مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية والمعمارية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 10

1448 هـ - 2026 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص **المدير المسؤول عن المجلة**

أ. د. وليد حمادة	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الإنسانية**
د.نعيمة عجيب	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية**

د.محمد فراس رمضان	عضو هيئة التحرير
د. مضر سعود	عضو هيئة التحرير
د. ممدوح عبارة	عضو هيئة التحرير
د. موفق تلاوي	عضو هيئة التحرير
د. طلال رزوق	عضو هيئة التحرير
د. أحمد الجاعور	عضو هيئة التحرير
د. الياس خلف	عضو هيئة التحرير
د. روعة الفقس	عضو هيئة التحرير
د. محمد الجاسم	عضو هيئة التحرير
د. خليل الحسن	عضو هيئة التحرير
د. هيثم حسن	عضو هيئة التحرير
د. أحمد حاج موسى	عضو هيئة التحرير

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

سورية . حمص . جامعة حمص . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : 2138071 31 963 ++

. موقع الإنترنت : www.homs-univ.edu.sy

. البريد الالكتروني : journal.homs-univ.edu.sy

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
- طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
- **اذا كان الباحث طالب دراسات عليا:**

يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقته على النشر في المجلة.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:**

يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة حمص :**

يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.

- **اذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :**

يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):**

عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1- مقدمة

2- هدف البحث

3- مواد وطرق البحث

4- النتائج ومناقشتها .

5- الاستنتاجات والتوصيات .

6- المراجع.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسـبة لكليات (الآداب – الاقتصـاد– التربية – الحقوق – السياحة – التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):**
- عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1. مقدمة.
2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
3. أهداف البحث و أسئلته.
4. فرضيات البحث و حدوده.
5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
7. منهج البحث و إجراءاته.
8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
9. نتائج البحث.
10. مقترحات البحث إن وجدت.
11. قائمة المصادر والمراجع.

7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:

أ- قياس الورق 17.5×25 B5.

ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 – يمين 2.5- يسار 2.5 سم

ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8

ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20

ـ كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي ـ العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.

ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.

8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.

9- تقديم أي بحث للنشـر في المجلة يدل ضـمناً على عدم نشـره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة حمص يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة ـ الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة ـ سنة النشر ـ وتتبعها معترضة (–) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة ـ دار النشر وتتبعها فاصلة ـ الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة.

وفيما يلي مثال على ذلك:

–MAVRODEANUS, R1986– **Flame Spectroscopy**. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

ـــ بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة ـــ المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة ـــ أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة.

مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases **Clinical Psychiatry News** , Vol. 4. 20 – 60

ج. إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. **دفع رسم نشر (600) ل.س ستمئة ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة حمص.**
2. **دفع رسم نشر (2000) ل.س الفا ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .**
3. **دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .**
4. **دفع مبلغ (150) ل.س مئة وخمسون ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.**

المحتوى

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
استخدام الشبكة العصبونية لتقييم أثر إضافة البوليمر الأكريليكي في تحسين مواصفات الطابق الترابي (CBR)	أحمد هيثم علي د. أكرم سلامة	36-11
تأثير تغير تماسك التربة المشبعة على قدرة تحمل التربة الحاملة لأشكال مختلفة من الأساسات السطحية المعرضة لحمولات محورية شاقولية	د. كنان زين العابدين	60-37
تأثير الخصائص الميكانيكية لمواد الإنشاء على معامل السلوك اللامرن(R) لنموذجين من خزانات المياه البيتونية المسلحة العالية تحت الأحمال الزلزالية	رهام أبو بالا د. عصام ناصر د. بسام حويجة	96-61
تأثير درجة الحرارة على كفاءة إعادة تدوير أكياس البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) في مذيب البارا-إكزايلين	هويدا شحود أ.د. محمد المحمد أ.د. ثناء شريتح	132-97
دراسة التحلل الكيميائي لحبيبات البولي إيثيلين باستخدام مزيجpara-Xylene البارا‌إكزايلين والأسيتون عند درجة حرارة ثابتة	هويدا شحود أ.د. محمد المحمد أ.د. ثناء شريتح	153-133

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

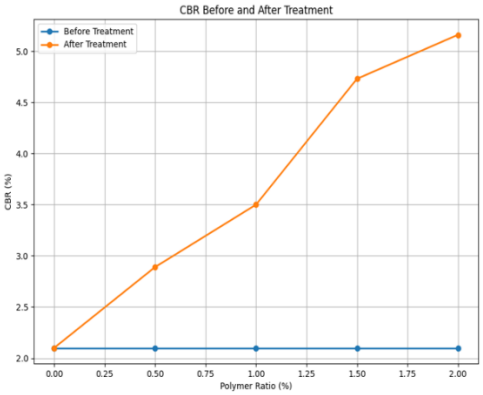
$R^2 = 0.857$ يعني أن النموذج يفسر 85.7% من التباين في قيم CBR .

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

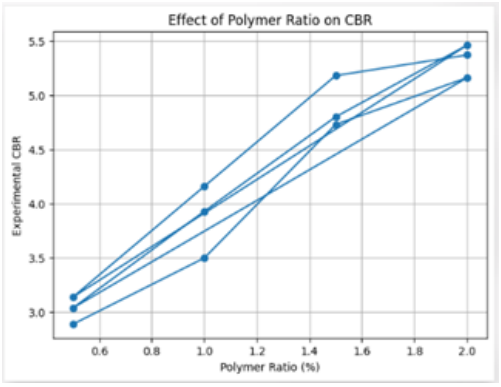
MAE	RMSE	R^2	النموذج
0.82	1.18	0.69	Linear regression
0.8543	1.1876	0.6845	Random Forest
0.8765	1.2134	0.6821	Support Vector Regression (SVR)

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

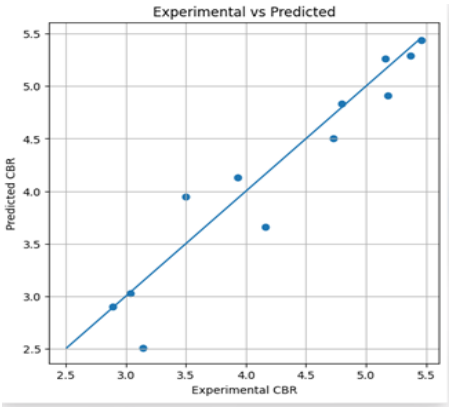
ويعزى تفوق ANN إلى قدرتها على تمثيل العلاقات غير الخطية المعقدة بين خصائص التربة ونسبة البوليمر، بينما تعتمد النماذج الأخرى على افتراضات أبسط و قدرات تمثيل أقل مرونة.



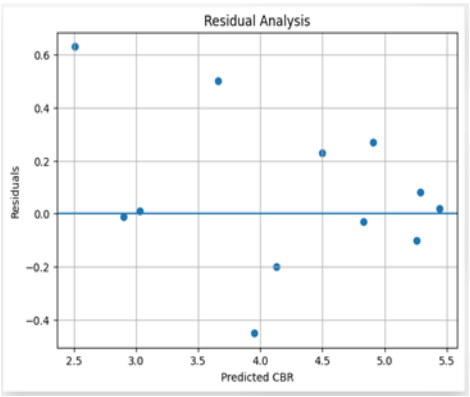
الشكل (1)مخطط CBR قبل وبعد المعالجة



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.

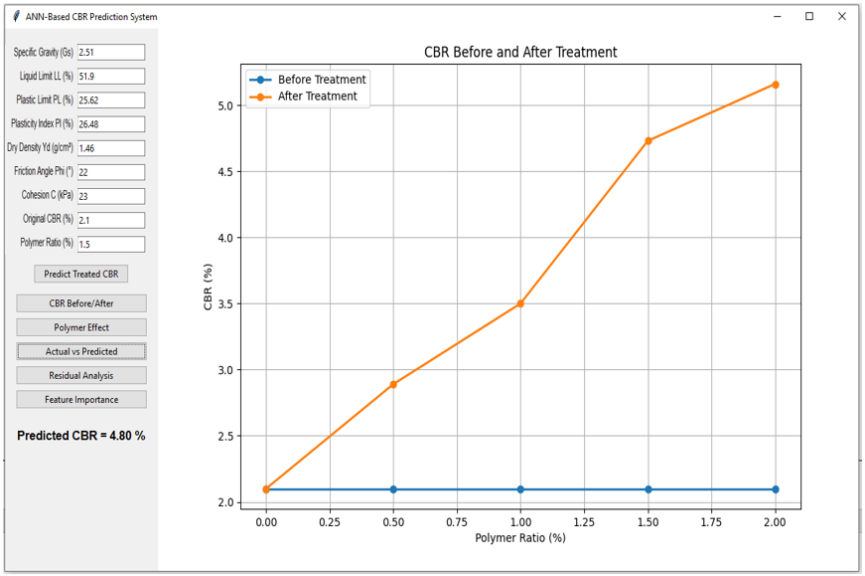
2- أظهرت النتائج أن النموذج أظهر قدرة تنبؤية ضمن حدود قاعدة البيانات المستخدمة .

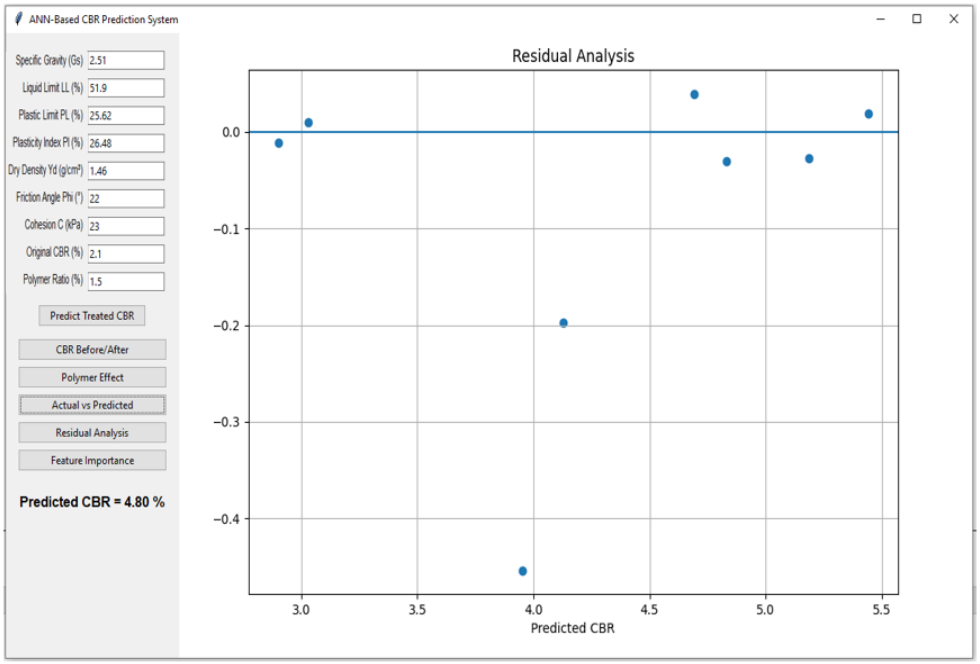
3-أثبت النموذج العصبوني كفاءة جيدة في التنبؤ بقيم CBR معامل تحديد (R^2) يبلغ 0.857 للنموذج المدرب ودقة جيدة في التنبؤ مع متوسط خطأ مطلق (MAE) بقيمة 0.447 مدعوماً بقاعدة بيانات تجريبية متكاملة تجمع بين البيانات المخبرية والبيانات التجريبية المنشورة.

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

تأثير تغير تماسك التربة المشبعة على قدرة تحمل التربة الحاملة لأشكال مختلفة من الأساسات السطحية المعرضة لحمولات محورية شاقولية

د.م. كنان زين العابدين
عضو هيئة تدريسية في قسم الهندسة الجيوتكنيكية– كلية الهندسة المدنية– جامعة حماة.

ملخص البحث

في هذا البحث، تم توظيف طريقة ترزاكي (1943) لحساب قدرة التحمل الحدية للترب المتماسكة المشبعة، وتم أيضاً استخدام الطريقة العامة التي قدمها مايرهوف (1963) وهانزن (1970) وآخرون.
لقد تمت مقارنة نتائج هذه الطرق المختلفة عند حساب قدرة التحمل الحدية للتربة، تحت أشكال مختلفة لأساسات سطحية معرضة لحمولات محورية شاقولية، وذلك في حالة التربة المتماسكة المشبعة.
وقد ركز هذا البحث على تأثير تغير التماسك وشكل الأساس وأبعاد الأساس على قدرة تحمل التربة.
تم استنتاج أن قدرة التحمل الحدية للتربة المتماسكة تزداد مع ازدياد التماسك في كل الحالات مهما كان شكل الأساس، وذلك عن الحساب بطريقة ترزاكي والطريقة العامة، مع توضيح أسباب الاختلاف بالنتائج بين الطرق المختلفة.

كلمات مفتاحية: قدرة التحمل – التربة المتماسكة المشبعة– الأساسات السطحية.

The Effect of Cohesion Changing of Saturated Soils on the Bearing Capacity of Soils Carrying Different Shapes of Shallow Foundations Subjected to Vertical Axial Loads

Dr. Kinan Zain Alabideen Department of Geotechnical Engineering – Faculty of Civil Engineering – Hama University

Abstract

In this research, Terzaghi's method (1943) was adopted to calculate the ultimate bearing capacity of saturated cohesive soils. Also, the general method presented by Meyerhof (1963), Hansen (1970) and others was used.

The results of these different methods were compared when calculating the ultimate bearing capacity of soils under various shallow foundation shapes subjected to vertical axial loads, for saturated cohesive soils.

Emphasis was placed on the effect of the changing of cohesion, foundation shape and dimensions of foundation on bearing capacity of soils.

It was concluded that the ultimate bearing capacity of cohesive soil increases with increasing cohesion in all cases, regardless of the foundation shape, when calculated using Terzaghi's method and the general method, with an explanation of the reasons for the difference in results between the different methods.

Key Words: Bearing Capacity, Saturated Cohesive Soil, Shallow Foundation.

تأثير تغير تماسك التربة المشبعة على قدرة تحمل التربة الحاملة لأشكال مختلفة من الأساسات السطحية المعرضة لحمولات محورية شاقولية

1- مقدمة:

لقد قام كل من Terzaghi (1943), Meyerhof (1963), Hansen (1970), Chen (1975) وآخرون بتطوير طرق حساب قدرة تحمل التربة للأساسات مختلفة الأشكال.

تم الانطلاق في هذا البحث من طريقة ترزاكي (1943) لحساب قدرة التحمل الحدية للأساسات السطحية، وقد تم أيضاً استخدام طريقة مايرهوف (1963) وهانزن (1970) وطريقة مختلطة معدلة عن طريقة هانزن من قبل فيسيك (1975)، لأن هذه الطرق هي الأكثر شهرةً والأكثر استخداماً.

2- حساب قدرة تحمل التربة بطريقة ترزاكي:

لقد قدم ترزاكي، 1943 المعادلة الآتية لحساب قدرة التحمل الحدية للأساس المستمر:

$$q_u = cN_c + qN_q + 0.5\gamma BN_\gamma \quad \ldots\ldots (1)$$

حيث:

- q_u $[kPa]$ قدرة التحمل الحدية الكلية لتربة التأسيس.
- (N_C, N_q , N_γ) عوامل قدرة تحمل التربة.
- q $[kPa]$ قيمة الضغط الذي تطبقه الردميات عند منسوب التأسيس.
- c $[kPa]$ تماسك التربة.
- B [m] عرض قاعدة الأساس.
- γ [kN/m^3] الوزن الحجمي لتربة التأسيس.
- يسمى الحد الأول c N_c بحد التماسك، والحد الثاني بحد العمق، والحد الثالث بحد السطح.

إن المعادلة (1) صالحة من أجل الأساسات المستمرة(الشريطية) والتي تتعرض لحمولات مركزية شاقولية.

ولتعيين قدرة التحمل للأشكال الأخرى تستخدم العلاقات الآتية:

1) الأساس المستطيل:

$$q_u = \left(1 + 0.3\frac{B}{L}\right)cN_c + qN_q + 0.5\left(1 - 0.2\frac{B}{L}\right)\gamma BN_\gamma \quad \ldots\ldots (2)$$

2) الأساس المربع:

$$q_u = 1.3\, cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \quad \ldots\ldots (3)$$

3) الأساس الدائري:

$$q_u = 1.3\, cN_c + qN_q + 0.3\,\gamma BN_\gamma \quad \ldots\ldots (4)$$

عوامل قدرة التحمل:

إن الاختلاف في قيم Nc و Nq بالدراسات كان ضئيلاً بينما الفروقات في قيم العامل N_γ كانت كبيرة

$$N_q = e^{\pi \tan \emptyset}\ \tan^2(45 + 0.5\emptyset) \quad \ldots\ldots (5)$$

$$N_c = \cot \emptyset \left(N_q - 1\right) \quad \ldots\ldots (6)$$

إن N_γ يوجد اختلاف في قيمتها باختلاف العلاقة التي اعتمدها كل باحث:

مايرهوف1963، $N\gamma = (Nq - 1)tan(1.4\emptyset)$ ..... (7)

هانزن1970، $N\gamma = 1.5(Nq - 1)\tan(\emptyset)$ ..... (8)

فيسيك1975، $N\gamma = 2(Nq + 1)\tan(\emptyset)$ ..... (9)

شين1975، $N\gamma = 2\left(1 + N_q\right)tan\emptyset\ tan\ (45 + 0.2\emptyset)$ ..... (10)

3- العلاقة العامة لحساب قدرة التحمل:

لقد تناول الكثير من الباحثين صيغاً جديدة لقدرة التحمل تأخذ بعين الاعتبار المتغيرات التي غابت في علاقة ترزاكي.

تعطى المعادلة العامة لقدرة التحمل الحدبة للتربة بالعلاقة الآتية:

$$q_u = \mathrm{c}N_c s_c d_c i_c + qN_q s_q d_q i_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad \ldots\ldots (11)$$

حيث:

- s , d , i : هي عوامل شكل الأساس وعمق الأساس وميل الحمولة (على التوالي). ولن نتطرق في هذا البحث لعوامل الميل، لأن البحث يدرس حالة حمولة شاقولية مركزية فقط.

3-1 عوامل العمق والشكل وفق مايرهوف:

من أجل($D_F = D < B$) تكون عوامل العمق:

$$d_c = 1 + 0.2\sqrt{N_\emptyset}\,\frac{D}{B}$$

$$d_q = d_\gamma = 1 \qquad (\emptyset = 0)$$

$$d_q = d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{N_\emptyset}\frac{D}{B} \qquad (\emptyset > 10°)$$

$$N_\emptyset = tan^2(45 + 0.5\emptyset)$$ حيث:

وتكون عوامل الشكل:

$$s_c = 1 + 0.2N_\emptyset \frac{B}{L}$$

$$s_q = s_\gamma = 1 \qquad (\emptyset = 0°)$$

$$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1N_\emptyset \frac{B}{L} \qquad (\emptyset > 10°) \qquad \dots\dots\dots\dots (12)$$

3-2 عوامل العمق والشكل وفق هانزن:

من أجل $(D_F = \mathrm{D} < B)$ تكون عوامل العمق:

$$d_c = 1 + 0.4\frac{D}{B} \qquad (\emptyset = 0°)$$

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \tan\emptyset} \qquad (\emptyset > 0°)$$

$$d_q = 1 + 2\tan\emptyset\,(1 - \sin\emptyset)^2\frac{D}{B}$$

$$d_\gamma = 1$$

عوامل الشكل:

$$s_c = 1 + \frac{B}{L}\frac{N_q}{N_c}$$

$$s_q = 1 + \frac{B}{L}\tan\emptyset$$

$$s_\gamma = 1 - 0.4\frac{B}{L} \qquad \dots\dots\dots\dots\dots\dots (13)$$

بحيث يؤخذ الحد(B/L) مساوياً للواحد إذا كان الأساس دائرياً أو مربعاً.

3-3عوامل قدرة تحمل التربة وعوامل العمق والشكل وفق الطريقة العامة المختلطة الناتجة عن تعديلات على طريقة هانزن:

عوامل قدرة التحمل:

$$N_q = e^{\pi\tan\emptyset}\,\tan^2(45 + 0.5\emptyset)$$

$$N_c = \cot\emptyset\,(N_q - 1)$$

$$N\gamma = 2(Nq - 1)\tan\emptyset$$

عوامل العمق:

$$d_c = dq = 1 + 0.35\frac{D}{B}$$
$$d_\gamma = 1$$

عوامل الشكل:

$$s_c = \frac{s_q * N_q - 1}{N_q - 1}$$
$$s_q = 1 + \frac{B}{L} sin\,\phi$$
$$s_\gamma = 1 - 0.3\frac{B}{L} \quad \dots\dots\dots\dots (14)$$

4- توصيف حالة الدراسة:

تمت دراسة حالة الأساسات السطحية المعرضة لحمولات شاقولية محورية المستندة على تربة متماسكة مشبعة.

