12].

أظهرت دراسة Mousavi et al (2021) أن استخدام البوليمرات التجارية (CBR Plus وRPP) في تثبيت أساس الطرق في الغابات أدى إلى تحسن ملحوظ في قيم CBR، مع زيادة تدريجية مرتبطة بتركيز البوليمر، حيث عُزي التحسن إلى تقليل الفراغات وتحسين الترابط بين الحبيبات [13].

في السياق ذاته، بينت دراسة Kim et al. (2021) أن نماذج ANN قادرة على تقدير معاملات القوة للتربة بدقة عالية عند إدخال الخصائص الجيوتكنيكية المناسبة، مما يعزز قابلية تطبيق هذه النماذج في التصميم الهندسي وبالتالي إمكانية استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في تقدير معاملات القوة للتربة اعتماداً على خصائصها، مما عزز الاتجاه نحو النمذجة الرقمية بدلاً من الاعتماد الكامل على الاختبارات المباشرة [14].

كما أشارت دراسة Ahmed & Radhia (2019) إلى أن البوليمرات الصناعية، مثل UFR، قادرة على تحسين مقاومة التربة الرملية وزيادة قيمة CBR، مع وجود تركيز أمثل يحقق أعلى كفاءة ميكانيكية [15]

جدول رقم (1) يبين الدراسات السابقة والمقارنة مع الدراسة الحالية

الباحث والسنة	نوع الدراسة	نوع البوليمر	نوع التربة	منهجية التحليل	أهم النتائج	الفجوة المتبقية
Mohamed (2022) [12]	التنبؤ بـ CBR	—	تربة ضعيفة	ANN (FFB)	معامل ارتباط مرتفع	لم يدرس البوليمرات
Ahmed & Radhia (2019) [15]	تحسين CBR	UFR	تربة رملية	اختبارات مخبرية	تحسن ملحوظ في CBRمع تركيز أمثل	لا يوجد نموذج تنبؤي
Mousavi et al. (2021) [13]	تثبيت أساس طرق	CBR Plus, RPP	طين عالي اللدونة	اختبارات مخبرية	زيادة تدريجية في CBRمع زيادة البوليمر	لم تستخدمANN
Kim et al. (2021) [14]	نمذجة معاملات القوة	—	تربة طبيعية	ANN	دقة تنبؤية عالية	لم تشمل تربة معالجة

5 – الفجوة البحثية

من خلال تحليل الأدبيات الحديثة يتضح ما يلي:

لقد أجريت دراسات محدودة حول التنبؤ بنسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية في التربة المثبتة بالبوليمر الأكريليكي.

وعليه يسعى هذا البحث إلى سد هذه الفجوة من خلال دمج الاختبارات المخبرية مع النمذجة الذكية لتطوير أداة تصميم رقمية. جدول(2)

جدول رقم (2) يوضح الفجوة البحثية

هذا البحث	الدراسات السابقة	الجانب
البوليمر الأكريليكي (بولي اكريلات)	بوليمرات HDPE، PVC، UFR، CBR Plus	المواد المدروسة
دمج الاختبارات المخبرية مع النمذجة الذكية	اختبارات مخبرية تقليدية فقط	منهجية التنبؤ
الشبكات العصبونية الاصطناعية (ANN)	تحليل إحصائي تقليدي	أدوات التحليل
العلاقة غير الخطية المعقدة	علاقة تركيز البوليمر–CBR الخطية	العلاقة المدروسة
نموذج تنبؤي قابل للتطبيق المباشر	توصيات عامة	التطبيق العملي

6- المواد وطرائق البحث

6-1 التربة المدروسة

تم اعتماد تربة ضعيفة مأخوذة من ثلاثة مواقع مختلفة ضمن منطقة سهل الغاب في محافظة حماة – سوريا، الموقع الأول طريق (الكريم _ الرصيف) و الموقع الثاني طريق (الرصيف _ شطحة) و الموقع الثالث طريق(مرداش _ الكريم)، وذلك لتمثيل الظروف الجيوتكنيكية الشائعة في مشاريع الرصف في المناطق ذات المحتوى الطيني المرتفع. تم استخراج العينات من عمق يقارب (1.0 م) أسفل السطح الطبيعي بعد إزالة الطبقة الزراعية، بهدف الحصول على تربة ممثلة للطبقة الترابية الإنشائية. أُجريت سلسلة من

الاختبارات المخبرية الأولية لتوصيف الخصائص الفيزيائية والمكانيكية وفق مواصفات AASHTO ومعايير ASTM، وشملت:

التحليل المنخلي لتحديد التدرج الحبي،حدود أتربرغ (LL, PL, PI)، الوزن النوعي (Gs)،

اختبار بروكتور لتحديد الكثافة الجافة العظمى (MDD) والمحتوى الرطوبي الأمثل (OMC)،

معاملات مقاومة القص (زاوية الاحتكاك الداخلي φ والتماسك C) ، و CBR .