تم حساب قدرة التحمل ورسم مخططات للقيم الناتجة لملاحظة تغيرات قدرة التحمل عند تغيير العوامل المؤثرة عليها. مواصفات التربة المدروسة: الوزن الحجمي لتربة التأسيس $\gamma = 19.5\ kN/m^3$ وزاوية احتكاك التربة $\phi = 0°$ ، والتماسك $c = 18\ kN/m^2$

عمق التأسيس D=1m، الوزن الحجمي لتربة الردم $\gamma_1 = 18\ kN/m^3$

5- حساب قدرة تحمل التربة مع تغيير عرض الأساس:

5-1 قدرة تحمل التربة وفق علاقة ترزاكي:

تم استخدام العلاقات من (5) إلى (10) لتحديد عوامل قدرة تحمل التربة فكانت القيم كما في الجدول (1)

الجدول (1): عوامل قدرة التحمل

Nc	Nq	Nɣm	Nɣh	Nɣv	Nɣchen
5.70	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

5-1-1- **حالة أساس مستمر**: تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(1) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير عرض الأساس، فكانت النتائج كما في الشكل (1).

الشكل(1): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستمر

5-1-2- **حالة أساس مربع**: تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(3) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير عرض الأساس، فكانت النتائج كما في الشكل (2).



الشكل(2): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مربع

5-1-3- **حالة أساس دائري:** تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(4) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير عرض الأساس، فكانت النتائج كما في الشكل (2).

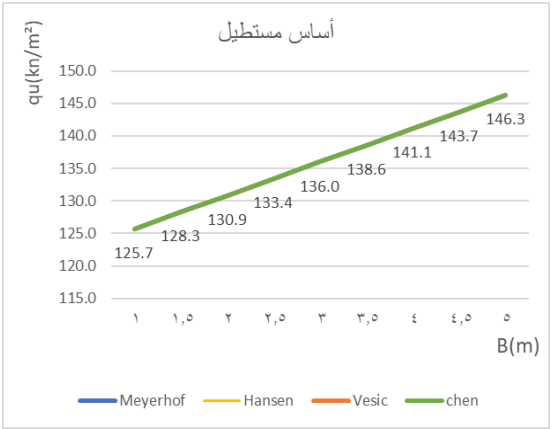
5-1-4- **أساس مستطيل:** تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(2) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير عرض الأساس، حيث تم الحساب بتثبيت قيمة L، أولاً كقيمة ثابتة في كل الحالات، ثم كقيمة تتغير بنسبة محددة مع تغير عرض الأساس فكانت النتائج كما في الشكل (3).

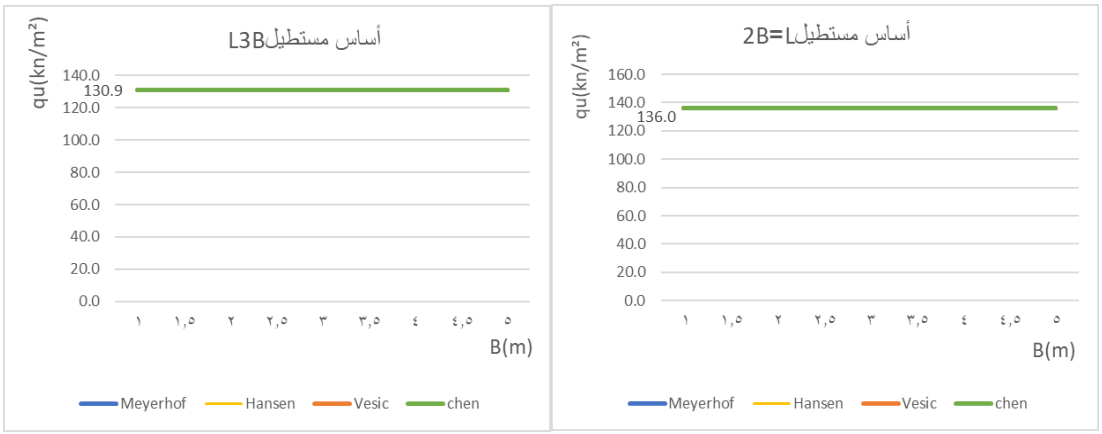
5-1-5 ملاحظات:

1) عندما تكون التربة المتماسكة مشبعة تكون زاوية احتكاكها معدومة ولذلك عند حساب عوامل قدرة تحمل التربة نجد أن $N_\gamma = 0$ ، وبالنتيجة يكون الحد الثالث (حد السطح) من معادلة ترزاكي لحساب قدرة التحمل معدوماً أي تكون قيمة قدرة التحمل ثابتة وفق العلاقات الأربع لحساب N_γ (مايرهوف، هانزن، فيزك، شين)

2) نلاحظ أن قدرة تحمل التربة لأساس مستطيل (L=6m) ازدادت مع ازدياد عرض الأساس لأن النسبة B/L ازدادت، أما في الحالة التي يتعلق فيها طول الأساس بالعرض بنسبة ثابتة (L=2B ; L=3B) فقد بقيت قدرة التحمل ثابتة.

L=Const=6m ❖





الشكل(3): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستطيل

5-2 قدرة تحمل التربة وفق العلاقة العامة:

تم استخدام العلاقات من (5) إلى (8) وعلاقة مختلطة N_γ المذكورة في مجموعة العلاقات (14) لتحديد عوامل قدرة تحمل التربة فكانت القيم كما في الجدول (2).

الجدول (2): عوامل قدرة التحمل

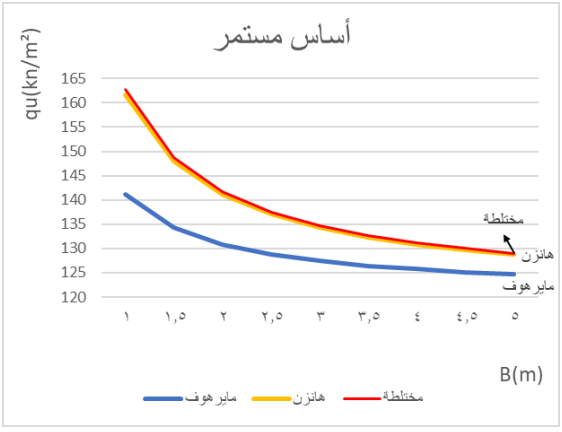
Nc	Nq	Nɣm	Nɣh	Nɣمختلطة
5.70	1.00	0.00	0.00	0.00

كما تم استخدام مجموعة العلاقات (12) بطريقة مايرهوف، ومجموعة العلاقات (13) بطريقة هانزن، ومجموعة العلاقات (14) بالطريقة المختلطة، وذلك لإيجاد عوامل العمق وعوامل الشكل.

5-2-1-حالة أساس مستمر:

تم حساب قدرة التحمل من المعادلة (11) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير عرض الأساس، فكانت النتائج كما في الشكل(4).

B	مايرهوف				هانسن				طريقة مختلطة			
	عوامل العمق			qu	عوامل العمق			qu	عوامل العمق			qu
	dc	dq	dγ		dc	dq	dγ		dc	dq	dγ	
1	1.20	1.00	1.00	141.1	1.40	1.00	1.00	161.6	1.35	1.35	1.00	162.8
1.5	1.13	1.00	1.00	134.3	1.27	1.00	1.00	148.0	1.23	1.23	1.00	148.7
2	1.10	1.00	1.00	130.9	1.20	1.00	1.00	141.1	1.18	1.18	1.00	141.7
2.5	1.08	1.00	1.00	128.8	1.16	1.00	1.00	137.0	1.14	1.14	1.00	137.5
3	1.07	1.00	1.00	127.4	1.13	1.00	1.00	134.3	1.12	1.12	1.00	134.7
3.5	1.06	1.00	1.00	126.5	1.11	1.00	1.00	132.3	1.10	1.10	1.00	132.7
4	1.05	1.00	1.00	125.7	1.10	1.00	1.00	130.9	1.09	1.09	1.00	131.2
4.5	1.04	1.00	1.00	125.2	1.09	1.00	1.00	129.7	1.08	1.08	1.00	130.0
5	1.04	1.00	1.00	124.7	1.08	1.00	1.00	128.8	1.07	1.07	1.00	129.0



الشكل(4) : قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستمر

5-2-2- حالة أساس مربع:

بما أن الأساس مربع وبالتالي النسبة بين الطول والعرض ثابتة وتساوي الواحد (B/L=1) ، فإن عوامل الشكل S تبقى ثابتة مع تغير عرض الأساس، وهي مبينة في الجدول (3).

الجدول(3): عوامل الشكل

مختلطة	
Sc	1.00
Sq	1.00
Sγ	0.70

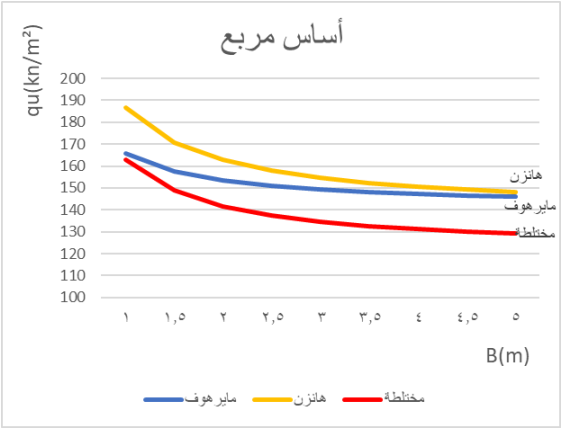
هانسن	
Sc	1.18
Sq	1.00
Sγ	0.6

مايرهوف	
Sc	1.20
Sq=Sγ	1.00

B	مايرهوف				هاتون				طريقة مختلطة			
	عوامل العمق			qu	عوامل العمق			qu	عوامل العمق			qu
	dc	dq	dγ		dc	dq	dγ		dc	dq	dγ	
1	1.20	1.00	1.00	165.7	1.40	1.00	1.00	186.8	1.35	1.35	1.00	162.8
1.5	1.13	1.00	1.00	157.5	1.27	1.00	1.00	170.8	1.23	1.23	1.00	148.7
2	1.10	1.00	1.00	153.4	1.20	1.00	1.00	162.7	1.18	1.18	1.00	141.7
2.5	1.08	1.00	1.00	151.0	1.16	1.00	1.00	157.9	1.14	1.14	1.00	137.5
3	1.07	1.00	1.00	149.3	1.13	1.00	1.00	154.7	1.12	1.12	1.00	134.7
3.5	1.06	1.00	1.00	148.2	1.11	1.00	1.00	152.4	1.10	1.10	1.00	132.7
4	1.05	1.00	1.00	147.3	1.10	1.00	1.00	150.7	1.09	1.09	1.00	131.2
4.5	1.04	1.00	1.00	146.6	1.09	1.00	1.00	149.3	1.08	1.08	1.00	130.0
5	1.04	1.00	1.00	146.0	1.08	1.00	1.00	148.2	1.07	1.07	1.00	129.0

تم حساب قدرة التحمل من المعادلة (11) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير عرض الأساس، كما هو مبين في الشكل (5).

الشكل(5): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مربع



5-2-3- حالة أساس دائري:

تكون قيم قدرة التحمل هي نفسها كما في حالة الأساس المربع (وفق العلاقة العامة)، وإن سبب عدم تغير النتائج هو عدم تغير قيم عوامل الشكل والعمق في الحالتين، لأن (B/L=1) في كلا الحالتين.

5-3-4- حالة أساس مستطيل:

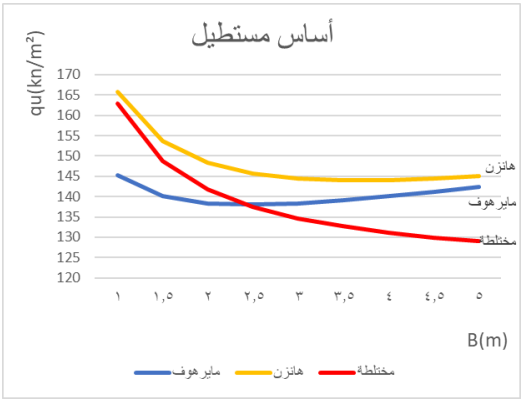
تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(11) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير عرض الأساس، كما هو مبين في الشكل (6).

L=Const=6m

B	L	مايرهوف						
		عوامل العمق			عوامل الشكل			qu
		dc	dq	dγ	Sc	Sq	Sγ	
1	6	1.20	1.00	1.00	1.03	1.00	1.00	145.2
1.5	6	1.13	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	140.1
2	6	1.10	1.00	1.00	1.07	1.00	1.00	138.4
2.5	6	1.08	1.00	1.00	1.08	1.00	1.00	138.0
3	6	1.07	1.00	1.00	1.10	1.00	1.00	138.4
3.5	6	1.06	1.00	1.00	1.12	1.00	1.00	139.1
4	6	1.05	1.00	1.00	1.13	1.00	1.00	140.1
4.5	6	1.04	1.00	1.00	1.15	1.00	1.00	141.2
5	6	1.04	1.00	1.00	1.17	1.00	1.00	142.5

B	L	هانسن						
		عوامل العمق			عوامل الشكل			qu
		dc	dq	dγ	Sc	Sq	Sγ	
1	6	1.40	1.00	1.00	1.03	1.00	0.93	165.8
1.5	6	1.27	1.00	1.00	1.04	1.00	0.90	153.7
2	6	1.20	1.00	1.00	1.06	1.00	0.87	148.3
2.5	6	1.16	1.00	1.00	1.07	1.00	0.83	145.7
3	6	1.13	1.00	1.00	1.09	1.00	0.80	144.5
3.5	6	1.11	1.00	1.00	1.10	1.00	0.77	144.0
4	6	1.10	1.00	1.00	1.12	1.00	0.73	144.1
4.5	6	1.09	1.00	1.00	1.13	1.00	0.70	144.4
5	6	1.08	1.00	1.00	1.15	1.00	0.67	145.0

B	L	طريقة مختلطة						
		عوامل العمق			عوامل الشكل			qu
		dc	dq	dɣ	Sc	Sq	Sɣ	
1	6	1.35	1.35	1.00	1.00	1.00	0.95	162.8
1.5	6	1.23	1.23	1.00	1.00	1.00	0.93	148.7
2	6	1.18	1.18	1.00	1.00	1.00	0.90	141.7
2.5	6	1.14	1.14	1.00	1.00	1.00	0.88	137.5
3	6	1.12	1.12	1.00	1.00	1.00	0.85	134.7
3.5	6	1.10	1.10	1.00	1.00	1.00	0.83	132.7
4	6	1.09	1.09	1.00	1.00	1.00	0.80	131.2
4.5	6	1.08	1.08	1.00	1.00	1.00	0.78	130.0
5	6	1.07	1.07	1.00	1.00	1.00	0.75	129.0



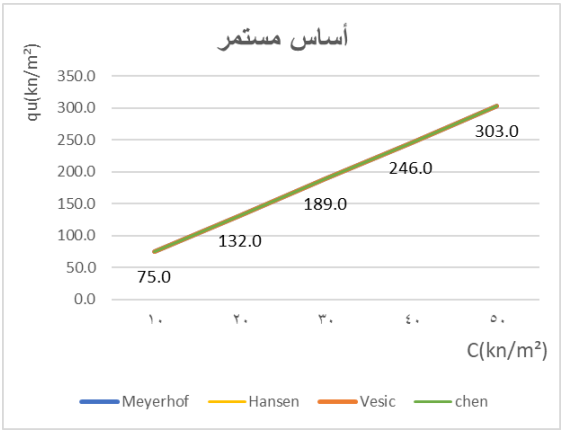
الشكل(6) : قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستطيل

6- حساب قدرة تحمل التربة مع تغيير تماسك التربة:

6-1 قدرة تحمل التربة وفق علاقة ترزاكي:

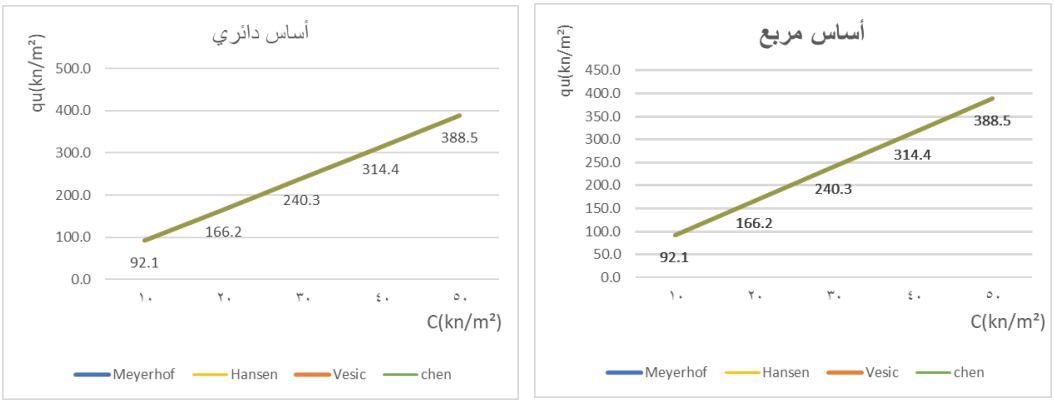
حيث تم اعتماد عرض الأساس 2m، وعوامل قدرة التحمل كما في الجدول (2).

6-1-1- **حالة أساس مستمر**: تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(1) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير التماسك، فكانت النتائج كما في الشكل (7).



الشكل (7): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستمر

6-1-2- **حالة أساس مربع:** تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(3) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير التماسك، فكانت النتائج كما في الشكل (8).

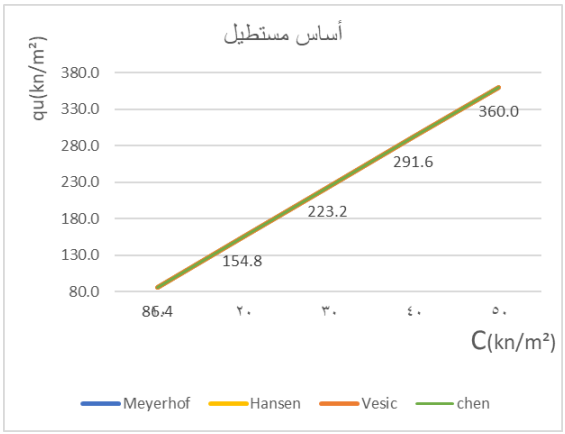


الشكل (8): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستمر مربع

6-1-3- **حالة أساس دائري:** تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(4) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير التماسك، فكانت النتائج كما في الشكل (8).

لم تختلف النتائج في حالة الأساس الدائري عن النتائج في حالة الأساس المربع لأن العلاقتين (3) و (4) تتطابقان في حدي التماسك والعمق، وتختلفان في حد السطح؛ وهو هنا معدوم في الحالتين لأن $N_\gamma = 0$.

6-1-4- **حالة أساس مستطيل:** تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(2) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير التماسك، فكانت النتائج كما في الشكل (9).



الشكل(9): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستطيل

6-1-5 ملاحظات:

- تزداد قدرة تحمل التربة مع ازدياد تماسك تربة التأسيس

- قيمة قدرة التحمل ثابتة وفق علاقات N_γ الأربع (مايرهوف، هانزن، فيزك، شين) لأن $N_\gamma = 0$

6-2 قدرة تحمل التربة وفق العلاقة العامة:

عوامل العمق ثابتة لجميع الأساسات لأن المتغير هو التماسك ، وهي مبينة في الجدول (4).

الجدول (4): عوامل العمق

مختلطة	
dc	1.18
dq	1.18
dγ	1.0

هانسن	
dc	1.20
dq	1.00
dγ	1.0

مايرهوف	
dc	1.10
dq	1.00
dγ	1.00

6-2-1- **حالة أساس مستمر:** تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(11) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير التماسك، فكانت النتائج كما في الشكل (10).

أساس مستمر			
C	مايرهوف	هانزن	مختلطة
10	80.7	86.4	88.1
20	143.4	154.8	155.1
30	206.1	223.2	222.1
40	268.8	291.6	289.1
50	331.5	360.0	356.0



الشكل(10): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستمر

6-2-2- **حالة أساس مربع:** تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(11) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير التماسك، فكانت النتائج كما في الشكل (11).

مختلطة	
Sc	1.00
Sq	1.00
Sɣ	0.70

هانسن	
Sc	1.18
Sq	1.00
Sɣ	0.6

مايرهوف	
Sc	1.20
Sq=Sɣ	1.00

أساس مربع			
C	مايرهوف	هانزن	مختلطة
10	93.2	98.4	88.1
20	168.5	178.8	155.1
30	243.7	259.2	222.1
40	319.0	339.6	289.1
50	394.2	420.0	356.0



الشكل(11): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مربع

6-2-3- **حالة أساس دائري:** قيم قدرة التحمل هي نفسها للأساس المربع (وفق العلاقة العامة)

6-2-4- **حالة أساس مستطيل 2 m ×3:** تم حساب قدرة التحمل من المعادلة(11) ومقارنة قيم قدرة التحمل مع تغير التماسك، فكانت النتائج كما في الشكل (12).

مختلطة	
Sc	1.00
Sq	1.00
Sɣ	0.80

هانسن	
Sc	1.12
Sq	1.00
Sɣ	0.7

مايرهوف	
Sc	1.13
Sq=Sɣ	1.00

أساس مستطيل			
C	مايرهوف	هانزن	مختلطة
10	89.1	94.4	88.1
20	160.1	170.8	155.1
30	231.2	247.2	222.1
40	302.2	323.6	289.1
50	373.3	400.0	356.0

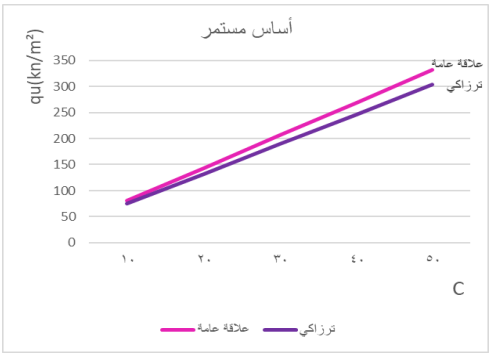


الشكل(12): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستطيل

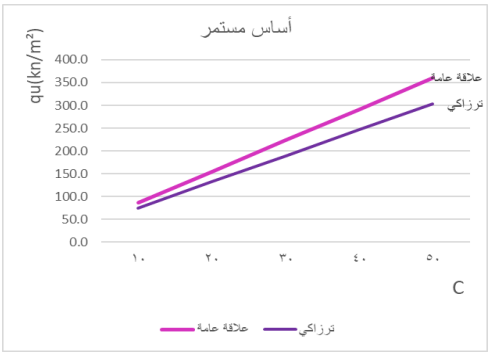
6-3 مقارنة بين قدرة تحمل التربة وفق ترزاكي والعلاقة العامة مع تغير التماسك:

6-3-1-حالة الأساس المستمر:

أساس مستمر(مايرهوف)		
C	علاقة عامة	ترزاكي
10	80.7	75.0
20	143.4	132.0
30	206.1	189.0
40	268.8	246.0
50	331.5	303.0



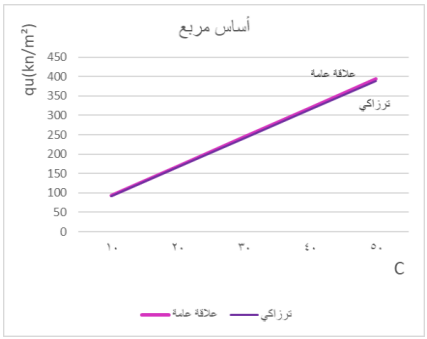
أساس مستمر(هانزن)		
C	علاقة عامة	ترزاكي
10	86.4	75.0
20	154.8	132.0
30	223.2	189.0
40	291.6	246.0
50	360.0	303.0



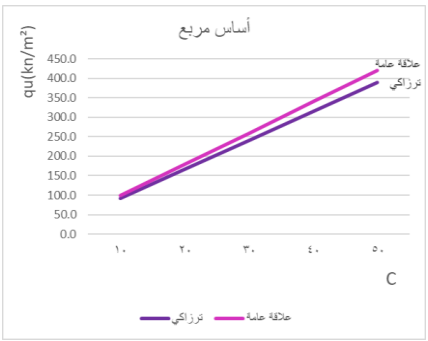
الشكل(13): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستمر

6-3-2-حالة الأساس المربع:

أساس مربع(مايرهوف)		
C	علاقة عامة	ترزاكي
10	93.2	92.1
20	168.5	166.2
30	243.7	240.3
40	319.0	314.4
50	394.2	388.5



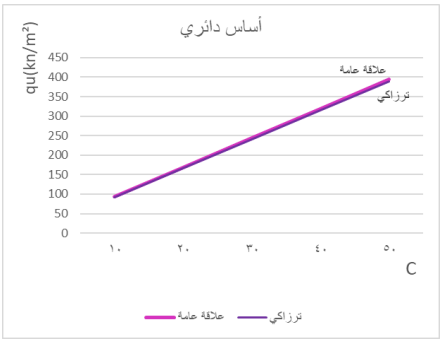
أساس مربع(هانزن)		
C	علاقة عامة	ترزاكي
10	98.4	92.1
20	178.8	166.2
30	259.2	240.3
40	339.6	314.4
50	420.0	388.5



الشكل(14): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مربع

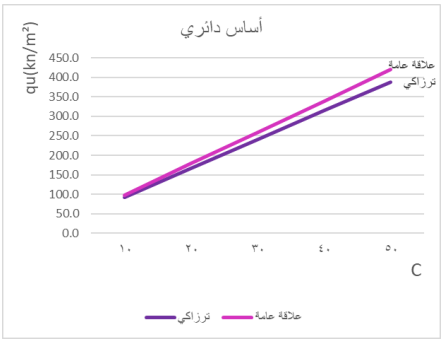
6-3-3-حالة الأساس الدائري:

أساس دائري(مايرهوف)		
C	علاقة عامة	ترزاكي
10	93.2	92.1
20	168.5	166.2
30	243.7	240.3
40	319.0	314.4
50	394.2	388.5



الشكل(15): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس دائري بطريقة مايرهوف

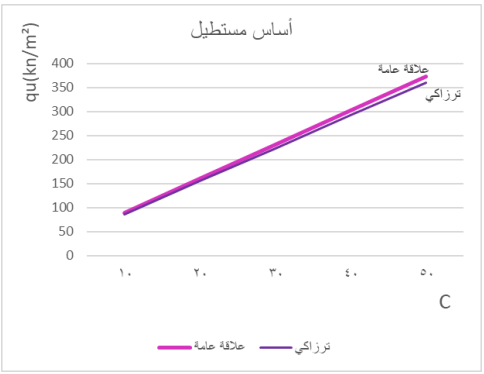
أساس دائري(هانزن)		
C	علاقة عامة	ترزاكي
10	98.4	92.1
20	178.8	166.2
30	259.2	240.3
40	339.6	314.4
50	420.0	388.5



الشكل(16): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس دائري بطريقة هانزن

6-3-4-حالة أساس مستطيل (2*3m):

أساس مستطيل(مايرهوف)		
C	علاقة عامة	ترزاكي
10	89.1	86.4
20	160.1	154.8
30	231.2	223.2
40	302.2	291.6
50	373.3	360.0



أساس مستطيل(هانزن)		
C	علاقة عامة	ترزاكي
10	94.4	86.4
20	170.8	154.8
30	247.2	223.2
40	323.6	291.6
50	400.0	360.0



الشكل(17): قدرة التحمل الحدية الكلية $q_u\ [kN/m^2]$ في حالة أساس مستطيل

7- النتائج النهائية للبحث:

1- عند حساب قدرة التحمل في حالة التربة المتماسكة المشبعة بطريقة ترزاكي تكون قيمة قدرة تحمل التربة مستقلة عن عرض الأساس، ويكون حد السطح في العلاقة المذكورة معدوماً، لأن زاوية الاحتكاك الداخلي تكون معدومة، وقيمة العامل Nγ تكون معدومة، ولا يوجد اختلاف بين قيم Nγ المحسوبة حسب مايرهوف وهانزن وشين وفيسيك. وينطبق هذا الكلام على الأساس المستمر والأساس المربع والأساس الدائري، أما بالنسبة للأساس المستطيل فتختلف قدرة تحمل التربة باختلاف عرض الأساس إذا اختلفت النسبة B/L لوجود هذه النسبة في حد التماسك.

2- عند حساب قدرة التحمل في حالة التربة المتماسكة المشبعة بالطريقة العامة تكون قيمة قدرة تحمل التربة متعلقة بعرض الأساس، ويختلف تأثير تغير عرض الأساس على قيمة قدرة تحمل التربة زيادة أو نقصاناً حسب الحالة، كما هو واضح في النتائج ضمن الأشكال المعروضة في هذا البحث، لأن عوامل العمق تتعلق بالنسبة $\frac{D_F}{B}$ ، أي تنقص بازدياد B، أما عوامل الشكل فتتعلق بالنسبة $\frac{B}{L}$ ، أي تزداد بازدياد B.

3- بإجراء المقارنة في الحالات المختلفة لشكل الأساس نجد أن قيمة قدرة التحمل المحسوبة بالعلاقة العامة أكبر بقليل من القيمة المحسوبة بعلاقة ترزاكي وأحياناً مطابقة لها تقريباً. ويفسر ذلك بأن الاختلاف بين الطريقتين هو في علاقات N_γ التجريبية للباحثين المختلفين، أما من ناحية قيم N_c و N_q فلا يوجد اختلاف، وفي الحالة المدروسة $N_\gamma = 0$.

4- تزداد قدرة تحمل الحدية للتربة المتماسكة مع ازدياد التماسك في كل الحالات مهما كان شكل الأساس، وذلك بطريقة ترزاكي والطريقة العامة.

5- عند تغير قيم تماسك التربة؛ كانت قيم قدرة التحمل الحدية للتربة المتماسكة المشبعة نفسها في حالتي الأساس المربع والأساس الدائري بطريقة ترزاكي، وتفسير ذلك أن العلاقتين (3) و (4) تتطابقان في حدي التماسك والعمق، وتختلفان في حد السطح؛ وهو هنا معدوم في الحالتين لأن $N_\gamma = 0$.

6- عند تغير قيم تماسك التربة؛ كانت قيم قدرة التحمل الحدية للتربة المشبعة نفسها في حالتي الأساس المربع والأساس الدائري بالطريقة العامة بمختلف أشكالها، وإن سبب عدم تغير النتائج هو عدم تغير قيم عوامل الشكل والعمق في الحالتين، لأن (B/L=1) في كلا الحالتين؛ بالإضافة إلى أن $N_\gamma = 0$.

8- المراجع المستخدمة:

1- Brown, JD, and Meyerhof, GG (1969). "Experimental Study of Bearing Capacity in Layered Clays", 7th ICSFME, Vol. 2.

2- Chen, FH (1988). "Foundations on Expansive Soils". Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.

3- Hansen, JB (1970). "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", Danish Geotechnical Institute Bul. No. 28, Copenhagen.

4- Meyerhof, GG (1951). "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", Geotechnique, Vol. 2, No. 4.

5- Meyerhof, GG (1963). "Some Recent Research on Bearing Capacity of Foundations", CGJ Ottawa, Vol. 1.

6- Meyerhof, GG (1965). "Shallow Foundations", JSMFD, ASCE, Vol. 91, SM 2.

7- Terzaghi, K (1943). "Theoretical Soil Mechanics", Wiley and Sons, New York.

8- Terzaghi, K (1951). "The Influence of Modern Soil Studies on the Design and Construction of Foundations" Bldg. Research Congr., London, 1951, Div 1, Part III.

9- Terzaghi, k, and Peak, RB (1948). "Soil Mechanics in Engineering Practice", Wiley, New York.

10- Terzaghi, k, and Peak, RB (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons, NY.

11- Terzaghi, k, Peak, RB, and Mesri, G (1996). "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons, Inc., Third Ed., New York.

12- Vesic, AS (1973). "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations", JSMFD, ASCE, Voi. 99, SM 1.

13- Vesic, AS (1975). "Bearing Capacity of Shallow Foundations", Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Book Co., NY.

تأثير الخصائص الميكانيكية لمواد الإنشاء على معامل السلوك اللامرن (R) لنموذجين من خزانات المياه البيتونية المسلحة العالية تحت الأحمال الزلزالية

الدكتور عصام ناصر1 الدكتور بسام حويجة2 رهام ابوبالا3

ملخص

إنَّ ما يحكم عملية التصميم الإنشائي لمقاطع العناصر الإنشائية لخزانات المياه بالإضافة لشرط المقاومة هو شرط الكتامة بوصفها منشآت ذات استجابة خاصة تحت الأحمال الزلزالية نظراً لاحتوائها على السوائل التي تولد ضغطاً ديناميكياً على جدران حوض الخزان، ونظراً لاستجابة المنشأ اللاخطية تحت الأحمال الزلزالية ينتج عنها تخفيض في طاقة الزلزال الداخلة إليه وبالتالي تخفيض القوى الزلزالية التصميمة وهذا ما يعبر عنه من خلال معامل السلوك اللامرن (R). يتناول البحث دراسة تحليلية زلزالية لنموذجين من خزانات المياه العالية من البيتون المسلح ذات أحواض دائرية سعتها $100\ m^3$: النموذج الأول ذو هيكل حامل إطاري والثاني بجدار اسطواني حامل مفرغ. أجرينا تحليلاً ديناميكياً لاخطياً للنماذج باستخدام برنامج ABAQUS مع نمذجة الماء ضمن الحوض وفق طريقة Housner بهدف الحصول على الإجهادات في البيتون والفولاذ وقيم معامل السلوك اللامرن R وفق مبدأ الطاقة لحالتين من المقاومة المميزة للبيتون ولإجهادي خضوع لفولاذ التسليح:

$$f_c' = 30\ MPa - f_c' = 25\ MPa\ ,\ f_y = 410\ MPa\ -\ f_y = 240\ MPa$$

أظهرت الدراسة أن تأثير زيادة المقاومة المميزة للبيتون وإجهاد خضوع فولاذ التسليح على معامل السلوك اللامرن R كان محدوداً ضمن المجال المدروس، مع بقاء نموذج الضرر في البيتون متقارباً لحالتي المقاومة المميزة، وزيادة واضحة في إجهادات الشد ضمن التسليح عند استخدام الفولاذ الأعلى مقاومة، مما يؤكد أنَّ تحسين الأداء الزلزالي لخزانات المياه العالية يعتمد بشكل أكبر على خصائص الهيكل الإنشائي الحامل وآليات تبديد الطاقة مقارنة برفع مقاومة المواد ضمن مجال الدراسة.

الكلمات المفتاحية: إجهاد الخضوع – معامل السلوك اللامرن– تحليل لاخطي – نموذج هوسنر.

1 أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية – الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
2 أستاذ في قسم الهندسة الإنشائية – الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
3 طالبة دكتوراه في قسم الهندسة الإنشائية – الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.

Effect of The Mechanical Properties of Construction Materials on the Inelastic Behavior Factor (R) of Two Elevated Reinforced Concrete Water Tank Models under Seismic Loads

Dr. Issam Nasser 1
Dr. Bassam Hweijeh 2
Reham abobala 3

Abstract

The structural design of water tank component is governed by the ductility requirement in addition to the strength requirement. This is because water tanks are considered structures with a special seismic response due to the contained liquid which subjects the tank walls to hydrodynamic pressures during earthquake excitation.

Owing to the inelastic response mechanism of structures under seismic loading, part of the earthquake input energy is dissipated, resulting in design. This reduction is represented by the non elastic behavior factor R.

The study presents an analytical investigation of two elevated reinforced – concrete water tank models with a capacity of $100\mathrm{m}^3$. The first model consists of a framed supporting structure, whereas the second model employs a cantilever cylindrical shaft. Nonlinear dynamic analyses were conducted using the ABAQUS software, incorporating a water sloshing model based on the Housner approach. The analyses aimed to determine the maximum roof displacement, stresses in concrete and reinforcing steel, and the Inelastic behavior factor R based on the energy balance principle. A comparison was also made between two reinforcing steel yield strengths:

$f_c^{/} = 30\ \text{MPa} - f_c^{/} = 25\ \text{MPa}\ ,\ f_y = 410\ \text{MPa}\ - f_y = 240\ \text{MPa}$

The results showed that increasing the characteristic compressive strength of concrete and the yield strength of reinforcing steel had a limited effect on the Inelastic behavior factor R. The concrete tensile damage pattern (Damage T) remained nearly identical for both characteristic concrete strengths, and the noticeable increase in tensile stresses in the reinforcing steel when higher-strength steel was used. The findings also indicate that improving the seismic performance of elevated water tanks depends more significantly on the structural system characteristics and energy dissipation mechanisms than on increasing material strength within the investigated range.

Keywords: Yield Strength–Inelastic Behavior Factor–Nonlinear Analyses–Housner's Model

1 Professor– Department of Structural Engineering – Civil Engineering – University of Latakia – Latakia – Syria.

2 Professor– Department of Structural Engineering – Civil Engineering – University of Latakia – Latakia –Syria.

3 Postgarduat Student– Department of Structural Engineering– Civil Engineering– University of Latakia– Latakia – Syria.

1. المقدمة:

يعتمد التصميم الإنشائي للمنشآت المقاومة للزلازل على الفهم الصحيح لسلوكها أثناء الحدث الزلزالي وتعتبر خزانات المياه العالية ذات أهمية خاصة نظراً لطبيعة استجابتها الديناميكية المركبة الناتجة عن تفاعل السائل مع المنشأ مما يؤثر على خصائص الاستجابة الزلزالية مقارنة بالمنشآت الأخرى، تُستخدم نماذج مبسطة لمحاكاة حركة المياه ضمن حوض الخزان ويُعد نموذج (Housner،1963) أقدمها وأكثرها شيوعاً وقد استُخدم في دراسات عديدة منها (موسى،2016) و(الضايع،2024) حيث يُقسم كتلة المياه إلى كتلتين: سفلية وتسمى الكتلة النبضية أو الدفعية (Impulsive Mass) ذات اتصال صلب مع جدران الخزان

والعلوية تسمى الكتلة الاضطرابية أو الانتشارية (Convective Mass) ذات اتصال نابضي مع جدارن حوض الخزان، قدَّم الكود الأوروبي (EN1998, 2006) جدولاً يمكن من خلاله حساب قيم هذه الكتل بالاعتماد على ارتفاع الشريحة المائية h ونصف القطر الداخلي للحوض R وعَرض (2022،الملحق (7) للكود العربي السوري) علاقات تربط كتلتي الماء في الحوض بأبعاد مقطع الحوض الدائري والمستطيل وارتفاع الشريحة المائية ضمنه.

اشترط ملحق الخزانات للكود السوري (2022،الملحق (7) للكود العربي السوري) تصميم خزانات المياه بتحقيق شرط الكتامة منعاً لتشكل إجهادات شد تولد تشققات تسبب تسرب الماء تحديداً للأوجه الملامسة للماء وذلك بألا يتجاوز إجهاد الشد في الخرسانة القيمة المسموحة الواردة في الكود الأساس وألا يتجاوز حد التشقق (أي سمك الشق) المقدار $(0.1\ \mathrm{mm})$.

وعليه لطالما يستخدم فولاذ تسليح بإجهاد خضوع منخفض $f_y = 240\ \mathrm{MPa}$ لتحقيق شرط الكتامة ولكن في التصميم الزلزالي قد تعتمد قيم لإجهاد الخضوع تبدأ من $f_y = 400\ \mathrm{MPa}$.

لقد حظيت دراسة تأثير الخصائص الميكانيكية لمواد الإنشاء باهتمام كبير لما لها من دور في تحديد الاستجابة اللاخطية والأداء الزلزالي للمنشآت (Segura, S; Hariri−Ardebili, 2022)، إذ يؤدي تغير مقاومة البيتون إلى تعديل الصلابة الأولية ومقاومة الانضغاط وسلوك التشقق وتطور التضرر، بينما يؤثر تغير إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح في مقدار اللدونة المتاحة للعناصر الإنشائية وتشكل المفاصل اللدنة وقدرتها على تبديد الطاقة، في حين أكّد (Khiavi, M, et al, 2021) في دراسته لتأثير تغير معامل مرونة أساس خزان مياه على استجابته الزلزالية أنَّ زيادة معامل المرونة للبيتون يؤدي إلى زيادة الإجهادات الرئيسية على هيكل الخزان وتقليل إزاحته.

إنَّ الاستجابة الزلزالية للمنشآت ومنها الخزانات انعكاس لما تمتلكه من خصائص إنشائية مثل المطاوعة (القدرة على ابداء تشوهات بعد الحد المرن دون حصول نقص خطير في المقاومة) والمقاومة الزائدة

(تمتلك مقاطع العناصر الإنشائية مقاومة أكبر من مقاومتها التصميمية) تُمكّن هذه الخصائص من التعامل مع طاقة الزلزال وبالتالي تخفيض القوى الزلزالية التصميمة باستخدام المعامل R.