جدول رقم (3) يبين تصنيف التربة للمواقع الثلاثة

الموقع	حدود أتربرغ			المار من 200	التصنيف
	حد السولة LL	حد اللدونة PL	دليل اللدونة PI		
الموقع الأول	53.2 %	24.3 %	28.8 %	75.20 %	A-7-6
الموقع الثاني	60.8 %	31.7 %	29 %	80.10 %	A-7-5
الموقع الثالث	54.2 %	26 %	28.2%	70.4 %	A-7-6

أظهرت النتائج أن التربة المصنفة تقع ضمن نطاق الترب الضعيفة ذات السلوك اللدن المتوسط إلى العالي، مع قيم CBR منخفضة نسبياً (المعروضة لاحقا)، وهذا مايؤكد الحاجة لتحسين خواصها الميكانيكية.

2-6 البوليمر الأكريليكي

يُستخدم بوليمر أكريليكي صناعي (بولي اكريلات) على شكل مستحلب مائي نوعه الكيميائي (كوبوليمر إستر الأكريليك) ، الصيغة العامة ([–CH_2–CH(COOR)–])، الرقم الهدرجيني (8.0 – 6.5) ، اللزوجة عند 25^0 C (1000 – 3000 mPa·s)، الكثافة عند 25^0 C (1.05 – 1.10 g/cm³) ، المحتوى الصلب (40% – 30%) ، يتميز بـ:

1. القدرة على تكوين شبكة ثلاثية الأبعاد مع جزيئات التربة[17] .

2. مقاومة جيدة للظروف البيئية القاسية والأحمال الديناميكية .
3. قابلية الانحلال في الماء وسهولة الانتشار في التربة .

6-3 البرنامج التجريبي

6-3-1 تحضير العينات

جدول رقم (4) تحضير عينات التربة المعالجة

الخطوة	التفاصيل
تجفيف التربة	تجفيف العينات في الفرن لمدة 24 ساعة ثم تحضيرها للخلط
تحديد نسب البوليمر	إضافة البوليمر بنسب وزنية (0%، 0.5%، 1%، 1.5%، 2%) من وزن التربة الجافة
الخلط	خلط التربة مع محلول البوليمر حتى التجانس الكامل
الرص	رص العينات عند المحتوى الرطوبي الأمثل باستخدام جهاز الرص القياسي

6-3-2 إجراء اختبار CBR

يُجرى اختبار CBR وفقاً للمواصفة ASTM D1883 على العينات المرصوصة حيث أن CBR مغمور بعد الاضافة مباشرة لمحاكاة أسوأ الظروف البيئية.

جدول رقم (5) طريقة اختبار CBR

البند	التفاصيل
نوع الاختبار	CBRمغمور بعد الاضافة مباشرة لمحاكاة أسوأ الظروف البيئية
مدة الغمر	96 ساعة (4 أيام)
نقاط القياس	الاختراق عند 2.5 مم و 5.0 مم
عدد العينات	3 عينات لكل نسبة بوليمر (إجمالي 12 عينة + 3 عينات مرجعية)

6-4-1 تطوير نموذج الشبكة العصبونية

6-4-1 بنية النموذج

تم تطوير نموذج شبكة عصبونية اصطناعية (ANN) بمعمارية (1-10-9) ، حيث تتكون طبقة الإدخال من 9 عصبونات، وطبقة مخفية واحدة مكونة من 10عصبونات تم اختياره بناءً على عدد المتغيرات المدخلة وطبيعة العلاقات اللاخطية المعقدة مع دالة تنشيط من نوع Sigmoid لتعزيز القدرة على استيعاب العلاقات غير الخطية المعقدة، وطبقة إخراج واحدة. تم تدريب النموذج باستخدام خوارزمية L-BFGS نظراً لكفاءتها العالية مع البيانات ذات الحجم الصغير والمتوسط.

6-4-2 متغيرات المدخلات والمخرجات

تم اختيار تسعة متغيرات جيوتكنيكية مؤثرة لتكون مدخلات للشبكة العصبونية، وهي:

الوزن النوعي للتربة(Gs) ، حد السيولة(LL) ، حد اللدونة(PL) ، دليل اللدونة(PI) ، الكثافة الجافة الاعظمية (Yd) ، زاوية الاحتكاك الداخلي (φ) ، التماسك(C) ، نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR) بدون إضافة ، نسبة البوليمر المضاف (%) .

بينما كان المخرج الوحيد هو قيمة CBR المتوقعة بعد المعالجة بالبوليمر. إن تضمين قيمة CBR قبل المعالجة كمدخل يمنح النموذج مرجعية أساسية لحالة التربة قبل التحسين، مما يزيد من دقة التنبؤات.

3-4-6 تقسيم البيانات

اعتمدت الدراسة على قاعدة بيانات تجريبية متكاملة تتألف من:

خمس عشرة عينة مخبرية أجراها الباحث في مخبر الهندسة الجيوتكنيكية في جامعة حمص باستخدام تربة من منطقة سهل الغاب وبوليمر أكريليكي بنسب إضافة مختلفة .

ستين عينة تجريبية إضافية جُمعت من دراسات منشورة ومحكمة في الأدبيات العلمية، حيث تم اختيار الدراسات [2] [4] [10] [16] التي تستخدم :

أنواع تربة متقاربة، وبوليمرات أكريليكية أو مشابهة، ومتغيرات جيوتكنيكية متوافقة مع متغيرات الدراسة الحالية,. فقد تم تقسيم مجموعة البيانات وفق منهجية تضمن تحقيق توازن بين كفاءة التدريب وقدرة النموذج على التعميم.

جدول رقم (6) مراجع البيانات التجريبية المحكمة

المتغيرات المتوافقة	نوع التربة / البوليمر	المرجع
LL, PL, Yd, CBR	تربة طينية + كوبوليمر أكريلاميد/حمض أكريليكي (0.25–2%)	**Abdikamalova et al. (2024)**
Gs, LL, PL, PI, Yd, CBR	ترب سورية خشنة وناعمة – ANN للـ CBR	**Nofal & Hana (2025)**
LL, PL, PI, Yd, CBR	ترب استوائية + ANN بتحسين المعاملات	**Yabi et al. (2024)**
Gs, LL, PL, Yd, C, CBR	ANN + Random Forest	**Amin et al. (2022)**

تم تقسيم البيانات كالتالي:

مجموعة التدريب: 70% (53 عينة)، مجموعة التحقق: 15% (11 عينة)، مجموعة الاختبار: 15% (11 عينة) .

استُخدمت مجموعة التدريب لتحديث أوزان الشبكة العصبونية عبر خوارزمية L–BFGS وتقليل دالة الخطأ، بينما استُخدمت مجموعة التحقق لمراقبة سلوك النموذج أثناء عملية التعلم ومنع ظاهرة فرط المطابقة ، في حين خُصصت مجموعة الاختبار لتقييم الأداء النهائي للنموذج على بيانات لم تُستخدم مسبقاً في التدريب.

6-4-4 معايير تقييم النموذج

لتقييم كفاءة نموذج الشبكة العصبونية الاصطناعية في التنبؤ بقيمة CBR للتربة المعالجة بالبوليمر الأكريليكي، تم اعتماد مجموعة من المؤشرات الإحصائية الكمية التي تقيس مدى تطابق القيم المتنبأ بها مع القيم المخبرية الفعلية.

أولاً، تم استخدام معامل التحديد (R^2) لتقييم مدى جودة النموذج لتفسير التباين في المتغير التابع. حيث تشير القيم القريبة من الواحد الصحيح إلى أن النموذج أفضل في تفسير البيانات.

ثانياً، تم اعتماد متوسط مربع الخطأ كمقياس لمدى انحراف القيم المتنبأ بها عن القيم الحقيقية. يتميز هذا المؤشر بحساسيته للفروق الكبيرة، مما يجعله مناسباً لتقييم دقة نماذج الانحدار.

إضافةً إلى ذلك، تم تحليل منحنى الاستجابة الناتج عن النموذج لتمثيل العلاقة بين نسبة البوليمر وقيمة CBR،

إن اعتماد هذه المعايير مجتمعة يوفّر تقييماً شاملاً لأداء النموذج من حيث الدقة، والاستقرار، وقابلية التعميم، ويعزز موثوقيته كأداة تصميم رقمية داعمة للقرارات الهندسية.