يُحسب معامل السلوك اللامرن R من علاقة الكود (UBC، 97) بجداء مركبتيه وفق الصيغة الآتية:

$$R = \Omega_0 * R_\mu \quad (1)$$

Ω_0: معامل المقاومة الزائدة (Over Strength Factor)، يخفض قص الخضوع V_y إلى قص تصميمي V_d وفق الصيغة (2)، الشكل (1):

$$\Omega_0 = \frac{V_y}{V_d} \quad (2)$$

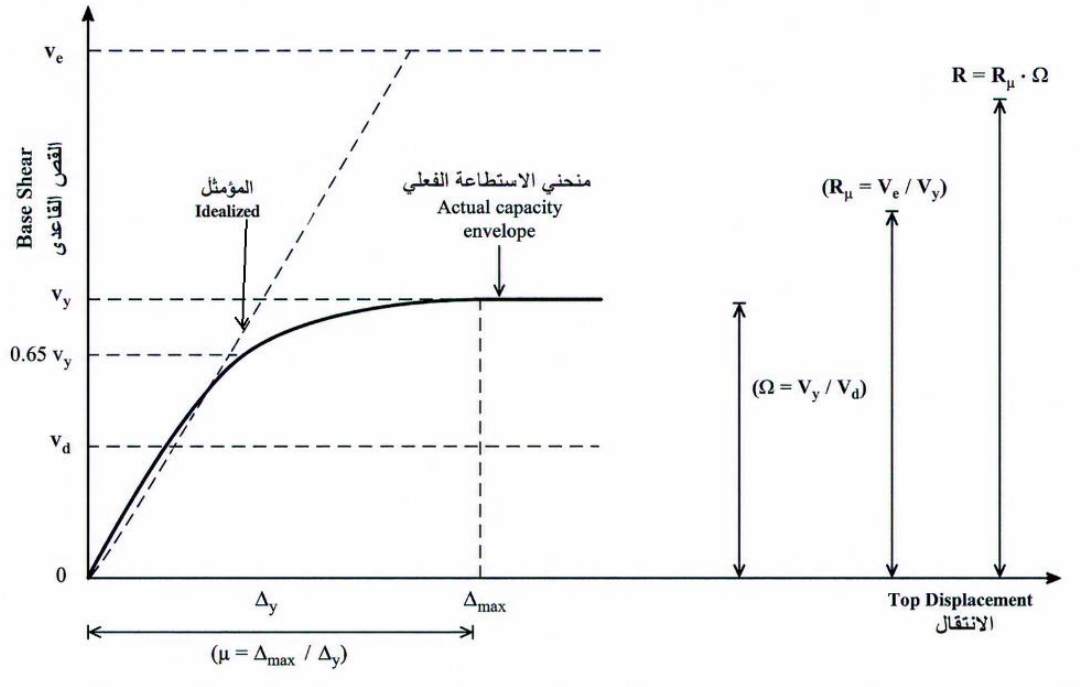
R_μ: معامل تخفيض المطاوعة أو معامل السلوك للمطاوعة (Reduced Ductility Factor)، وهو النسبة التي تخفض القص المرن إلى قص الخضوع للمنشأ ويعطى بالصيغة (3)، الشكل (1):

$$R_\mu = \frac{V_e}{V_y} \quad (3)$$

معامل المطاوعة μ الذي يمثل النسبة بين الانتقال الأعظمي Δ_{max} إلى انتقال الخضوع Δ_y لأعلى المنشأ الشكل (1).

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (4)$$

إذاً يظهر الشكل (1) دور مركبتي المعامل R في تخفيض القص المرن إلى قص تصميمي:



الشكل (1) تأثير المعامل R على قوة القص القاعدية V (ATC,1995)

كما يمكن أن يعبَّر عن المعامل R بدلالة العلاقة بين الطاقة الزلزالية الداخلة إلى المنشأ E_{TOTAL} والطاقة المرنة المختزنة فيه مؤقتاً $E_{Elastic}$ والتي تعكس قدرته على تبديد جزء من الطاقة بآليات لامرنة مما يوفر تمثيل مبسط لسلوك المنشأ تحت تأثير الأحمال الزلزالية. وهذا التمثيل أقرب إلى معامل السلوك للمطاوعة R_μ لأن الطاقة الكلية هي مجموع للطاقات الحركية E_k والطاقة المرنة E_s وطاقة التخميد اللزج E_d والطاقة الهيستيرية (اللدنة) E_h (Gholami et al, 2021) وجميعها ناتجة عن سلوك لا يمثل مقاومة المقاطع للعناصر الإنشائية، وعندما نستثني الطاقة الحركية وطاقة التخميد اللزج يمكن لنا التعبير عن المعامل R كما يلي:

$$R = \sqrt{1 + \frac{E_h}{E_s}} \qquad (5)$$

تناولت العديد من الكودات والمعايير التصميمية منها (ASCE 7,2010)، (ACI 350-3,2006) تحديد قيم للمعامل R لخزانات المياه بالاعتماد على خصائص النظام الإنشائي وظروف التأسيس ونوع مادة الإنشاء، وقدم (2022،الملحق (7) للكود العربي السوري) قيماً للمعامل R حسب الهيكل الحامل ومادة الإنشاء: حيث أعطى القيم 2.5 – 4 للهيكل الإطاري والقيم 3.5 – 4 للهيكل الأسطواني من البيتون المسلح، وعملت الكثير من الأبحاث على دراسة تأثير بارامترات الشكل للمنشأ أو تربة التأسيس أو نوع الهيكل الحامل على قيم المعامل R (Jani, B et al, 2020)),(Gurkalo, F,2024)، لذلك عملنا في دراستنا على الربط بين الخصائص الميكانيكية لمواد البناء (المقاومة المميزة للبيتون وإجهاد خضوع الفولاذ) والسلوك اللاخطي للمنشأ (من خلال المعامل R).

2. أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذه الدراسة في معرفة كيفية تأثير تغيّر المقاومة المميزة للبيتون $f_c^{/}$ وإجهاد الخضوع لفولاذ التسليح f_yعلى السلوك الزلزالي لنموذجين من خزانات المياه العالية وعلى قيمة معامل السلوك اللامرن R أحد معاملات حساب القص القاعدي الزلزالي والذي تُعبر قيمته عن مدى قدرة المنشأ على امتصاص طاقة الزلزال خارج مجال المرونة.

يهدف البحث إلى بيان مدى تأثر قيمة المعامل R بتغير قيم الخصائص الميكانيكية لمادة الإنشاء ($f_c^{/}$ ، f_y) لحالة نموذجين من خزانات المياه العالية من البيتون المسلح المحمولة على هيكل إطاري وأخرى على هيكل أسطواني بسعة تخزينية $100\ m^3$ وذات أحواض بمقطع دائري واقعة في المنطقة الزلزالية 2C، حيث أجريت الدراسة على الخزانات وفق ثلاث حالات ملء: فارغ، نصف مليء ومليء باستخدام تحليل ديناميكي لاخطي، مع تقييم لنتائج الدراسة.

3. مواد وطرائق البحث:

3-1 النماذج المستخدمة في الدراسة:

تم استخدام نموذجين من الخزانات العالية ويوضح الجدول (1) أبعاد عناصرها البيتونية المسلحة، والشكل (2) نماذجها ثلاثية الأبعاد ومساقطها الأفقية. تمت النمذجة العددية وفق برنامج ABAQUS حيث نُمذجَت عناصر البيتون كعناصر حجمية صلبة ثلاثية الأبعاد (C3D8R) بشكل مكعب بثمان عقد عند الزوايا

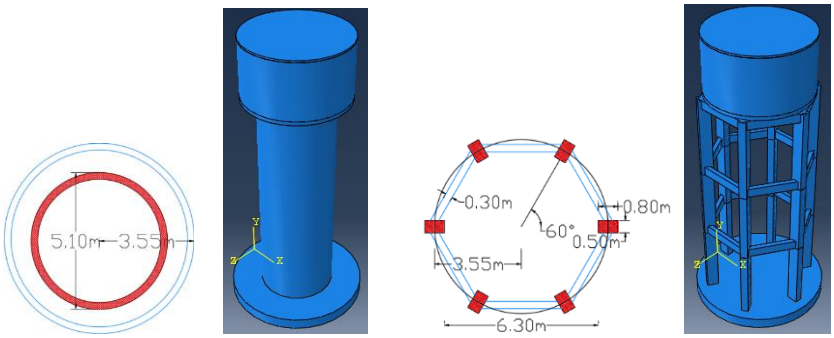
بالإضافة إلى استخدام عناصر رباعية السطوح (C3D10) بهدف تحسين استقرار عملية التحليل العددي ومعالجة مشاكل التقارب أثناء التحليل الديناميكي اللاخطي، ونمذجة فولاذ التسليح كعناصر خطية (T3D2) قضبان ثلاثية الأبعاد على الشد والضغط فقط بعقدتين وربطه مع البيتون باستخدام (Embedded Region) أي ترابط تام بينهما وربط أجزاء الخزان باستخدام قيود (Tie) لضمان استمرارية الاتصال، مع توليد شبكة عناصر m (1–0.5) والتي تعد مناسبة لدراسة سلوك الخزان بأبعاده الكبيرة، واعتماد شروط طرفية بإدخال التأثير الزلزالي على شكل تسارع قاعدي (Acceleration Boundary Condition) (على السطح السفلي للحصيرة) مع إعطاء درجة حرية باتجاه تطبيق التسارع الزلزالي ووثق باقي درجات الحرية، بهدف التحليل الديناميكي اللاخطي (Dynamic Implicit)، وقمنا بإسناد خصائص الكثافة (Density) والمرونة (Elasticity) للبيتون والفولاذ وباعتماد مفهوم اللدونة المتضررة للبيتون (Concrete Damaged Plasticity CDP) واسناد اللدونة للفولاذ (Plactisty).

واستخدمنا نموذج البيتون من مكتبة الـ ABAQUS حيث تم تمثيل سلوك الضغط باستخدام نموذج Carreira بينما تم تمثيل سلوك الشد وفق توصيات ACI، كما يظهر الشكل (3).

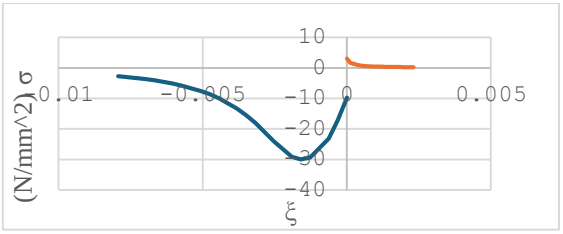
الجدول (1) أبعاد عناصر نموذجي الخزان ذو الهيكل الحامل الإطاري والهيكل الحامل الاسطواني.

نموذج الخزان بهيكل حامل إطاري	الأبعاد mm
ارتفاع الهيكل الحامل للخزان	15000
مقاطع الأعمدة	500*800
ارتفاع العمود	5000
مقاطع الجوائز	300*600
نصف قطر بلاطة حوض الخزان السفلية	3550
سماكة بلاطة حوض الخزان السفلية	250
ارتفاع جدار الحوض	3800
سماكة جدران حوض الخزان	250
نصف قطر بلاطة حوض الخزان العلوية	3550
سماكة بلاطة حوض الخزان العلوية	120
نصف قطر الحصيرة	4650
ارتفاع الحصيرة	800

نموذج الخزان بهيكل حامل اسطواني	الأبعاد mm
ارتفاع الهيكل الحامل للخزان (ارتفاع الجدار الاسطواني المفرغ)	15000
سماكة الجدار الاسطواني المفرغ	250
نصف قطر بلاطة حوض الخزان السفلية	3550
سماكة بلاطة حوض الخزان السفلية	250
ارتفاع جدار الحوض	3800
سماكة جدران حوض الخزان	250
نصف قطر بلاطة حوض الخزان العلوية	3550
سماكة بلاطة حوض الخزان العلوية	120
نصف قطر الحصيرة	4650
ارتفاع الحصيرة	800



الشكل (2) نموذجي الخزان ذو الهيكل الحامل الإطاري والهيكل الحامل الاسطواني والمسقط الأفقي للهيكل الحامل



الشكل (3) مخطط إجهاد – تشوه للبيتون المستخدم على الشد والضغط

تجدر الإشارة إلى أن دقة التحليل العددي ترتبط بدقة النموذج الرياضي للمنشأ المدروس وإن دقة النموذج الرياضي تستند إلى نمذجة كافة العناصر المشكلة للمنشأ بما فيها قضبان التسليح وبالنظر إلى إمكانيات الحواسيب الشخصية المستخدمة فإنَّ النمذجة الدقيقة للخزان إضافة إلى استخدام تحليل ديناميكي ضمني لاخطي وفق سجل زمني زلزالي ستساهم في إطالة زمن التحليل بشكل غير واقعي. لذلك قمنا باعتماد بعض التبسيطات التي تمكننا من إجراء الحساب بطريقة منطقية مع المحافظة على دقة النتائج وهذه التبسيطات مرتبطة بإجراء التحليل على الجزء الذي يضم قيم تسارعات كبيرة من السجل الزلزالي وباعتماد طبقة تسليح للعناصر مكافئة للتسليح الحقيقي، ونمذجة المياه في حوض الخزان وفق مبدأ Housner علماً أن برنامج الـ ABAQUS يتيح نمذجة السلوك الهيدروليكي للسوائل ولكن دراستنا لا تهدف إلى دراسة حركة السائل أو توزيع الضغوط الهيدروديناميكية وإنّما تغيّر الخصائص الميكانيكية لمواد الإنشاء على الاستجابة اللاخطية والمعامل R، كما أنَّ طريقة Housner معتمدة في الكودات العالمية وإنَّ نمذجة المياه كوسط

مستمر تتطلب عدداً كبيراً من العناصر وزمن تحليل أطول وصعوبة أكبر في تحقيق التقارب وخاصة مع تحليل ديناميكي لاخطي أما نموذج Housner يمثل تأثير السائل بشكل مكافئ يتيح إجراء عدد كبير من التحليلات البارامترية بكفاءة تخدم هدف الدراسة.

3-2 تصميم المقاطع العرضية لعناصر خزانات المياه:

تمَّ تصميم عناصر خزانات المياه وفقاً لما جاء في (2022،الملحق (7) للكود العربي السوري) و (2012، الكود العربي السوري) حيث تُحسب سماكات جدران وبلاطة الحوض الملامسة للماء وفق المرحلة الأولى الموافقة لعدم تجاوز الإجهادات المسموحة على الشد للبيتون (عدم تشقق البيتون) ويتم التحقق من الكتامة لهذه العناصر باعتبارها خاضعة لحمولة ضغط هيدروستاتيكية على ألا يتجاوز إجهاد الشد في البيتون الإجهاد المسموح $\overline{\sigma_{ct}} = 0.4\sqrt{f_c'}$ في حالة الشد المركزي أو الشد اللامركزي بلا مركزية صغيرة، و $\overline{\sigma_{cb}} = 0.57\sqrt{f_c'}$ في حالة الانعطاف البسيط أو الشد اللامركزي بلا مركزية كبيرة، وألا يتجاوز حد التشقق القيمة $0.1mm$ مع عدم ضرورة دراسة الكتامة عند تشكل إجهادات الشد على وجه المقطع البعيد عن الماء.

ويحسب التسليح في حالة الاستثمار أو في حالة الحد الأقصى وتعتمد نسبة دنيا للتسليح بقيمة % 0.3 من النوع عالي المقاومة.

العلاقة المستخدمة في التصميم لحساب فولاذ التسليح على قوى الشد المحورية بفرض إهمال مقاومة البيتون للشد:

$$A_S = \frac{N_t}{\overline{\sigma_S}} \qquad (6)$$

A_S : مساحة فولاذ التسليح N_t : قوة الشد المحورية $\overline{\sigma_S} = 0.55f_y$: الإجهاد المسموح في فولاذ التسليح. ولضمان عدم تجاوز الإجهادات في البيتون قيم الإجهادات المسموحة نستخدم الصيغة:

$$\sigma_{ct} = \frac{N_t}{A_C + (n-1)A_S} < \overline{\sigma_t} \qquad (7)$$

A_C: مساحة المقطع البيتوني المشدود n: النسبة المعيارية وتؤخذ مساوية ل 10

μ : نسبة التسليح (نسبة مساحة التسليح على مساحة البيتون) .

وتحسب الإجهادات المتولدة في المقطع بتأثير عزم الانعطاف M كما يلي:

$$\sigma_{cb} = \mp \frac{6\,M}{b\,t^2} \qquad (8)$$

t : سماكة جدار الخزان b : شريحة مترية، وتكون مساحة فولاذ التسليح اللازمة:

$$A_S = \frac{M}{\overline{\sigma_s}\,0.8\,d} \qquad (9)$$

d : العمق الفعال للمقطع

تم اعتماد مفهوم اللدونة المتضررة للبيتون (CDP Concrete Damaged Plasticity)، واللدونة للفولاذ، وكانت خواص المواد المستخدمة:

$$f_c^{/} = 30\ \text{MPa} - f_c^{/} = 25\ \text{MPa}\ ,\ f_y = 410\ \text{MPa} - f_y = 240\ \text{MPa}$$

3-3 نمذجة المياه:

اعتُمدت طريقة Housner في دراستنا لنمذجة المياه الشكل (4) وتم حساب كتل الماء وارتفاعاتها وفق العلاقات (10-11-12-13-14) (الملحق (7) للكود العربي السوري)، وكانت قيم ومنسوب الكتل النبضية والاضطرابية عن قاع الحوض بقطر داخلي للحوض D كما في الجدول (2).

$$\frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0.866\frac{D}{h}\right)}{0.866\frac{D}{h}} \qquad (10)$$

$$\frac{h_i}{h} = 0.375 \quad \text{عندما} \quad \frac{h}{D} \le 0.75 \qquad (11)$$

$$\frac{h_i}{h} = 0.5 - \frac{0.09375}{\frac{h}{D}} \quad \text{عندما} \quad \frac{h}{D} > 0.75 \qquad (12)$$

$$\frac{m_c}{m} = 0.23\frac{\tanh(3.68\frac{h}{D})}{\frac{h}{D}} \qquad (13)$$

$$\frac{h_c}{h} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68\frac{h}{D}\right) - 1.0}{3.68\frac{h}{D}\sinh\left(3.68\frac{h}{D}\right)} \qquad (14)$$

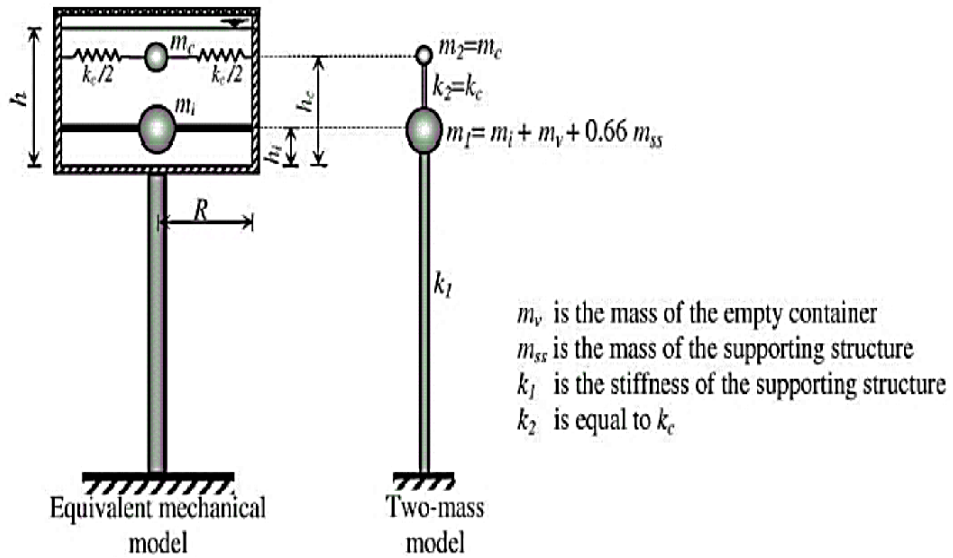
m_i: الكتلة النبضية للسائل m_c: الكتلة الاضطرابية للسائل m: كتلة السائل

h: ارتفاع السائل في الحوض h_i: ارتفاع الكتلة النبضية h_c: ارتفاع الكتلة الاضطرابية

الجدول (2) قيم ومناسيب الكتلة النبضية والاضطرابية عن قاع الحوض الأسطواني

حالة ملء الحوض الاسطواني	الكتلة النبضية للماء Mass Impulsive (kg)	منسوب الكتلة النبضية h_i , (m)	الكتلة الاضطرابية للماء Convectiv Mass (kg)	منسوب الكتلة الاضطرابية h_c , (m)
نصف مليء	13.445	0.563	35.511	0.791
مليء	51.525	1.125	48.446	1.773

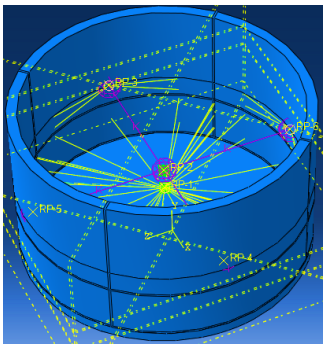
وتم تمثيلها ضمن النموذج بكتل نقطية Point Masses الشكل (5).