7- النتائج والمناقشة

أجريت التجارب المخبرية على العينات وبنسب إضافة لتجارب الخصائص الميكانيكية تتراوح بين (0-3 %) حيث أظهرت النتائج انخفاض في قيمة التحسن بعد الإضافة 2% فكانت النتائج الموضحة في الجدول (7) تبين التحسن بنسب إضافة من (0-2%) المستخدمة بالشبكة العصبونية .

جدول رقم (7) التجارب المخبرية التي اجراها الباحث وقيم CBR المتنبىء بها

المجموعات	رقم العينة	الوزن النوعي	حد السيولة	حد اللدونة	دليل اللدونة	الكثافة الجافة الاعظمية	نسبة الاضافة %	زاوية الاحتكاك	التماسك	cbr	CBR المتنبئ به %
المجموعة 1	1	2.53	53.9	25.14	28.76	1.47	بدون إضافة	14	13	2.1	1.92
	2	2.52	52.7	23.95	28.75	1.49	0.5	17.5	16	2.89	2.90
	3	2.51	51.9	25.62	26.28	1.46	1	19.8	19.5	3.5	3.95
	4	2.53	54.32	23.83	30.49	1.48	1.5	22	23	4.73	4.50
	5	2.52	50.67	22.87	27.8	1.49	2	22.3	23.4	5.16	5.26

المجموعة 2	6	2.5	59.8	32.91	26.89	1.35	بدون إضافة	16	14	2.4	2.04
	7	2.45	61.9	34.03	27.87	1.33	0.5	21.5	19.2	3.04	3.03
	8	2.49	60.6	30.66	29.94	1.37	1	23.2	23.3	3.93	4.13
	9	2.51	64.18	31.51	32.67	1.35	1.5	25.5	26.1	4.8	4.83
	10	2.52	60.24	29.7	30.54	1.36	2	26.1	26.6	5.46	5.44
المجموعة 3	11	2.48	54.3	26.44	27.86	1.39	بدون إضافة	13	10	1.9	1.34
	12	2.49	56.9	25.21	31.69	1.41	0.5	17.3	15.8	3.14	2.51
	13	2.46	51.3	24.08	27.22	1.43	1	20.1	19.5	4.16	3.66
	14	2.5	49.97	26.05	23.92	1.4	1.5	21.2	22.1	5.18	4.91
	15	2.52	53.61	25.51	28.1	1.38	2	21.4	22.6	5.37	5.29

النتائج تؤكد أن البوليمرات الأكريليكية فعالة جداً في تحسين خصائص التربة الميكانيكية:

1- تحسن ملحوظ في CBR: التحسن يتراوح بين 127% و 183% عند النسبة 2% .

2- زيادة التماسك: البوليمر يزيد من قوة التماسك بين جزيئات التربة

حيث إن المجموعات الكربوكسيلية الموجودة في البولي أكريلات تمتص الماء وتنتفخ، مما يؤدي إلى تشكّل روابط بين جزيئات التربة .

3- زيادة قيم زاوية الاحتكاك الداخلي :

يعلل ذلك بأن البوليمر يعمل كلاصق مرن بين جزيئات التربة، ويزيد من الاحتكاك الداخلي والتشابك الميكانيكي ، ويُقلّل من قابلية الحبيبات للانزلاق فوق بعضها البعض

و البوليمر يكوّن شبكة ثلاثية الأبعاد داخل المسام الدقيقة ، هذه الشبكة تعيق الحركة النسبية للجزيئات وتُحسّن مقاومة القص بالاحتكاك .

اعتمدت هذه الدراسة نموذج شبكة عصبونية اصطناعية متعددة الطبقات من نوع

Feed-Forward Artificial Neural Network (FFANN)، نظراً لفعاليتها العالية في نمذجة العلاقات اللاخطية المعقدة بين المتغيرات الجيوتكنيكية وقيمة CBR الناتجة بعد المعالجة بالبوليمر الأكريليكي.

تتميز الشبكات ذات التغذية الأمامية بانتقال الإشارات في اتجاه واحد من طبقة الإدخال إلى طبقة الإخراج دون وجود حلقات راجعة، مما يجعلها مناسبة لمسائل الانحدار التي يكون فيها الهدف هو التنبؤ بقيمة مستمرة. وقد تم اختيار هذا النوع من الشبكات بناءً على نجاحه الواسع في تطبيقات الهندسة الجيوتكنيكية، خصوصاً في التنبؤ بقيم CBR ومعاملات مقاومة القص.

إن اعتماد تسعة مدخلات يمنح النموذج قدرة تفسيرية أعلى، إذ لا يعتمد فقط على الخصائص الفيزيائية، بل يدمج معاملات القوة ونسبة الإضافة، مما يسمح بفهم أشمل لتفاعل البوليمر مع بنية التربة.

تم بناء وتدريب النموذج باستخدام لغة البرمجة Python نظراً لمرونتها العالية في تطبيقات الذكاء الاصطناعي وتوافر مكتبات متقدمة لمعالجة البيانات والنمذجة.

تم استخدام مكتبة Scikit-Learn لبناء نموذج الشبكة العصبونية، إلى جانب مكتبات مساندة مثل:

1. NumPy للمعالجة العددية
2. Pandas لإدارة قاعدة البيانات
3. Matplotlib لتحليل ورسم منحنيات الاستجابة
4. Scikit-Learn preprocessing tools لتطبيق تقنيات التطبيع

يتميز استخدام Python بإمكانية إعادة إنتاج النتائج بسهولة، وقابلية توسيع النموذج مستقبلاً، إضافة إلى كونه بيئة مفتوحة المصدر تدعم التطبيقات البحثية المتقدمة.

نظراً لتباين نطاقات القيم بين المتغيرات المدخلة (على سبيل المثال: زاوية الاحتكاك بالدرجات مقابل الوزن النوعي ذي القيم الصغيرة نسبياً)، تم تطبيق تقنية Normalization Min-Max لتحويل جميع القيم إلى المجال.(0-1)

تعد هذه الخطوة ضرورية للأسباب التالية:

a. ضمان استقرار دالة التنشيط من نوع Sigmoid
b. منع هيمنة المتغيرات ذات القيم الكبيرة على عملية التدريب
c. تسريع تقارب خوارزمية التحسين
d. تحسين دقة النموذج وتقليل الخطأ العددي

في الطبقة المخفية، تم استخدام دالة تنشيط Sigmoid (Logistic Function) نظراً لقدرتها على تمثيل العلاقات اللاخطية المعقدة. هذه الدالة مناسبة لطبيعة المشكلة، حيث إن تأثير البوليمر على CBR لا يتبع نمطاً خطياً بسيطاً.

أما في طبقة الإخراج، فقد تم استخدام دالة خطية(Identity Function) ، وذلك لأن الهدف هو التنبؤ بقيمة عددية مستمرة (CBR) ، وهو ما يتوافق مع مسائل الانحدار.

تم تدريب الشبكة باستخدام خوارزمية

L-BFGS (Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno) ، وهي خوارزمية تحسين تعتمد على التقريب شبه النيوتني لمصفوفة الهيسيان.

تم اختيار هذه الخوارزمية للأسباب التالية:

- كفاءتها العالية في التعامل مع مجموعات البيانات صغيرة إلى متوسطة الحجم.
- سرعة التقارب مقارنة بخوارزميات الانتشار العكسي التقليدية.
- قدرتها على تقليل دالة الخطأ بشكل مستقر.
- ملاءمتها للنماذج ذات عدد محدود من العينات كما في قاعدة البيانات الحالية.

بعد تقسيم البيانات إلى مجموعات تدريب وتحقيق واختبار، تم تنفيذ الخطوات التالية:

1. تدريب النموذج على بيانات التدريب مع تحديث الأوزان لتقليل دالة الخطأ.
2. مراقبة الأداء على بيانات التحقق لضبط الاستقرار ومنع فرط المطابقة.
3. تقييم النموذج النهائي باستخدام بيانات الاختبار غير المرئية مسبقاً.
4. تحليل منحنى الاستجابة بين نسبة البوليمر وقيمة CBR لرصد الطبيعة اللاخطية .