الشكل(4) نموذج Housner لتمثيل كتلة الماء الخزان لخزان مياه عالي (Housner,1963)

m_v : كتلة الحوض فارغ m_{ss} : كتلة الهيكل الحامل k_1: صلابة الهيكل الحامل

$k_2 = k_c$: صلابة النابض



الشكل (5) نمذجة المياه ضمن حوض

3-4 التحليل الزلزالي لنموذجي الخزان:

تم تحليل النماذج وفق ثلاثة سجلات زلزالية مقيَّسة لزلازل حقيقية تم الحصول عليها من المعهد العالي للدراسات والبحوث الزلزالية في دمشق مناسبة للاستخدام في المنطقة الزلزالية 2C المدروسة، الأول لزلزال اليونان 1981 والثاني لأرمينيا 1988 والثالث لزلزال تركيا 1999 وفق المعطيات الواردة بالجدول التالي:

الجدول (3) معطيات الزلازل المستخدمة في تحليل النماذج

No	الزلزال	العام	درجة الزلزال	التسارع الأرضي الأعظمي PGA-E (g)	التسارع الأرضي الأعظمي المقيّس $PGA-E_{sc}$ (g)
1	Corinth, (Greece)	1981	6.6	0.236	0.443
2	Spitak, (Armenia)	1988	6.8	0.2	0.387
3	Kocaeli, (Turkey)	1999	7.5	-0.311	0.238

4. النتائج ومناقشتها:

4-1 النتائج المتعلقة بإجهاد الشد في البيتون:

تجاوزت إجهادات الشد للبيتون مقاومة الشد له أي 3 MPa في بعض المناطق الحرجة مما يشير إلى بدء تشكل التشققات، وهنا يتم استخدام Damage T لتقييم مدى تطور الضرر بعد التشقق والذي تتروح قيمته بين 0 و 1 وباقترابه من الـ1 يدل على تشكل التشققات. كما لوحظ ازدياد إجهادات البيتون مع زيادة شدة السجل الزلزالي في أغلب الحالات. تركزت أماكن الإجهاد المرتفع للبيتون عند استناد البلاطة السفلية لحوض الخزان على الهيكل الحامل الأسطواني وأسفل الهيكل الحامل الأسطواني المفرغ للنماذج ذات الهيكل الحامل الأسطواني، أما النماذج ذات الهيكل الحامل الإطاري فظهرت أعلى قيم الإجهاد في البيتون عند إحدى نهايتي أحد الأعمدة أو الجوائز.

يظهر الجدولين (4-5) أن زيادة المقاومة المميزة للبيتون من $f_c' = 25$ MPa إلى $f_c' = 30$ MPa أدت إلى تغير محدود في قيم Damage T حيث ارتفعت القيم في بعض الحالات للنموذجين وانخفضت في حالات أخرى وذلك لحالتي إجهاد الخضوع المستخدم، إلا أنَّ مواقع تركز الضرر بقيت متقاربة، ويبين الجدول (6) نموذج الضرر لعدة حالات مدروسة لنموذجي الخزانات على الشدة الزلزالية الأقل كونها الأكثر تمثيلاً لخصائص استجابة المنشأ على الحمل الزلزالي حيث أنَّ زيادة المقاومة المميزة للبيتون لم تغير مواضع تشكل الضرر، إذ بقيَّ الضرر متمركز في المناطق الحرجة نفسها مما يشير إلى أنَّ آلية تشكل التشققات كانت محكومة بتوزيع القوى الداخلية أكثر من تأثرها بزيادة مقاومة الخرسانة ضمن المجال المدرس.

الجدول (4) مقارنة قيم Damage T لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة لنوعي المقاومة المميزة للبيتون بإجهاد خضوع لفولاذ التسليح $f_y = 240$ MPa

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	حالة الملء	Damage T	
			$f_c' = 25$ MPa	$f_c' = 30$ MPa
	إطاري	فارغ	0.807	0.922

TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$		نصف مليء	0.891	0.921
		مليء	0.853	0.822
	أسطواني	فارغ	0.576	0.62
		نصف مليء	0.549	0.597
		مليء	0.513	0.514
ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$	إطاري	فارغ	0.907	0.892
		نصف مليء	0.877	0.922
		مليء	0.862	0.853
	أسطواني	فارغ	0.709	0.699
		نصف مليء	0.793	0.787
		مليء	0.670	0.707
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	فارغ	0.806	0.922
		نصف مليء	0.922	0.891
		مليء	0.878	0.855
	اسطواني	فارغ	0.712	0.778
		نصف مليء	0.726	0.720
		مليء	0.621	0.708

الجدول (5) مقارنة قيم Damage T لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة لنوعي المقاومة المميزة للبيتون بإجهاد خضوع لفولاذ التسليح $f_y = 410\ MPa$

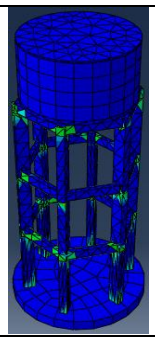
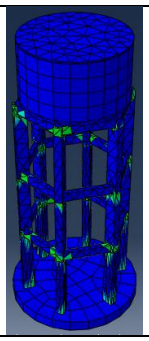
Damage T		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
$f_c^{/} = 30\ MPa$	$f_c^{/} = 25\ MPa$			
0.841	0.863	فارغ	إطاري	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.922	0.889	نصف مليء		
0.824	0.908	مليء		
0.622	0.571	فارغ	أسطواني	

تابع الجدول (5) مقارنة قيم Damage T لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة لنوعي المقاومة المميزة للبيتون بإجهاد خضوع لفولاذ التسليح $f_y = 410\ MPa$

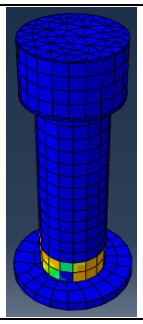
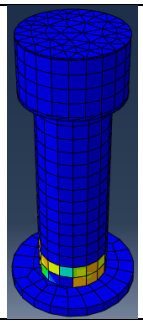
Damage T		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
$f_c^{/} = 30\ MPa$	$f_c^{/} = 25\ MPa$			
0.595	0.553	نصف مليء	أسطواني	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.546	0.541	مليء		
0.891	0.907	فارغ	إطاري	ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$
0.922	0.854	نصف مليء		
0.807	0.865	مليء		
0.690	0.766	فارغ	أسطواني	

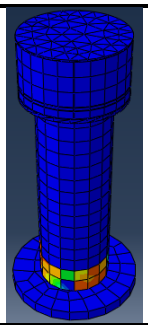
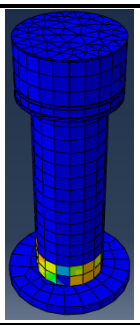
		نصف مليء	0.797	0.664
		مليء	0.646	0.696
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	فارغ	0.922	0.922
		نصف مليء	0.922	0.922
		مليء	0.891	0.887
	أسطواني	فارغ	0.699	0.734
		نصف مليء	0.735	0.773
		مليء	0.740	0.793

الجدول (6) مقارنة كونتور Damage T (نموذج الضرر) لعدة حالات لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير سجل $PGA_{SC} = 0.238g$ TURKIA 1999 **لنوعي المقاومة المميزة للبيتون**

الهيكل الحامل	**حالة الملء**	**كونتور Damage T**	
		$f_y = 240$ MPa	
		$f_c^{/} = 25$ MPa	$f_c^{/} = 30$ MPa
إطاري	فارغ		

تابع الجدول (6) مقارنة كونتور Damage T (نموذج الضرر) لعدة حالات لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير سجل TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$ لنوعي المقاومة المميزة للبيتون

الهيكل الحامل	حالة الملء	كونتور Damage T	
		$f_y = 240\ MPa$	
		$f_c^{/} = 25\ MPa$	$f_c^{/} = 30\ MPa$
أسطواني	فارغ		
		$f_y = 410\ MPa$	
		$f_c^{/} = 25\ MPa$	$f_c^{/} = 30\ MPa$
إطاري	نصف مليء		

أسطواني	نصف مليء		

4-2 النتائج المتعلقة بإجهاد الشد في فولاذ التسليح:

تُظهر نتائج التحليل لنموذجي الخزان بمختلف حالات الملء تجاوز الإجهاد في فولاذ التسليح لإجهاد الخضوع في بعض المناطق الحرجة مما يشير إلى سلوك لدن موضعي.

لحالة مقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$ ، عند استخدام فولاذ $f_y = 240\ MPa$ كانت أقصى قيمة إجهاد شد في الفولاذ 305.7 MPa لحالة هيكل إطاري بحوض نصف مليء بتأثير سجل Turkia 1999 /0.238g ووصلت إلى 419 MPa لنفس الحالة بتأثير ذات السجل عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$.

بلغ متوسط نسبة الزيادة في قيمة إجهاد الشد في فولاذ التسليح عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ مقارنة مع استخدام فولاذ $f_y = 240\ MPa$ القيمة 33.29%، جدول (7)

ولحالة مقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30\ MPa$ ، عند استخدام فولاذ $f_y = 240\ MPa$ كانت أقصى قيمة للإجهاد 300 MPa لحالة هيكل إطاري بحوض نصف مليء بتأثير سجل Turkia 1999 /0.238g ووصلت إلى 423 MPa لنفس الحالة بتأثير نفس السجل باستخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$.

وعند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ ولـ 5 حالات من 18 حالة مدروسة بقي الإجهاد أقل من إجهاد الخضوع أي بقاء الخزان ضمن المجال المرن لعمل الفولاذ، وبقي السلوك العام لنموذجي الخزان ولنوعي الفولاذ مستقراً ولم يلاحظ تدهور جوهري في الاستجابة الإنشائية الكلية، جدول (8).

بلغ متوسط نسبة الزيادة في قيمة إجهاد الشد في فولاذ التسليح عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ عن استخدام فولاذ $f_y = 240\ MPa$ القيمة 30.99%.

يظهر الجدول (9) مقارنة كونتور إجهادات الشد لفولاذ التسليح لنموذجي الخزانات بحالة حوض نصف مليء بتأثير سجل Turkia 1999 /0.238g.

الجدول (7) قيم إجهاد الشد في فولاذ التسليح لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة ولنوعي الفولاذ المستخدم ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	حالة الملء	$f_y = 240\ MPa$ إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	$f_y = 410\ MPa$ إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	نسبة التغير %
TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$	إطاري	فارغ	267	412.5	35.27
		نصف مليء	305.7	419.4	27.11
		مليء	264.3	412.4	35.91
	أسطواني	فارغ	249.2	372.1	33.03
		نصف مليء	246.4	342.3	28.02
		مليء	247.4	360.1	31.29
ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$	إطاري	فارغ	265.5	412.8	35.68
		نصف مليء	269.6	412.5	34.64
		مليء	268	412.7	35.06
	أسطواني	فارغ	244.9	329.6	25.69
		نصف مليء	241.4	305.1	20.88

		ملیء	261.6	410.5	36.27
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	فارغ	272.8	416.4	34.49
		نصف ملیء	266	416.5	36.13
		ملیء	269.7	414	34.86
	أسطواني	فارغ	265.3	411.8	35.58
		نصف ملیء	266.1	473.1	43.75
		ملیء	265.5	411.9	35.54

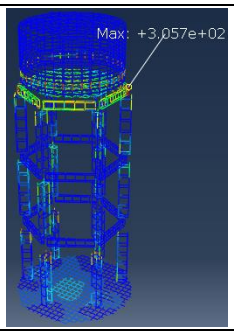
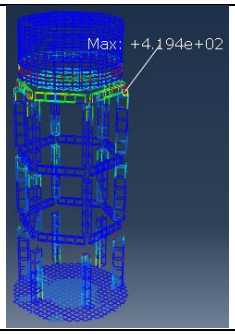
الجدول (8) قيم إجهاد الشد في فولاذ التسليح لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة ولنوعي الفولاذ المستخدم ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30$ MPa

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	حالة الملء	$f_y = 410$ MPa إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	$f_y = 240$ MPa إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	نسبة التغير %
TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$	إطاري	فارغ	415.2	266.4	35.84
		نصف ملیء	423	300	29.08
		ملیء	412	263.4	36.07
	أسطواني	فارغ	256	250	2.34
		نصف ملیء	333.4	245.8	26.27

تابع الجدول (8) قيم إجهاد الشد في فولاذ التسليح لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير السجلات الزلزالية المستخدمة ولنوعي الفولاذ المستخدم ومقاومة مميزة للبيتون $f_c' = 30$ MPa

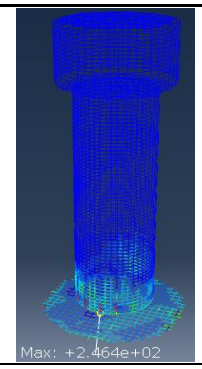
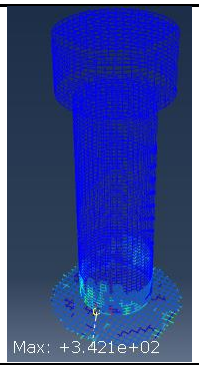
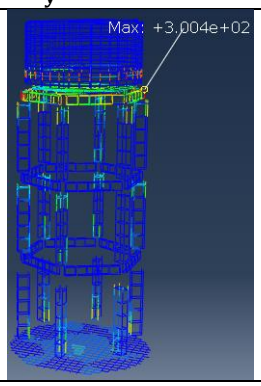
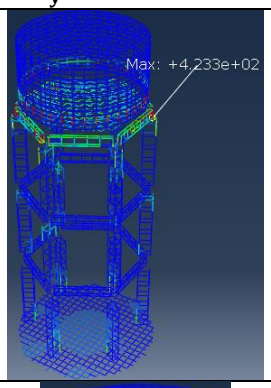
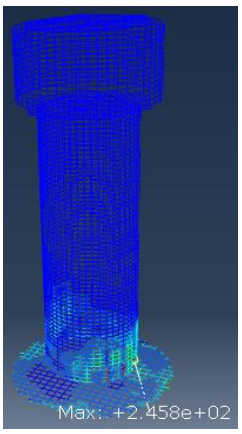
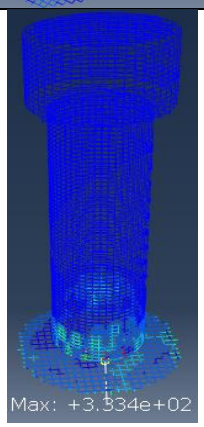
شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	حالة الملء	$f_y = 240$ MPa إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	$f_y = 410$ MPa إجهاد الشد في فولاذ التسليح Von mises MPa	نسبة التغير %
	أسطواني	مليء	246.4	352.8	30.16
ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$	إطاري	فارغ	265	412.6	35.77
		نصف مليء	269.1	414.1	35.02
		مليء	267.3	413.3	35.33
	أسطواني	فارغ	244.5	323.1	24.33
		نصف مليء	241.6	302.8	20.21
		مليء	261.7	410.3	36.22
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	فارغ	272.8	416.3	34.47
		نصف مليء	267.1	417	35.95
		مليء	270.1	412.1	34.46
	أسطواني	فارغ	266	411.7	35.39
		نصف مليء	265.9	412.1	35.48
		مليء	265.6	412	35.53

الجدول (9) مقارنة كونتور Von mises لعدة حالات لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير سجل TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$ لنوعي المقاومة المميزة للبيتون وقيمتي إجهاد فولاذ التسليح

الهيكل الحامل	حالة الملء	كونتور Von mises	
		$f_c^{/} = 25\ MPa$	
		$f_y = 240\ MPa$	$f_y = 410\ MPa$
إطاري	نصف مليء		

تابع الجدول (9) مقارنة كونتور Von mises لعدة حالات لنموذجي الخزانات المدروسة بتأثير سجل TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$ لنوعي المقاومة المميزة للبيتون وقيمتي إجهاد فولاذ التسليح

الهيكل الحامل	حالة الملء	كونتور Von mises	
		$f_c^{/} = 25\ MPa$	
		$f_y = 240\ MPa$	$f_y = 410\ MPa$

أسطواني	نصف مليء		
		$f_c^{/} = 30\ MPa$	
		$f_y = 240\ MPa$	$f_y = 410\ MPa$
إطاري	نصف مليء		
أسطواني	نصف مليء		

4-3 النتائج المتعلقة بحساب معامل السلوك اللامرن R:

تم حساب معامل السلوك للمطاوعة R_μ وفق العلاقة (5) مع اعتماد الإزاحة الأعظمية Δ_{max} كمؤشر لذروة الاستجابة فهي تعكس بشكل دقيق تطور السلوك أثناء الحمل الزلزالي واعتماد اللحظة الزمنية المرافقة لها لتكون اللحظة الزمنية التي نستخدم عندها قيمة طاقة اللدونة (Plastic Dissipation ALLPD) كمؤشر للطاقة اللدنة E_h (الطاقة المبددة المرتبطة بالتشوهات غير المرنة) وقيمة طاقة الانفعال (Strain Energy ALLSE) للطاقة المرنة المخزنة E_s والتي تزول بإزالة التحميل، حيث يعطي التحليل العددي في برنامج ABAQUS قيم هذه الطاقات عند كل لحظة زمنية من مدة التحليل.

ويتم حساب معامل السلوك للمقاومة الزائدة (وفق العلاقة $\Omega_0 = \frac{V_y}{V_d}$) بحساب قوة القص التصميمية V_d وفق ما ورد في الملحق (7) للكود العربي السوري العلاقة (15) وقص الخضوع V_y الناجم عن التحليل الديناميكي اللاخطي، والنتائج مبيّنة بالجدولين(10-11):

القص الكلي على الخزان: $$V = \sqrt{{V_i}^2 + {V_c}^2} \qquad (15)$$

مرتبط بحساب المركبتين النبضية (Implusive Component V_i) والاضطرابية (Convective Component V_c) وفق المعادلات التالية:

$$V_i = (A_h)_i * (m_i + m_s)\, g \qquad (16)$$

$(A_h)_i$: معامل زلزالي تصميمي أفقي للنمط النبضي أو المركبة النبضية

m_i: الكلتة النبضية للسائل m_s: كتلة الحوض وثلث كتلة الهيكل الحامل

وهو قص قاعدي عند مستوى أعلى أساس الهيكل الحامل لحوض الخزان.

$$V_c = (A_h)_c * m_c\, g \qquad (17)$$

$(A_h)_c$: معامل زلزالي تصميمي أفقي للنمط الاضطرابي أو المركبة الاضطرابية

$$A_h = \frac{Z}{2}\,\frac{I}{R}\,\frac{S_a}{g} \qquad (18)$$

Z : معامل المنطقة الزلزالية I : معامل أهمية المنشأ $\frac{S_a}{g}$: المعامل المتوسط لتسارع الاستجابة

باعتماد القيم الدنيا للمعامل R (2.5 هيكل إطاري– 3.5 هيكل اسطواني) وفق الملحق7 للكود السوري.

الجدول (10) قيم معامل السلوك للمطاوعة R_μ ومعامل المقاومة الزائدة Ω_0 الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25$ MPa

$f_y = 410$ MPa		$f_y = 240$ MPa		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
Ω_0	R_μ	Ω_0	R_μ			
0.34	2.75	0.41	2.77	فارغ	إطاري	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.57	1.09	0.67	1.09	نصف مليء		
0.49	2.52	0.56	2.52	مليء		
0.87	2	0.87	2.02	فارغ	اسطواني	
0.47	1.78	0.47	1.83	نصف مليء		
1.03	1.84	0.55	1.87	مليء		
0.96	2.64	1.86	2.67	فارغ	اطاري	ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$
0.59	2.45	0.69	2.21	نصف مليء		
1.72	2.86	0.65	3.27	مليء		
0.46	1.91	0.62	1.91	فارغ	اسطواني	
1.06	1.84	0.49	1.87	نصف مليء		
0.28	1.66	0.36	1.76	مليء		
1.38	3.29	0.60	3.39	فارغ	اطاري	

1.88	2.39	0.56	2.44	نصف مليء		GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$
0.55	2.65	0.55	2.75	مليء		
1.09	2.77	1.09	2.85	فارغ	سطواني	
1.02	2.19	1.02	2.28	نصف مليء		
0.69	2.28	0.69	2.41	مليء		

الجدول (11) قيم معامل السلوك للمطاوعة R_μ ومعامل المقاومة الزائدة Ω_0 الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30$ MPa

$f_y = 410$ MPa		$f_y = 240$ MPa		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
Ω_0	R_μ	Ω_0	R_μ			
0.49	2.73	0.4	2.76	فارغ	إطاري	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.60	1.08	0.79	1.08	نصف مليء		
0.05	2.5	0.55	2.5	مليء		
0.51	1.84	3.1	1.94	فارغ	أسطواني	
0.47	1.74	2.8	1.79	نصف مليء		
0.31	1.77	0.52	1.79	مليء		

تابع الجدول (11) قيم معامل السلوك للمطاوعة R_μ ومعامل المقاومة الزائدة Ω_0 الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c' = 30$ MPa

$f_y = 410$ MPa		$f_y = 240$ MPa		حالة الملء	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
Ω_0	R_μ	Ω_0	R_μ			
0.91	2.57	0.34	2.64	فارغ	إطاري	ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$
0.19	2.08	0.67	2.49	نصف مليء		
1.09	3.06	0.87	3.29	مليء		
0.46	1.86	0.17	2.12	فارغ	أسطواني	
0.69	1.78	1.17	1.8	نصف مليء		
0.36	1.61	0.29	1.72	مليء		
1.52	3.28	0.6	3.39	فارغ	إطاري	GREECE 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$
1.41	2.35	0.02	2.45	نصف مليء		
1.27	2.72	0.02	2.84	مليء		
0.69	2.74	1.1	2.85	فارغ	أسطواني	
1.02	2.17	1.1	2.24	نصف مليء		
0.69	2.26	0.69	2.34	مليء		

نلاحظ أن قيم معامل السلوك للمقاومة Ω_0 بغالبيتها أصغر من الواحد وهذا يعود إلى أنَّ قص الخضوع المحسوب بالتحليل الديناميكي اللاخطي هو عند أول خضوع لفولاذ التسليح ، وإنَّ المعامل Ω_0 هو خاصية تتعلق بالمنشأ لذلك تم اعتماد قيمة $\Omega_0 = 1.2$ والتي تعد أكثر واقعية وأمان.