جدول رقم (8) يبين مقاييس الاداء للشبكة العصبونية

مقياس الأداء	بيانات التدريب	بيانات التحقق	بيانات الاختبار
R^2 معامل التحديد	0.872	0.861	0.857
MSE	0.412	0.458	0.486
RMSE	0.642	0.677	0.697
MAE	0.381	0.429	0.447

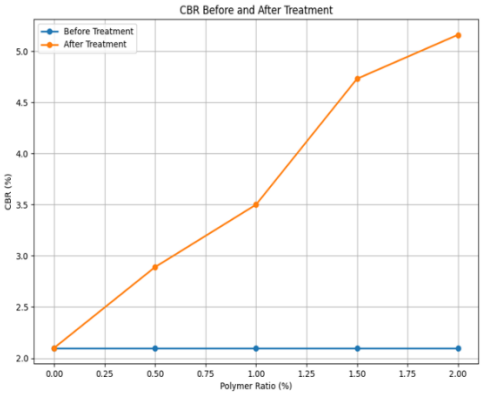
$R^2 = 0.857$ يعني أن النموذج يفسر 85.7% من التباين في قيم CBR .

جدول رقم (9) مقارنة نموذج ANN مع نماذج تنبؤية أخرى

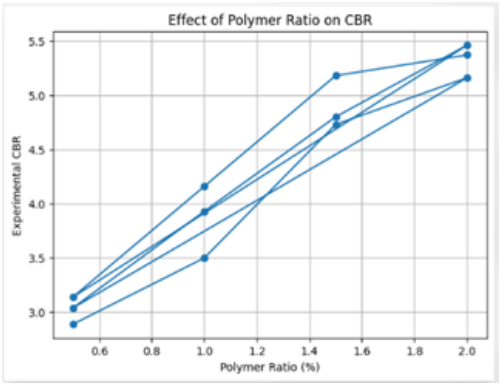
MAE	RMSE	R^2	النموذج
0.82	1.18	0.69	Linear regression
0.8543	1.1876	0.6845	Random Forest
0.8765	1.2134	0.6821	Support Vector Regression (SVR)

الخلاصة: نموذج ANN يحقق أفضل أداء مع $R^2 = 0.857$ و $RMSE = 0.697$

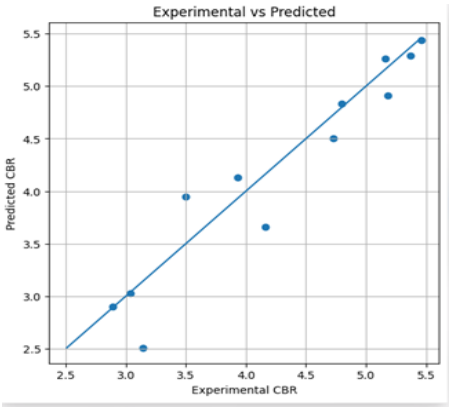
ويعزى تفوق ANN إلى قدرتها على تمثيل العلاقات غير الخطية المعقدة بين خصائص التربة ونسبة البوليمر، بينما تعتمد النماذج الأخرى على افتراضات أبسط و قدرات تمثيل أقل مرونة.



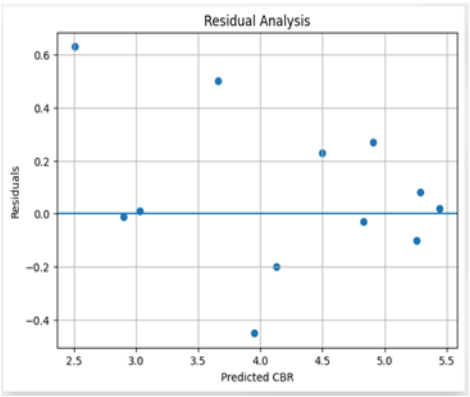
الشكل (1)مخطط CBR قبل وبعد المعالجة



الشكل(2) مخطط تأثير نسبة البوليمر علىCBR



الشكل(3) مخطط القيم التجريبية مقابل المتنبأ بها



الشكل (4) مخطط تحليل البواقي

أظهر مخطط البواقي توزيعًا عشوائيًا حول الصفر دون اتجاه منتظم، مما يشير إلى عدم وجود انحياز منهجي في النموذج.

8- الاستنتاجات

1-تم تطوير واجهة تفاعلية تسمح برسم منحنى التغير لقيمة CBR مقابل نسبة البوليمر، وأظهرت النتائج أن العلاقة بين نسبة البوليمر وقيمة CBR علاقة غير خطية، حيث ازداد التحسن تدريجيًا حتى نسبة 2% ضمن نطاق الدراسة.

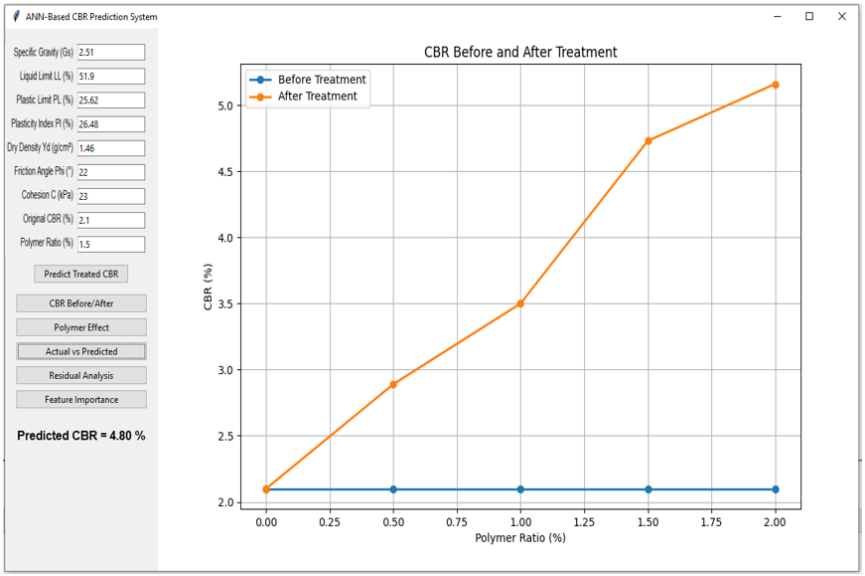
2- أظهرت النتائج أن النموذج أظهر قدرة تنبؤية ضمن حدود قاعدة البيانات المستخدمة .

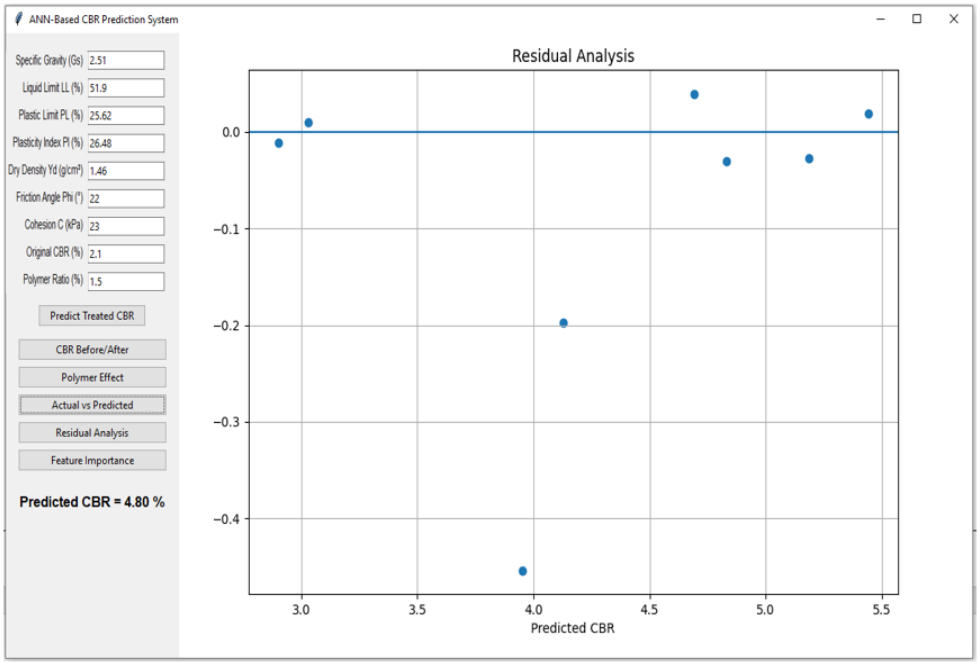
3-أثبت النموذج العصبوني كفاءة جيدة في التنبؤ بقيم CBR معامل تحديد (R^2) يبلغ 0.857 للنموذج المدرب ودقة جيدة في التنبؤ مع متوسط خطأ مطلق (MAE) بقيمة 0.447 مدعوماً بقاعدة بيانات تجريبية متكاملة تجمع بين البيانات المخبرية والبيانات التجريبية المنشورة.

4- أظهرت النتائج أن قيمة MSE = 0.486، وهي قيمة منخفضة مما يدل على تقارب كبير بين التنبؤات والنتائج التجريبية .