وبالتالي كانت قيم معامل السلوك اللامرن $R_{analytical}$ (المحسوبة وفق العلاقة $R = 1.2 * R_{\mu}$) كما هي في الجدولين(12-13) التالي:

الجدول (12) قيم معامل السلوك اللامرن R الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	مقطع الحوض وسعته التخزينية	حالة الملء	$f_y = 410\ MPa$ $R_{analytical}$	$f_y = 240\ MPa$ $R_{analytical}$	نسبة التغير %
TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$	إطاري	دائري $100m^3$	فارغ	3.29	3.33	-1.22
			نصف مليء	1.31	1.31	0
			مليء	3.02	3.02	0
	أسطواني		فارغ	2.40	2.42	-0.83
			نصف مليء	2.13	2.19	-2.82
			مليء	2.20	2.24	-1.82

تابع الجدول (12) قيم معامل السلوك اللامرن R الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	مقطع الحوض وسعته التخزينية	حالة الملء	$f_y = 410\ MPa$ $R_{analytical}$	$f_y = 240\ MPa$ $R_{analytical}$	نسبة التغير %
ARMENIA 1988	إطاري	دائري $100m^3$	فارغ	3.16	3.19	-0.95
			نصف مليء	2.94	2.65	9.86

−13.95	3.44	3.92	مليء			$PGA_{SC} = 0.387g$
0	2.29	2.29	فارغ		أسطواني	
−1.82	2.20	2.24	نصف مليء			
−6.03	1.99	2.11	مليء			
−3.03	3.96	4.08	فارغ	دائري $100m^3$	إطاري	GREECE 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$
−2.09	2.87	2.93	نصف مليء			
−3.46	3.18	3.29	مليء			
−3.01	3.32	3.42	فارغ		أسطواني	
−3.41	2.64	2.73	نصف مليء			
−5.47	2.74	2.89	مليء			

جدول (13) قيم معامل السلوك اللامرن R الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30$ MPa

نسبة التغير %	$f_y = 410$ MPa	$f_y = 240$ MPa	حالة الملء	مقطع الحوض وسعته التخزينية	الهيكل الحامل	شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}
	$R_{analytical}$	$R_{analytical}$				
−1.22	3.27	3.31	فارغ	دائري $100m^3$	إطاري	TURKIA 1999 $PGA_{SC} = 0.238g$
0.77	1.3	1.29	نصف مليء			
0	3	3	مليء			
−5.43	2.21	2.33	فارغ		أسطواني	

			نصف مليء	2.15	2.09	−2.87
			مليء	2.15	2.12	−1.42
ARMENIA 1988 $PGA_{SC} = 0.387g$	إطاري	دائري $100m^3$	فارغ	3.11	3.08	−0.97
			نصف مليء	2.52	2.49	−1.20
			مليء	3.88	3.67	−5.72
	أسطواني		فارغ	2.55	2.23	−14.35
			نصف مليء	2.16	2.13	−1.41
			مليء	2.06	1.93	−6.74
GREECE 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	دائري $100m^3$	فارغ	4.07	3.93	−3.56
			نصف مليء	2.94	2.82	−4.26

تابع الجدول (13) قيم معامل السلوك اللامرن R الناتجة لنموذجي الخزانات المدروسة بحالتي إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح ومقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30$ MPa

شدة السجل الزلزالي PGA_{SC}	الهيكل الحامل	مقطع الحوض وسعته التخزينية	حالة الملء	$f_y = 240$ MPa	$f_y = 410$ MPa	نسبة التغير %
				$R_{analytical}$	$R_{analytical}$	
GREEC 1981 $PGA_{SC} = 0.443g$	إطاري	دائري $100m^3$	مليء	3.4	3.26	−4.29
	أسطواني		فارغ	3.42	3.29	−3.95
			نصف مليء	2.68	2.6	−3.08
			مليء	2.81	2.72	−3.31

يلاحظ من الجدول (12) ولحالة مقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$ أن أكبر قيمة انخفاض في قيم معامل السلوك اللامرن R عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ مقارنة مع فولاذ $f_y = 240\ MPa$ كانت 13.95% لحالة هيكل إطاري بحوض مليء بتأثير سجل ARMENIA 1988/ 0.387g وبلغ متوسط قيم انخفاض قيم المعامل R لجميع الحالات الأخرى % 2.23.

ولأجل مقاومة مميزة للبيتون $f_c^{/} = 30\ MPa$ جدول (13) كانت أكبر قيمة للانخفاض في قيم معامل السلوك اللامرن R عند استخدام فولاذ $f_y = 410\ MPa$ مقارنة مع فولاذ $f_y = 240\ MPa$ كانت 14.35% لحالة هيكل اسطواني بحوض فارغ بتأثير سجل ARMENIA 1988/ 0.387g وبلغ متوسط قيم الانخفاض لجميع الحالات الأخرى 3.5%.

5. الاستنتاجات والتوصيات:

بنتيجة تحليل النموذجين المدروسين والقيم المستخدمة لخصائص مواد الإنشاء:

1. أظهرت المقارنة بين قيمتي المقاومة المميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$ و$f_c^{/} = 30\ MPa$ تجاوز قيم إجهادات الشد في البيتون للنموذجين مقاومة الشد مما أدى إلى تطور الضرر وفق نموذج CDP مع بقاء نموذج الضرر متشابهاً وحصول تغيرات صغيرة في قيم Damage T مما يشير إلى أنَّ زيادة المقاومة المميزة ضمن المجال المدروس لم تؤدي إلى تغير واضح في نموذج تطور الضرر.
2. يؤدي رفع إجهاد خضوع فولاذ التسليح المستخدم إلى زيادة واضحة في إجهادات الشد لفولاذ التسليح حيث بلغ متوسط نسب الزيادة 33.29% لحالة المقاومة المميزة للبيتون $f_c^{/} = 25\ MPa$ و 30.99 % لحالة المقاومة المميزة للبيتون $f_c^{/} = 30\ MPa$ مما يؤكد على التأثير المباشر لإجهاد الخضوع كأحد الخصائص الميكانيكية للفولاذ على الاستجابة المحلية لعناصر التسليح.
3. إن معامل السلوك اللامرن R يتمتع بحساسية محدودة تجاه تغير قيم إجهاد خضوع فولاذ التسليح (بلغ متوسط نسب الانخفاض في قيمه 2.23% باستخدام الفولاذ ذو الإجهاد الأعلى لحالة $f_c^{/} =$ 25 MPa والقيمة 3.5% باستخدام الفولاذ ذو الإجهاد الأعلى لحالة $f_c^{/} = 30\ MPa$) مقارنةً مع التأثر الواضح لإجهادات الشد لفولاذ التسليح، وبالتالي فإن زيادة إجهاد خضوع فولاذ التسليح لا يؤدي إلى تحسين الاستجابة اللاخطية للمنشأ وقدرة تبديد الطاقة الزلزالية مما يشير إلى إمكانية

استخدام قيم موحدة لمعامل السلوك اللامرن R ضمن المجال المذكور لإجهادات الخضوع لفولاذ التسليح.

4. إن تأثير نوع الهيكل الحامل للخزان أكبر من تأثير الخصائص الميكانيكية لمواد البناء في تحسين الأداء الزلزالي بزيادة الطاقة المبددة الناتجة عن الاستجابة اللامرنة ضمن المجال المدروس.
5. يوصى بتوسيع نطاق الدراسة ليشمل قيماً أخرى للخصائص الميكانيكية لمواد البناء وأشكال هندسية أخرى من خزانات المياه العالية للتحقق من وثوقية نتائج الدراسة.
6. إجراء دراسات إضافية لتقييم تأثير عوامل أخرى على قيم المعامل R وقدرة تبديد الطاقة (الاستجابة اللاخطية) سواء من الخصائص الميكانيكية لفولاذ التسليح أو البحث ضمن مفهوم الطاقة عن آليات تشكل اللدونة وتبديد الطاقة وتوزيعها ضمن النظام الإنشائي.
7. أن يتم اختيار مقاومة البيتون وإجهاد خضوع فولاذ التسليح وفق متطلبات المقاومة والمتانة للمنشأ وليس بهدف زيادة قيم المعامل R.

6. المراجع:

[1] الكود العربي السوري، 2012، *الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة*.

[2] الملحق (7) للكود العربي السوري،2022، *تصميم خزانات المياه الخرسانية المسلحة وتنفيذها*. سورية.

[3] ناصر، عصام ، حسن، مالك، وموسى منهل.2016، *دراسة تحليلية مقارنة لبعض طرق نمذجة السائل في خزانات المياه العالية*. مجلة جامعة حمص مجلد 38، العدد5.

[4] الطرشة، إحسان، غريب، تراث، الضايع، عبدالحليم. 2024، *التحليل الديناميكي اللاخطي لخزان عالي مع أخذ أثر حركة المياه ضمن الحلة*. مجلة جامعة حمص مجلد 46، العدد6.

[5] American Society of Civil Engineers.2010, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE7-10)*.Reston, VA, USA.

[6] American Concrete Institute (ACI).(2006).Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary (ACI350.3-6). Farmington Hills, Michigan, USA.

[7]Applied Technology Council (ATC). 1995, A Critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design. Redwood city, California, USA.

[8] European Committee for Standardization, Eurocode8.2006, *Design of structures for earthquake resistance-Part4:Soils,tanks and pipelines*. Brussels, Belgium.

[9] Gholami, N; Garivani, S; Askariani, S, S.2021, *State – of – the Art Review of Energy – Based Seismic Design Methods.* Archives of Computational Methods in Engineering (2022) 29:1965-1996, CIMNE, Barcelona, Spain2021.

[10] Gurkalo, F; HE,C; Konstantinos P & He, N; (2024), *Effects of innovative reinforced concrete slit shaft configuration on seismic performance of elevated water tanks*. Scientific Reports , (2024) 14:6113 , https://doi.org/10.1038/s41598-024-56851-3.

[11] Housner, G, W.1963, *"The Dynamic Behavior of Water Tanks"* ,*Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, No. 2, pp. 381-387. February,.

[12] IITK-GSDMA Project Team. (2007),*Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks*. Indian Institute of Technology Kanpur and Gujarat State Disaster Management Authority, Kanpur, India

[13] Jani, B; Agrawal , V; Patel , V.(2020), *Effects of soil condition on elevated water tank using time history analysis with different staging systeme* . Article in International Journal of Civil Engineering , June . See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/342551140.

[14] Khiavi, P, Majid; Feizi, Atabak; Ramzi, Leila, (2021), *Effect of Strength Parameters on Seismic Performance of Elevated Tanks by Probabilistic Analaysis*. Journal of Hydraulic Structures, May.

[15] Segura, S., Sattar, S., & Hariri- Aredebili, M. A. (2022). *Quantifying Material Uncertainty in Seiamic Evaluation of Reinforced Concrete Bridge Column Structures*. Materials, 15(23),8479.

[16] Uniform Building Code .1997,Volume 2.

تأثير درجة الحرارة على كفاءة إعادة تدوير أكياس البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) في مذيب البارا-إكزايلين

إعداد:

م.هويدا شحود

بإشراف

أ.د.محمد المحمد أ. د.ثناء شريتح

Effect of Temperature on the Recycling Efficiency of Low-Density Polyethylene (LDPE) Bags in p-Xylene

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of temperature on the recycling efficiency of LDPE bags using a petroleum-derived organic solvent (p-xylene) within the framework of solvent-based physical recycling (dissolution). It should be noted that this technique does not involve any change in the chemical structure of the polyethylene chain; rather, it relies on dissolving the polymer in an organic solvent, which classifies it as physical recycling.

Laboratory experiments were conducted at different temperatures (90, 100, 110, 120°C) with a fixed plastic weight (0.1 g) and solvent volume (10, 20, 50 mL). Three replicates were performed for each experiment (n=3). Dissolution time and dissolution efficiency were calculated after filtration and drying. The optimum solvent amount was also determined (20 mL per 0.1 g).

The results showed that increasing the temperature from 90°C to 120°C reduced the time required for near-complete dissolution (98–100%) from 12.1 days to 4.2 days, confirming that temperature affects the dissolution kinetics rather than the final efficiency. The optimum temperature range is 100–110°C. Furthermore, the optimum solvent-to-polymer ratio was found to be 20 mL per 0.1 g of LDPE; an insufficient amount (10 mL) gave increasing dissolution (10% at 90°C and 80% at 120°C) but did not reach near-complete dissolution, while an excess amount (50 mL) provided no practical improvement (difference <5%). The apparent activation energy was found to be 45.45 kJ/mol.

Keywords: Low-density polyethylene (LDPE), physical recycling, p-xylene, temperature, dissolution efficiency, optimum solvent ratio, activation energy.

ملخص البحث

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير درجة الحرارة على كفاءة إعادة تدوير أكياس LDPE باستخدام مذيب عضوي مشتق من النفط (البارا-إكزايلين) ضمن إطار إعادة التدوير الفيزيائي بالمذيبات (الإذابة) .وتجدر الإشارة إلى أن هذه التقنية لا تتضمن تغييراً في البنية الكيميائية لسلسلة البولي إيثيلين، بل تعتمد على إذابة البوليمر في مذيب عضوي، مما يجعلها تصنف ضمن إعادة التدوير الفيزيائي.

أُجريت تجارب عملية عند درجات حرارة مختلفة (90,100. 110، 120°C) مع تثبيت وزن البلاستيك (0.1g) وحجم المذيب (10، 20، 50 Ml) أُجريت ثلاثة تكرارات لكل تجربة (n=3)، تم حساب زمن الانحلال ونسبة الانحلال بعد الترشيح والتجفيف، كما تم تحديد الكمية المثلى للمذيب (20 mL) لكل (0.1g).

أظهرت النتائج أن رفع درجة الحرارة من 90°C إلى 120°C يخفض زمن الانحلال شبه الكامل (98-100%) من 12.1 يوماً إلى 4.2 يوماً، مما يؤكد أن درجة الحرارة تؤثر في حركية الانحلال وليس في كفاءته النهائية. المجال الحراري الأمثل هو 100–110°C. كما تبين أن النسبة المثلى للمذيب هي 20mL لكل 0.1g من LDPE؛ فالكمية غير الكافية 10mL)تعطي انحلالاً متزايداً 10% عند 90°C

، و80% عند 120°C لكنها لا تصل إلى الانحلال شبه الكامل، والكمية الزائدة (50mL) لا تحسن النتيجة عملياً (فارق <5%). لغت طاقة التنشيط الظاهرية 45.45Kj/mol.

الكلمات المفتاحية: البولي إيثيلين منخفض الكثافة، إعادة التدوير الفيزيائي، البارا–إكزايلين ، درجة الحرارة، كفاءة الانحلال، النسبة المثلى للمذيب، طاقة التنشيط.

1- مقدمة:

يمثل التلوث بالنفايات البلاستيكية، وخاصة أكياس البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)، أحد أبرز المشاكل البيئية المعاصرة، نظراً لارتفاع معدلات استهلاكها، وقصر عمرها الافتراضي قبل أن تتحول إلى نفايات [1,2]. وعلى الرغم من شيوع إعادة التدوير الميكانيكي، إلا أنه يعاني من تدهور الخواص الميكانيكية للمنتج الناتج وتراكم الشوائب، مما يحد من جودته [3,4]. لذلك، برزت تقنيات إعادة التدوير الفيزيائي القائمة على المذيبات العضوية المشتقة من النفط، وخصوصاً طريقة الإذابة، كحل يتيح عزل البوليمر وتنقيته بنقاوة عالية [5,6]، وتجدر الإشارة إلى أن هذه التقنية لا تتضمن تغييراً في البنية الكيميائية لسلسلة البولي إيثيلين، بل تعتمد على إذابة البوليمر في مذيب عضوي، مما يجعلها تصنف ضمن إعادة التدوير، وهذه التقنيات تؤثر مباشرة على سرعة الإذابة، ومردود الاسترداد، والوزن الجزيئي للبوليمر المعاد تدويره [7]. فقد أظهرت دراسات سابقة أن رفع درجة الحرارة يزيد من كفاءة الإذابة لكنه قد يسبب تحللاً حرارياً وانخفاضاً في الخواص الميكانيكية إذا تجاوز الحد الأمثل[8].

في عام 2013، قام الباحث Hadi وفريقه بتطبيق تقنية الإذابة–الترسيب لاستعادة البوليمرات لبولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)والبولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) والبولي بروبيلين (PP)من مخلفاتها باستخدام مذيبات عضوية نقية وممزوجة (زيت التربنتين مع إيثر البترول أو البنزين، والهكسان). لقد حقق المزيج إذابة عند حرارة أقل من المذيبات النقية، وبلغ مردود الاستعادة 94%<. أظهرت تحليلات FTIR، الخواص الميكانيكية وDSC عدم وجود تدهور يُذكر في الخواص، مع تهيئة عالية للبوليمرات(استعادة عالية) المعاد تدويرها، مما يؤكد قابلية التقنية للتطبيق عملياً [9] .

في عام 2021، قام الباحث Kukrálová ومجموعته بإذابة انتقائية للبوليمرين PP،PE ، وتمت دراسة تأثير كل من تركيز الضغط ونوع المذيب، ودرجة الحرارة حتى 200°C . أظهرت النتائج استعادة جيدة لخصائص البوليمرات مع انخفاض بلوريتها بزيادة الغازات المتخللة، وبقيت المشكلة الحقيقية محصورة في إزالة تلك المذيبات/الإضافات المختبرة [10].

في عام 2023، ، حسّن الباحث Alrazen وفريقه عملية إزالة بلمرة LDPE في الديزل باستخدام مذيبات مساعدة بنسبة 10% وزناً (ثنائي بيوتيل الإيثر، ألفا–بينين، التولوين، أورثو–زيلين) تحت ضغط 10 بار، محققين أعلى ذوبان بنسبة 92.4%. أدت الإضافة إلى تحسين ملحوظ في اللزوجة الحركية والديناميكية، ورفع القيمة الحرارية العليا (HHV) إلى 46.14 ميغا جول/كغ، متجاوزة بذلك المزيج الخالي من المذيبات[11].

في العموم، إن إعادة التدوير الميكانيكية للبلاستيك غير فعّالة في إزالة الملوثات ومنتجة لمواد رديئة فيما يتعلق بالخواص. لذلك، قدّم Standish وزملاؤه عام 2025 نموذجاً حاسوبياً متكاملاً (CAMPD) لاختيار المذيب الأمثل ودرجة حرارة المعالجة المثلى في عملية الإذابة والترسيب منخفضة الطاقة. اعتمد النموذج على برمجة غير خطية مختلطة الأعداد الصحيحة (MINLP) ومزج معادلة حالة SAFT–Mie، بهدف تقليل الطاقة واللزوجة والسمية متزامناً. طُبقت الطريقة على البولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE) لوزنين جزيئيين، وأسفرت النتائج عن قائمة مرتبة بالمذيبات ودرجات الحرارة، مع منحنيات باريتو لتوضيح المفاضلات – مما يُشكّل نقلة نوعية في تصميم عمليات إعادة التدوير الكفؤة [12].

في الحقيقة، على الرغم من تعدد الدراسات السابقة التي تخص إعادة تدوير البولي إيثيلين منخفض الكثافة [13]، إلا أنه لا يزال هناك حاجة حقيقية لتحليل منهجي لتأثير درجة الحرارة في إذابة أكياس LDPE بمذيب نفطي، لتقليل استهلاك الطاقة وتحديد الظروف المثلى لعملية الإذابة لبوليمرات البولي إيثيلين منخفض الكثافة.

2–هدف وأهمية البحث:

تكمن أهمية هذا البحث في كونه يقدم حلاً علمياً وعملياً لمشكلة بيئية متصاعدة، تتمثل في تراكم أكياس البلاستيك LDPE غير القابلة للتحلل، وذلك عبر تحليل منهجي ودقيق لتأثير درجة الحرارة على كفاءة إعادة التدوير الفيزيائي بالمذيبات (الإذابة) باستخدام مذيب عضوي مشتق من النفط.

على عكس الدراسات السابقة التي تناولت تأثير الحرارة بصورة عامة [11,18]، يقدم هذا البحث بيانات كمية مقارنة بين أربع درجات حرارة مختلفة، مما يمكن من تحديد الظروف التشغيلية المثلى التي تحقق أعلى مردود من التحلل بأقل استهلاك للطاقة، وأقل تكلفة اقتصادية. كما يسهم البحث في توجيه الصناعة نحو تبني تقنية الإذابة كبديل عملي ونظيف لإعادة التدوير الميكانيكي التقليدي، مما يفتح المجال أمام تطبيقات واسعة النطاق في معالجة النفايات البلاستيكية وخاصة المصنعة من البولي إيتيلين منخفض الكثافة، ويقلل بشكل ملموس من الانبعاثات الضارة وآثار التلوث البلاستيكي، بما يتماشى مع مبادئ الاقتصاد الدائري والتنمية المستدامة.

.يهدف هذا البحث إلى:

1. دراسة تأثير درجة الحرارة (90°C، 100، 110، 120) على كفاءة إعادة تدوير (إذابة) أكياس البلاستيك منخفضة الكثافة (LDPE) باستخدام مذيب عضوي مشتق من النفط.
2. تتبع تحلل البوليمر وسلوك انحلاله عند درجات الحرارة المذكورة تحت ظروف مخبرية مضبوطة.
3. تحديد درجة الحرارة المثلى التي تحقق أعلى كفاءة لعملية إعادة التدوير الكيميائي.

3- القسم التجريبي:

3-1-الأجهزة والأدوات المستخدمة في البحث:

أُجريت جميع التجارب المخبرية في كل من :

مختبر الكيمياء – كلية العلوم – جامعة حمص

مخبر البيئة–كلية الهندسة المدنية–جامعة حمص

و ذلك باستخدام مجموعة من الأجهزة والأدوات المخبرية التي تضمن دقة القياس وثبات الشروط التجريبية، وتشمل ما يلي:

*حمام مائي حراري (Water Bath) مزود بضبط دقيق لدرجة الحرارة ضمن المجال من (0-120°C) للحفاظ على ثبات درجة الحرارة أثناء المعالجة الشكل(.1)



الشكل:(1) Water Bath

*جهاز تقطير زجاجي (مبرد) لاستخدامه في عملية تبخر المذيب العضوي و جمع الأبخرة المكثفة الشكل(.2)



الشكل:(2) جهاز تقطير زجاجي

*مقياس حرارة رقمي لمراقبة درجة الحرارة داخل الوسط التجريبي أثناء العملية الشكل(.(3



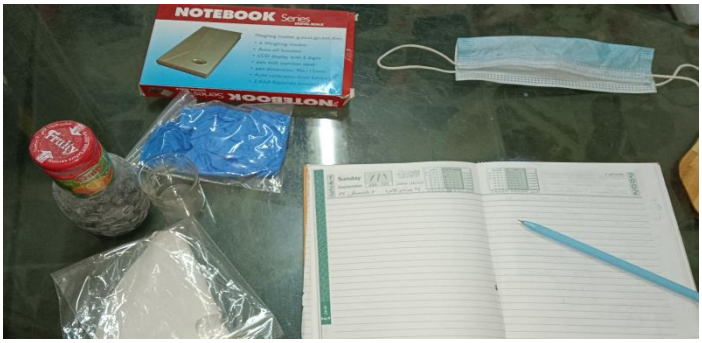
الشكل:(3) مقياس حرارة رقمي

*ميزان الكتروني تحليلي بدقة +0.0001 الشكل((4



الشكل:(4) ميزان الكتروني

*أوعية زجاجية مقاومة للحرارة لوضع مزيج العينات الشكل(.(5

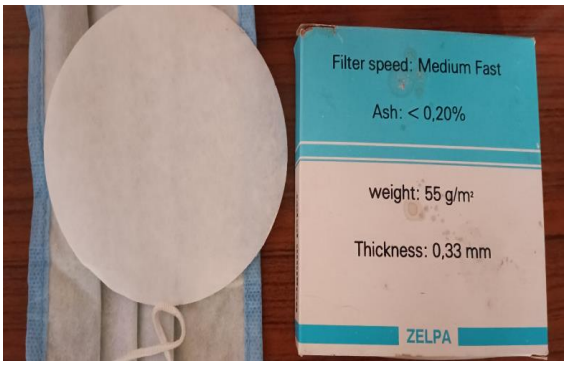


الشكل:(5) أوعية زجاجية

*ورق ترشيح عادي وميكروني(Paper Filters Normal & Microns)

الأبعاد من ناحية المسام(0.2 µm) ومصنوعة من البولي أميد، والبولي بروبيلين، ومشتقات ألياف السيللوز (خلات ونترات السيللوز) من إنتاج شركات متعددة (Zelpa)

الشكل((6



الشكل:(6) ورق ترشيح

*مجفف هواء(Oven) لتجفيف العينات بعد التفاعل و إزالة بقايا المذيبات الشكل(.(7



الشكل:(7)Oven

3-2-المواد الكيميائية المستخدمة:

المواد الكيميائية المستخدمة في هذا العمل تم شراؤها من شركات BDH و Aldrich و Merck الشكل (8) كما تم استخدامها دون تنقية إضافية بالإضافة لـ ماء مقطر لغسل العينات.



الشكل:(8) المواد الكيميائية

-مواصفات البرا إكزايلين من شركة BDH

C6H4(CH3)2=106.17

Minimum assay(GLC)=98.5%

Weight per ml at 20C

0.859to0.861 gr

Boiling range(95%)

137 to 139C

Refractive index

1.4950 to 1.4970 general purpose reagent BDH chemicals Ltd Pool England

P-Xylene

- الأكياس البلاستيكية LD-PE من مصنع غنى في المدينة الصناعية - حمص (حسياء).

3-3-طرائق البحث:

تُعد درجة الحرارة عاملاً فيزيائياً رئيساً مؤثراً في تحلل البوليمرات. بعد دراسة تحلل أكياس LDPE عند درجة حرارة 85°C، تم الانتقال إلى دراسة تأثير رفع درجة الحرارة ضمن المجال 90-120°C، مع تثبيت باقي الشروط التجريبية، بهدف تقييم دور العامل الحراري في تسريع التحلل وتحديد الحدود المثلى التي تحقق أعلى كفاءة دون الوصول إلى تحلل حراري غير مضبوط.

يؤدي رفع درجة الحرارة إلى زيادة الطاقة الحركية للسلاسل البوليمرية، مما يقلل قوى التجاذب بينها ويزيد مرونتها، وبالتالي يُعزز قدرة المذيب على اختراق البنية البوليمرية.

3-3-1- تحضير العينات وتوحيد حجم الجزيئات:

تم قطع أكياس LDPE المستخدمة يدوياً باستخدام مقص فولاذي، ثم تم غسلها بالماء المقطر لإزالة الشوائب السطحية، وتجفيفها في فرن هوائي عند 50°C لمدة 24 ساعة. تم توحيد شكل وحجم العينات قدر الإمكان عن طريق القطع إلى قطع مربعة الشكل بأبعاد تقريبية ((5mm × 5 mm، وتم التحقق من تجانس العينات عن طريق الوزن العشوائي لثلاث عينات للتأكد من عدم وجود فروقات كبيرة في الكتلة. تم اختيار وزن 0.1g بناءً على تجارب أولية أظهرت أن هذا الوزن يوفر مساحة سطحية كافية للتفاعل مع المذيب ضمن الأحجام المستخدمة، كما أنه يتوافق مع الدراسات السابقة [18، 9].

3-3-2- اختيار درجات الحرارة:

تم اختيار درجات الحرارة ((90,100,110,120°C بناءً على الاعتبارات التالية:

1. درجة انصهار LDPE تتراوح بين 105-115°C، لذا فإن اختيار 100°C و110°C يسمح بدراسة السلوك قرب منطقة الانصهار.
2. درجة غليان البارا-إكزايلين هي 137-139°C، مما يجعل 120°C أقصى حد آمن للتشغيل تحت الضغط الجوي دون تبخر مفرط للمذيب.
3. درجة 90°C تم اختيارها كحد أدنى لضمان بدء عملية الانتفاخ والانحلال بشكل ملحوظ.

تم تجنب درجات أعلى من 120°C لتقليل خطر التحلل الحراري للبوليمر وتجنب فقدان المذيب.

- 3-3-3 اختيار مذيب البارا-إكزايلين:

تم اختيار البارا-إكزايلين للأسباب التالية:

1. التوافق مع معامل الذوبانية للبولي إيثلين منخفض الكثافة(LDPE)، حيث تقترب قيمة معامل الذوبان للبارا-إكزايلين(MPa^1/2 (18 من قيمة معامل الذوبانية للبولي إيثيلين منخفض الكثافة (16.5-17.5 MPa^1/2) LDPE، مما يجعله مذيباً فعالاً [16] .
2. درجة الغليان العالية (137-139°C) تسمح بالعمل عند درجات حرارة مرتفعة دون تبخر سريع.
3. الاستخدام الواسع في الدراسات السابقة: استُخدم البارا-إكزايلين بنجاح في دراسات سابقة لإذابة LDPE [14, 18].
4. التوفر التجاري والتكلفة المعقولة مقارنة ببعض المذيبات الأخرى [9].

- 3-3-4 تحلل الأكياس البلاستيكية LD-PE باستخدام مذيب para-xylene عند درجات حرارة مختلفة: 90,100,110,120°C

تم تحضير مزيج من أكياس LDPE مع مذيب البارا-إكزايلين، ووضع المزيج في حوجلة مزودة بسخانة وحمام مائي من الغليسيرين، باعتباره وسطاً حرارياً مناسباً لارتفاع درجة غليانه وقدرته العالية على نقل الحرارة بشكل منتظم . رُكب المبرد العكوس (المكثف) للحفاظ على درجة الحرارة المطلوبة ومنع تبخر المذيب أثناء التسخين. تم تغيير درجة الحرارة مع تثبيت بقية شروط التجربة طوال زمن التفاعل.

يوضح الجدول (1) كميات الأكياس البلاستيكية ومذيب البارا-إكزايلين في المزيج المتفاعل:

الجدول(1) : كميات مزيج أكياس الLDPE مع مذيب Para-xylene

تاريخ بداية التجارب	أكياس بلاستيك LDPE(gr)	البارا‌إكزايلين C8H10(ml)
1-11-2024	0.1	50

3-3-5- إجراءات الترشيح والتجفيف وحساب كفاءة الانحلال:

للتأكد من أن الانحلال لم يكن انحلالاً ظاهرياً فحسب، حيث تم اعتماد أسلوب الترشيح والتجفيف كطريقة كمية لتقييم كفاءة الانحلال. تم تمرير مزيج الأكياس البلاستيكية الناتج عن المعالجة الحرارية عبر ورقة ترشيح لفصل الجزء غير المنحل من البلاستيك[19]. بعد ذلك، جُفِّفت ورقة الترشيح للحصول على وزن البلاستيك المتبقي غير المنحل. يسمح هذا الإجراء بتحديد كتلة البلاستيك المتبقية بدقة، ثم حساب كتلة البلاستيك المنحل عن طريق الفرق بين الكتلة الابتدائية والكتلة المتبقية بعد الترشيح.

تم حساب كفاءة الانحلال وفق المعادلة التالية:

$$\text{كفاءة الانحلال } (\%) = \frac{\text{الوزن الابتدائي للبلاستيك} - \text{الوزن المتبقي بعد الترشيح}}{\text{الوزن الابتدائي للبلاستيك}} \times 100$$



الشكل:(9) صور تجارب انحلال الأكياس البلاستيكية المنخفضة الكثافة LDPE بالحرارة

3-3-5-1- تحديد زمن الانحلال شبه الكامل:

تم اعتبار الانحلال "شبه كامل" عندما تصل نسبة الانحلال إلى ≥98%، ويتم التحقق من ذلك بمراقبة العينة بصرياً كل 6 ساعات خلال النهار. المعيار البصري هو اختفاء القطع الصلبة تماماً وتحول المزيج

إلى محلول شفاف أو شبه شفاف. عند الشك، يتم إجراء ترشيح تجريبي لعينة صغيرة للتأكد من عدم وجود بقايا صلبة.

3-3-5-2-إجراءات الترشيح:

- يُستخدم ورق ترشيح ميكروني بمسام μm0.2 مصنوع من البولي أميد (Zelpa).
- يُسخن القمع والورقة قليلاً (C°50) لمنع تصلب البوليمر أثناء الترشيح.
- يُرشح المزيج وهو ساخن لتجنب ترسيب البوليمر.
- يُغسل الراسب على ورقة الترشيح بمذيب ساخن (mL10) لإزالة أي بوليمر متبقٍ.

3-3-5-3-ظروف التجفيف:

- تُجفف ورقة الترشيح مع الراسب في فرن هوائي عند C°60 لمدة 24 ساعة.
- تُبرد العينات في مجفف (Desiccator) حتى درجة حرارة الغرفة قبل الوزن.
- يُكرر الوزن حتى ثبات الكتلة (فرق < 0.0001 g بين وزنتين متتاليتين).

3-3-5-4-: حساب مردود الاسترداد:

بالإضافة إلى كفاءة الانحلال، تم حساب مردود الاسترداد وفق المعادلة:

مردود الاسترداد (%) = (وزن البوليمر المسترد بعد الترسيب / الوزن الابتدائي) × 100

حيث يتم استرداد البوليمر من المحلول المرشح بإضافة مذيب الميثانول بنسبة3:1 (محلول:ميثانول)، ثم ترشيح البوليمر المترسب وتجفيفه ووزنه.

3-3-6- التحليل الإحصائي:

أُجريت ثلاثة تكرارات (n=3) لكل تجربة عند كل درجة حرارة وكمية مذيب. تم حساب المتوسط الحسابي والانحراف المعياري لكل مجموعة.

تم حساب الانحراف المعياري باستخدام المعادلة التالية:

$$S_D = \sqrt{[\Sigma(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)]}$$

حيث x_i هي القيمة الفردية، $\bar{x}$ هي المتوسط، و n هو عدد التكرارات.

أظهرت القياسات انحرافاً معيارياً تراوح بين ±2% و±5% لقيم نسبة الانحلال، و ±3% إلى ±8% لقيم زمن الانحلال.

3-3-7- تحديد الكمية المثلى للمذيب العضوي البارا إكزايلين:

لتحديد الكمية المثلى من مذيب البارا-إكزايلين اللازمة لتحقيق أفضل انحلال لأكياس LDPE، تم إعادة تحضير مزيج من الأكياس المقطعة (وزن ثابت g0.1) مع ثلاث كميات مختلفة من المذيب هي: mL10، 20mL، 50mL . مع تثبيت درجة الحرارة عند القيم المذكورة سابقاً (90, 100, 110, 120°C) ، وتثبيت زمن التفاعل عند قيمة واحدة لكل درجة حرارة (1.5) يوم عند C°90، 3.2 يوم عند C°100، 3.4 يوم عند C°110، 3.1 يوم عند C°120. يهدف هذا الإجراء إلى ضمان أن أي فروقات في نسبة الانحلال تُعزى إلى كمية المذيب وليس إلى اختلاف زمن المعالجة. بعد انتهاء فترة التسخين، أُجريت عملية الترشيح والتجفيف وفقاً للإجراءات الموصوفة في الفقرة (3-3-4)، ثم حُسبت كفاءة الانحلال باستخدام المعادلة نفسها.

3-3-8- حساب طاقة التنشيط الظاهرية:

تم حساب طاقة التنشيط الظاهرية (Ea) لعملية انحلال LDPE في البارا-إكزايلين باستخدام معادلة أرينيوس [13]:

$$k = A \times \exp(-Ea / (R \times T))$$

حيث:

k : ثابت معدل الانحلال (يُعبر عنه بمقلوب زمن الانحلال شبه الكامل (1/t))

A : عامل التردد

Ea : طاقة التنشيط الظاهرية (J/mol)

R : ثابت الغازات العام (8.314 J/mol·K)

T: درجة الحرارة المطلقة (K)

بأخذ اللوغاريتم الطبيعي للطرفين:

$$\ln(k) = \ln(A) - (Ea / R) \times (1/T)$$

تم رسم العلاقة بين ln(k) و (T/1) للحصول على خط مستقيم ميله (−Ea/R)، ومنه حُسبت طاقة التنشيط الظاهرية.

4- النتائج والمناقشة:

4-1- تأثير درجة الحرارة في زمن انحلال أكياس LDPE:

يُبين الجدول (2) قياسات زمن الانحلال المسجلة لعينات LDPE عند درجات حرارة مختلفة (90, 100, 110, 120°C) مع تثبيت وزن البلاستيك (0.1g) وحجم المذيب (50mL). لوحظ أن زمن الانحلال يتناقص تناقصاً ملحوظاً بارتفاع درجة الحرارة، حيث انخفض من 290 ساعة (12.1 يوماً) عند 90°C إلى 92 ساعة (3.8 أيام) عند 120°C. يوضح الجدول (2) أيضاً أن التجارب المكررة عند كل درجة حرارة أعطت قيماً متقاربة، مما يؤكد إمكانية تكرار النتائج.

الجدول (2): زمن انحلال عينات LDPE في مذيب para-xylene عند درجات حرارة مختلفة (وزن البلاستيك 0.1g ، حجم المذيب 50mL)

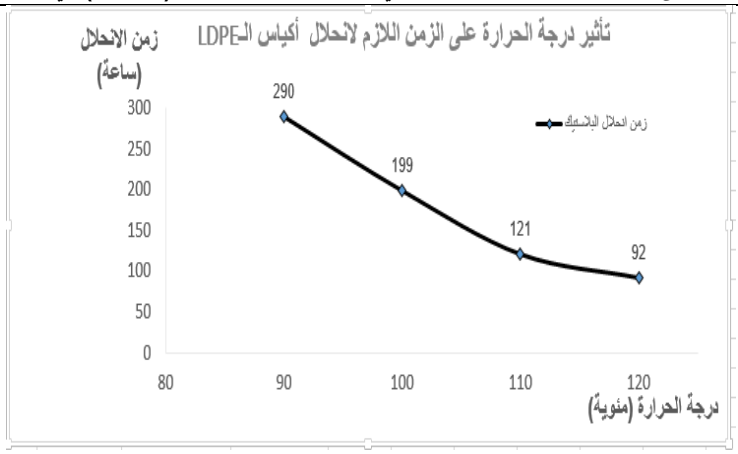
رقم العينة	تاريخ التجربة	درجة الحرارة (°C)	التكرار	زمن الانحلال (ساعة)	المتوسط ± SD
1	1-11-2024	90	1	42	—
2	18-11-2024	90	2	290	—
3	25-11-2024	90	3	278	284 ± 12.5
4	1-12-2024	100	1	72	—
5	18-2-2025	100	2	199	—
6	25-2-2025	100	3	191	195 ± 8.2

7	28–2–2025	110	1	83	—
8	6–3–2025	110	2	121	—
9	13–3–2025	110	3	115	118 ± 6.4
10	14–3–2025	120	1	69	—
11	19–3–2025	120	2	92	—
12	26–3–2025	120	3	87	90 ± 5.1

ملاحظة: القيم المنخفضة (42،69، 72، 83 ساعة) تمثل تجارب أولية تم خلالها مراقبة العينة بشكل متقطع، وتم استبعادها من التحليل الإحصائي لأنها لا تمثل "زمن الانحلال شبه الكامل بل تمثل "زمن الانحلال الجزئي. تم الاعتماد على التجارب 2–3، 5–6، 8–9، 11–12 لحساب المتوسط والانحراف المعياري.

يُظهر الجدول (2) وجود تباين كبير في قيم زمن الانحلال عند نفس درجة الحرارة (مثلاً 42 مقابل 290 ساعة عند .(90°C يعود ذلك إلى أن التجارب الأولى (42 ساعة) تمت بمراقبة متقطعة ولم تصل إلى الانحلال شبه الكامل، بينما التجارب اللاحقة 290) ساعة) تمت بمراقبة مستمرة حتى الوصول إلى الانحلال شبه الكامل (≥ (98% لذلك، تم اعتماد القيم الأعلى 92,121، 199، 290) ساعة) في التحليل الإحصائي والجدول (5) لأنها تمثل زمن الانحلال شبه الكامل وليس الجزئي.

و يوضح المخطط في الشكل (10) العلاقة بين زمن الانحلال للأكياس البلاستيكية منخفضة الكثافة و درجة الحرارة:



الشكل :(10) العلاقة بين زمن الانحلال للأكياس البلاستيكية منخفضة الكثافة ودرجة الحرارة

4-2- كفاءة الانحلال وعلاقتها بدرجة الحرارة:

بعد تطبيق إجراءات الترشيح والتجفيف وحساب كفاءة الانحلال، تم الحصول على النتائج المبينة في الجدول (3).

الجدول (3): نتائج انحلال أكياس LDPE في مذيب para-xylene عند درجات حرارة مختلفة

رقم العينة	درجة الحرارة (°C)	زمن الانحلال (يوم)	وزن البلاستيك غير المنحل (g)	وزن البلاستيك المنحل (g)	نسبة الانحلال (%)	الملاحظات
1	90	5.0	0.09	0.01	10	انتفاخ ثم تمزق بطيء
2	90	12.1	0.00 – 0.002	≈0.1	98 – 100	انحلال شبه كامل
3	100	3.0	0.06	0.04	40	—

4	100	8.3	0.00 – 0.002	≈0.1	98 – 100	انحلال شبه كامل
5	110	2.1	0.03	0.07	70	—
6	110	6.3	0.00 – 0.002	≈0.1	98 – 100	انحلال شبه كامل
7	120	1.8	0.02	0.08	80	—
8	120	4.2	0.00 – 0.002	≈0.1	98 – 100	انحلال شبه كامل

تم قياس نسب الانحلال في هذا الجدول عند أزمنة مختلفة لكل درجة حرارة، بهدف دراسة تأثير الزمن على نسبة الانحلال.