5- إن تضمين الخصائص الميكانيكية (زاوية الاحتكاك والتماسك) كمدخلات إضافية حسن من قدرة النموذج على فهم سلوك التربة تحت تأثير البوليمر، مقارنة بالنماذج التي تعتمد على الخصائص الفيزيائية فقط.

6-يمكن اعتبار النموذج المقترح أداة مساعدة أولية للتنبؤ بقيم CBR ضمن حدود الترب ونسب الإضافة المدروسة، على أن يتم التحقق منه ببيانات مخبرية مستقلة قبل اعتماده في التصميم العملي.





الشكل رقم (5) واجهة برنامج CBR prediction

References

[1] H. Ghasemzadeh, A. Mehrpajouh, and M. Pishvaei, “Compressive Strength of Acrylic Polymer–Stabilized Kaolinite Clay Modified with Different Additives,” ACS Omega, 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c00236.

[2] A. Abdikamalova, S. Kuldasheva, I. D. Eshmetov, A. Boymirzaev, and B. Kholnazarov, “Influence of copolymers of acrylamide and acrylic acid on the structure and water strength of soil,” E3S Web of Conferences, 2024

[3] М. В. Гаркуша and І. Ю. Гаркуша, “ЗАСТОСУВАННЯ АКРИЛОВОЇ КОПОЛІМЕРНОЇ ДОБАВКИ ДЛЯ УКРІПЛЕННЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ ҐРУНТІВ У БУДІВНИЦТВІ,” Airport Planning, Construction and Maintenance Journal, 2025

[4] C. Yabi, S. Agongbe, and B. K. Tamou, “Prediction of CBR by deep artificial neural networks with hyperparameter optimization by simulated annealing,” Indian Geotechnical Journal, 2024, doi: 10.1007/s40098-024-00870-4.

[5] F. J. V. Purizaca, S. M. M. Perez, V. A. Tuesta-Monteza, and H. I. Mejia-Cabrera, “Desarrollo de un modelo predictivo de las propiedades mecánicas del suelo usando redes neuronales artificiales,” Lámpsakos, 2021,

[6] B. B. Pule and J. A. Yendaw, “Effect of geotechnical soil properties on CBR value: A review,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1330/1/012026.

[7] Cheng Junqi, “Research Progress of Convolutional Neural Network in Determination of Soil Physical and Chemical Properties,” Hans Journal of Soil

Science, 2024

[8] J. Hatti and K. Grover, “CBR prediction of pavement materials in unsoaked condition using LSSVM, LSTM-RNN, and ANN approaches,” 2024

[9] M. Khasawneh, H. Al-Akhrass, and S. Rabab’ah, “Prediction of California bearing ratio using soil index properties by regression and machine-learning techniques,” 2024

[10] M. Amin, M. Iqbal, M. Ashfaq, B. Salami, and K. Khan, “Prediction of strength and CBR characteristics of chemically stabilized coal gangue: ANN and random forest tree approach,” Materials, 2022, doi: 10.3390/ma15124330.

[11] M. E. Montes-Arvizu, O. Chavez-Alegria, E. Rojas-Gonzalez, J. R. Gaxiola-Camacho, and J. R. Millán-Almaraz, “CBR Predictive Models for Granular Bases Using Physical and Structural Properties,” Applied, 2020,

[12] A. A. E. S. Mohamed, “Implementation of Artificial Neural Networks (ANNs) in Predicting CBR Value for Soil,” M.Sc. Thesis, University of Khartoum, 2022

[13] F. Mousavi, M. Avatefi Hemmat, E. Abdi, and A. Norouzi, “The Effect of Polymer Materials on the Stabilization of Forest Road Subgrade,” International Journal of Forest Engineering, 2021, 32, 235–245.

[14] Y. Kim, A. Satyanaga, H. Rahardjo, H. Park, A. Wai, and L. Sham, “Estimation of Effective Cohesion Using Artificial Neural Networks Based on Index Soil Properties: A Singapore Case,” Engineering Geology, 2021, 289, 106163

[15] L. A. J. Ahmed and M. Radhia, “Sandy Soil Stabilization with Polymer,” ResearchGate, 2019

[16] Z. T. Nofal and R. Hana, “Prediction of the Bearing Capacity Values of Coarse and Fine Soils (CBR) Using the Artificial Neural Network Method,” Latakia Univ. J. Eng. Sci. Ser., vol. 47, no. 4, pp. 177–190, 2025