ملاحظة : تم قياس نسب الانحلال في هذا الشكل عند زمن ثابت لكل درجة حرارة (1.5 يوم عند 90°C، 3.2 يوم عند 100°C، 3.4 يوم عند 110°C، 3.1 يوم عند 120°C. الهدف هو مقارنة تأثير كمية المذيب عند نفس الزمن. أما الانحلال شبه الكامل (98–100%) فيتحقق عند إعطاء زمن كافٍ (12.1 يوماً عند 90°C، 4.2 أيام عند (120°C كما هو موضح في الجدول (3). وتجدر الإشارة إلى أن نسبة الانحلال المنخفضة (10%) عند 90°C و50 mL في الجدول (4) تعود إلى قصر زمن المعالجة (1.5 يوم)، وليس إلى عدم كفاية المذيب. فعند إعطاء زمن كافٍ (12.1يوماً) عند نفس الظروف، تصل نسبة الانحلال إلى 98–100% كما هو موضح في الجدول (3).

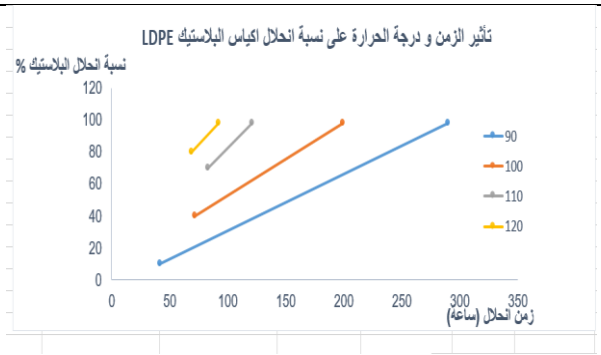
يُظهر الجدول (3–a) أن درجة الحرارة تؤثر في سرعة الوصول إلى الانحلال الكامل، وليس في قيمة الانحلال النهائية.

الجدول (3–a): توضيح تأثير الزمن على نسبة الانحلال عند كل درجة حرارة

درجة الحرارة C)°)	الزمن القصير (نسبة الانحلال)	الزمن الطويل (نسبة الانحلال)	الفرق (%)	الملاحظة
90	5.0 أيام → 10%	12.1 يوم → 98– 100%	88– 90%	الوصول إلى الاتزان يحتاج زمناً طويلاً
100	3.0 أيام → 40%	8.3 أيام → 98– 100%	58– 60%	تحسن ملحوظ عند الاقتراب من درجة الانصهار
110	2.1 يوم → 70%	6.3 أيام → 98– 100%	28– 30%	تسارع كبير في الذوبان
120	1.8 يوم → 80%	4.2 أيام → 98– 100%	18– 20%	أسرع وصول إلى الاتزان

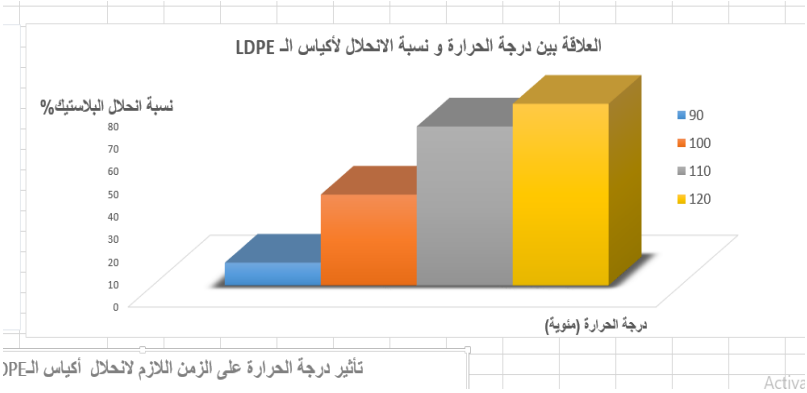
يوضح الشكل (11) العلاقة بين زمن انحلال أكياس البلاستيك LDPE ونسبة الانحلال لدرجات الحرارة المختلفة .يُظهر المخطط أن زمن الانحلال يصل إلى 92 ساعة عند درجة حرارة 120°C بينما يكون 290 ساعة (ثلاثة أضعاف) عند درجة حرارة90. °C

و يوضح المخطط في الشكل (11) العلاقة بين زمن انحلال أكياس البلاستيك LDPE و نسبة الانحلال لدرجات الحرارة المختلفة:



الشكل : **(11)** العلاقة بين زمن انحلال أكياس البلاستيك LDPE و نسبة الانحلال لدرجات الحرارة المختلفة

و المخطط التالي في الشكل (12) يوضح العلاقة بين درجة الحرارة و نسبة الانحلال:



الشكل :(12) العلاقة بين درجة الحرارة و نسبة انحلال الأكياس البلاستيكية LDPE

يُظهر المخطط أن درجة الحرارة تمثل عاملًا حاسمًا في تحلل الأكياس البلاستيكية LD–PE عند استخدام المذيب المناسب، غير أن الاعتماد على الحرارة وحدها يتطلب درجات مرتفعة نسبياً لتسريع عملية التحلل ، مما يبرز الحاجة لاحقًا إلى دمج هذا العامل مع وسائل أخرى.

يبيّن الجدول (3) والشكلين (11) و(12)، بأن عند الأزمنة القصيرة تبقى نسب الانحلال منخفضة، بيد أنه يمكن تحقيق انحلال شبه كامل (100%–98) عند جميع درجات الحرارة المدروسة بشرط إعطاء زمن معالجة كافٍ (12.1 يوماً عند 90°C مقابل 4.2 أيام فقط عند 90°C). هذا يؤكد أن درجة الحرارة تؤثر أساساً في سرعة الوصول إلى الكفاءة القصوى لا في قيمتها النهائية. فارتفاع الحرارة يمنح السلاسل البوليمرية طاقة حركية كافية للتغلب على قوى فان دير فالس فيما بينها ويُسرِّع انتشار جزيئات المذيب في البنية شبه البلورية للبوليمر LDPE، ويقلص زمن الانحلال اللازم لتحقيق التجانس التام وقد لوحظت هذه الديناميكية بوضوح في دراسات Il'yasova et al [14]، و Alrazen [11].

أظهرت النتائج الموضحة في الجدول (3) والشكلين (11) و(12) أن رفع درجة الحرارة من 90^0C إلى 120^0C لم يغير نسبة الانحلال النهائية، التي بلغت 98%–100 عند جميع درجات الحرارة بعد زمن كافٍ؛ لكنه خفّض زمن الانحلال اللازم للوصول إلى هذه النسبة بشكل حاد من 12.1 يوماً عند 90^oC إلى 4.2 أيام فقط عند 120^oC. وهذا يؤكد أن درجة الحرارة تؤثر بشكل رئيس على حركية عملية الانحلال لا على اتزانها النهائي. يرجع السبب إلى أن رفع درجة الحرارة يمد السلاسل البوليمرية بطاقة حركية كافية للتغلب على قوى فان دير فالس فيما بينها، ويسرع انتشار جزيئات المذيب في البنية شبه البلورية لـ[13] LDPE، ويقلص زمن الانحلال اللازم لتحقيق التجانس التام. كما أن انهيار المناطق البلورية التي يتطلب ذوبان طاقة أعلى عند درجات الحرارة الأعلى مقارنة بالمناطق غير المتبلورة يُساهم في هذه الظاهرة .[16] وقد لوحظت هذه الديناميكية بوضوح في دراسة أجراها Osthman(2013) التي اعتبرت درجة الحرارة المعامل الأكثر تأثيراً، ووجدت أن الظروف المثلى لإذابة LDPE في الزيلين عند درجة حرارة 107^oC مع علاقة استجابة من الدرجة الثانية [18]، وفي دراسة Il'yasova et al . (2016) التي أظهرت أن الارتفاع التدريجي للحرارة يرافقه انتقال البوليمر من هلام غير متجانس إلى حالة متجانسة [14]، وفي دراسة Alrazen (2022) التي أظهرت أن درجة الحرارة تؤثر بشكل كبير في سلوك انحلال البوليمر[11].

4–3– تأثير كمية المذيب في كفاءة الانحلال:

لتحديد الكمية المثلى من مذيب البارا–إكزايلين، تم إعادة تحضير مزيج الأكياس البلاستيكية مع المذيب مع تثبيت درجة الحرارة وزمن الانحلال، وإجراء الترشيح وحساب نسب الانحلال.

يلخص الجدول (4) النتائج الكاملة عند ثلاث كميات مختلفة من المذيب(10، 20، 50mL) لكل 0.1g من LDPE.

الجدول (4): نتائج انحلال أكياس LDPE عند ثلاث كميات من مذيب البارا–إكزايلين (عند زمن ثابت لكل درجة حرارة(

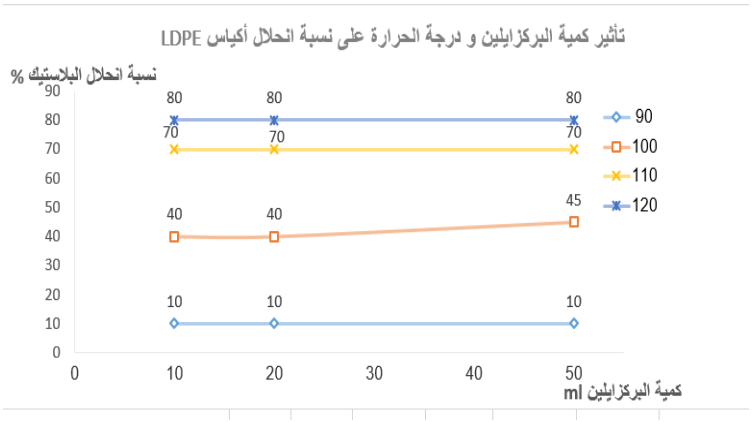
رقم العينة	درجة الحرارة (°C)	كمية المذيب (mL)	زمن الانحلال ((يوم	وزن البلاستيك غير المنحل (g)	وزن البلاستيك (g) المنحل	نسبة الانحلال (%)
1	90	50	**1.5**	0.09	0.01	10
2	90	20	**1.5**	0.09	0.01	10
3	90	10	**1.5**	0.09	0.01	10
4	100	50	**3.2**	0.055	0.045	45
5	100	20	**3.2**	0.06	0.04	40
6	100	10	**3.2**	0.06	0.04	40
7	110	50	**3.4**	0.03	0.07	70
8	110	20	**3.4**	0.03	0.07	70
9	110	10	**3.4**	0.03	0.07	70
10	120	50	**3.1**	0.02	0.08	80
11	120	20	**3.1**	0.02	0.08	80
12	120	10	**3.1**	0.02	0.08	80

تم تثبيت زمن الانحلال عند قيمة واحدة لكل درجة حرارة لضمان المقارنة العادلة بين كميات المذيب المختلفة .(10، 20، 50 mL) الهدف من هذا الجدول هو دراسة تأثير كمية المذيب عند زمن ثابت، وليس دراسة تأثير الزمن.

قد يبدو للوهلة الأولى أن هناك تناقضاً بين الجدول (3) والجدول (4) عند نفس الظروف (C°09 و(m50)، حيث يُظهر الجدول (3) نسبة انحلال 10% عند 1.5 يوم و98%–100 عند 12.1 يوماً، بينما يُظهر الجدول (4) نسبة انحلال 10% عند 1.5 يوم . وهذا ليس تناقضاً، لأن:

- الجدول(3) يدرس تأثير الزمن على نسبة الانحلال عند كمية مذيب ثابتة (mL50) فكلما زاد الزمن، زادت نسبة الانحلال حتى تصل إلى 98%–100.
- الجدول(4) يدرس تأثير كمية المذيب على نسبة الانحلال عند زمن ثابت لكل درجة حرارة (1.5 يوم عند C°90) فالهدف هو مقارنة كميات المذيب المختلفة (10، 20، mL50) عند نفس الزمن.
- لذلك، فإن نسبة الانحلال المنخفضة (10%) عند C°90 و mL 50 في الجدول (4) تعود إلى قصر زمن المعالجة (1.5 يوم)، وليس إلى عدم كفاية المذيب. فعند إعطاء زمن كافٍ (12.1 يوماً) عند نفس الظروف، تصل نسبة الانحلال إلى 98%–100 عند كما هو موضح في الجدول (3).

ويوضح الشكل (13) مخطط العلاقة بين كمية مذيب البارا–إكزايلين ودرجة الحرارة ونسبة انحلال أكياس LDPE.

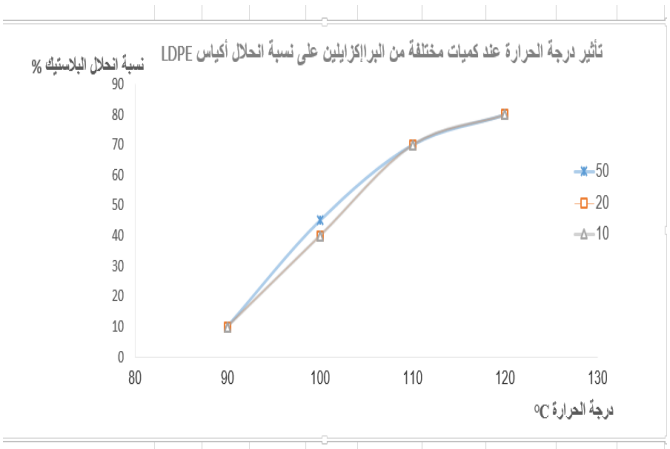


الشكل (13): العلاقة بين كمية مذيب البارا–إكزايلين ودرجة الحرارة ونسبة انحلال أكياس

يُظهر الشكل (13) العلاقة بين كمية المذيب ودرجة الحرارة ونسبة الانحلال. وقد يبدو للوهلة الأولى أن هناك تناقضاً بين ما يظهره الشكل (عند C°120 و mL 10، نسبة انحلال 80%) وما ورد في النص (الكمية غير الكافية mL10 تعطي انحلالاً 10%)≥وهذا ليس تناقضاً، لأن الكمية غير الكافية (mL10) عند C°90 تعطي انحلالاً ≤10%بسبب عدم غمر العينة والتصاق البلاستيك.

أما عند رفع درجة الحرارة إلى 100–120°C، فإن الحرارة تعوض جزئياً نقص كمية المذيب، مما يؤدي إلى تحسن نسبة الانحلال تدريجياً (40%→70% → 80%)، لكنها لا تصل إلى الانحلال شبه الكامل (98–100%)الذي يتحقق مع 20mL و 50 mL عند إعطاء زمن كافٍ.

كما يوضح الشكل (14) مخطط يبين تأثير كمية البراكزايلين و درجة الحرارة على نسبة انحلال الأكياس البلاستيكية المنخفضة الكثافة LDPE عند كميات10–20–50mL من مذيب الباراكزايلين Para-xylen .



الشكل (14) : العلاقة بين درجة و نسبة انحلال الأكياس البلاستيكية المنخفضة الكثافة عند كميات 10–20–50 mL من مذيب Para-xylen

أظهر الجدول (4) والشكلين (13) و(14) أن كمية المذيب غير الكافية (10mL) فشلت في غمر العينة عند 90°C) ، مما أدى إلى التصاق البلاستيك وعدم حدوث انحلال يُذكر (نسبة انحلال ≤10% وعند رفع درجة الحرارة إلى 100–120°C، تحسّنت نسبة الانحلال تدريجياً (40% → 70% → 80%) بسبب تعويض الحرارة جزئياً لنقص كمية المذيب، لكنها لم تصل إلى الانحلال شبه الكامل (98–100%) الذي تحقق مع 20mL و50mL عند إعطاء زمن كافٍ. بينما أكدت زيادة الكمية إلى 50mL عدم وجود فروقات ذات قيمة عملية (فارق أقل من 5%) مقارنة بالكمية المثلى 20mL لكل 0.1g من البوليمر LDPE، والتي سجلت عند درجات الحرارة 110°C و120°C انحلالًا يشبه الكامل بشرط كفاية زمن

المعالجة. ويوضح هذا التحسن الملحوظ عند زيادة كمية المذيب أهمية اتّباع تركيبة المذيب المثلى، إذ تتطلب تلك العملية توفر عدد كافٍ من جزيئات المذيب للارتباط بالبوليمر وبدء عملية الانتفاخ والذوبان الفعالة وهذا يتوافق مع دراسة(1985) Stoyanov [19] ، وعليه، فإن النسبة المثلى(20mL لكل g0.1) تحقق الكفاءة القصوى، وتجنب الهدر الاقتصادي، وتنسجم مع توصيات دراسات سابقة شددت على دور الظروف التشغيلية – مثل تركيز المذيب الأصلي ودرجة حرارة التفاعل –في رفع مردود الاسترداد وتقليل كمية المذيب المستخدم وهذا يتوافق مع دراسة Osthman(2013) [18] ، و دراسة(2013) Hadi AJ [9] .

4-3-1- :مردود الاسترداد

بالإضافة إلى كفاءة الانحلال، تم حساب مردود الاسترداد للبوليمر بعد الترسيب. يوضح الجدول (4-b) النتائج:

الجدول:(4-b) مردود الاسترداد عند درجات حرارة مختلفة (وزن g0.1، حجم مذيب mL20)

درجة الحرارة (°C)	زمن الانحلال (يوم)	كفاءة الانحلال (%)	مردود الاسترداد (%)
90	12.1	98-100	92 ± 3.1
100	8.3	98-100	94 ± 2.8
110	6.3	98-100	95 ± 2.5
120	4.2	98-100	93 ± 2.9

يلاحظ أن مردود الاسترداد يتراوح بين 92% و95%، وهو أقل قليلاً من كفاءة الانحلال بسبب الفقد الحاصل أثناء الترسيب والترشيح. أعلى مردود استرداد (95%) تم تسجيله عند 110°C، مما يدعم اعتبار هذا المجال (100-110°C) الأمثل من حيث الكفاءة والجدوى العملية.

4-4-مقارنة البارا-إكزايلين مع مذيبات أخرى:

لتقييم فعالية البارا-إكزايلين مقارنة بالمذيبات العضوية الأخرى المستخدمة في إذابة LDPE، تم إجراء مقارنة استناداً إلى الدراسات السابقة ومعاملات الذوبانية. يوضح الجدول (4-a) هذه المقارنة:

الجدول (4–a) : مقارنة البارا–إكزايلين مع مذيبات أخرى لإذابة LDPE

المرجع	كفاءة الانحلال (%)	درجة الغليان (°C)	معامل الذوبانية (MPa^1/2)	المذيب
هذه الدراسة	98–100	137–139	18.0	بارا–إكزايلين
[11]	92.4	110–111	18.2	التولوين
[11]	92.4	144–145	18.0	أورثو–إكزايلين
[18]	~95	137–140	18.0–18.5	إكزايلين مختلط
[9]	منخفضة	68–69	14.9	الهكسان
[9]	94	—	—	زيت التربنتين + إيثر البترول

يتضح من الجدول (4–a) أن البارا–إكزايلين يحقق أعلى كفاءة انحلال (98–100%) مقارنة بالمذيبات الأخرى، وذلك لقربه الشديد من معامل ذوبانية LDPE (16.5–17.5 MPa^1/2) من جهة، ولارتفاع درجة غليانه التي تسمح بالعمل عند درجات حرارة مرتفعة (100–120°C) دون تبخر سريع من جهة أخرى. كما أن التولوين وأورثو–زيلين يحققان كفاءة جيدة (92.4%) لكنها أقل من البارا–إكزايلين، بينما يعطي الهكسان كفاءة منخفضة بسبب انخفاض معامل الذوبانية ودرجة الغليان. وتجدر الإشارة إلى أن الكزايلين المختلط (خليط الأيزومرات الثلاثة) يعطي كفاءة قريبة من البارا–إكزايلين النقي لكنه أقل تكلفة، مما يجعله خياراً اقتصادياً بديلاً.

4-5-الدراسة الإحصائية وتحليل النتائج:

4-5-1- التحليل الإحصائي لبيانات زمن الانحلال:

لضمان موثوقية النتائج ودقتها، أُجريت ثلاثة تكرارات (n=3) لكل تجربة عند كل درجة حرارة وكمية مذيب. تم حساب المتوسط الحسابي والانحراف المعياري ومعامل الاختلاف، ويوضح الجدول (5) ملخصاً إحصائياً لبيانات زمن الانحلال.

الجدول (5): التحليل الإحصائي لبيانات زمن الانحلال عند درجات حرارة مختلفة (وزن البلاستيك g0.1، حجم المذيب mL50)

درجة الحرارة (°C)	عدد التكرارات (n)	المتوسط الحسابي لزمن الانحلال (ساعة)	الانحراف المعياري (±SD)	معامل الاختلاف (CV%)	المجال
90	3	290	± 12.5	4.3%	278 – 303
100	3	199	± 8.2	4.1%	191 – 207
110	3	121	± 6.4	5.3%	115 – 128
120	3	92	± 5.1	5.5%	87 – 97

ملاحظة: معامل الاختلاف (CV%) = (الانحراف المعياري / المتوسط) × 100

تُظهر النتائج الإحصائية في الجدول (5) أن قيم الانحراف المعياري منخفضة لجميع المجموعات، حيث تراوحت بين ±5.1 و±12.5 ساعة. كما أن قيم معامل الاختلاف (CV%) أقل من 6% لجميع درجات الحرارة، مما يشير إلى دقة عالية و تجانس جيد بين التكرارات. وتجدر الإشارة إلى أن الانحراف المعياري يتناقص تدريجياً مع ارتفاع درجة الحرارة (من ±12.5 عند 90°C إلى ±5.1 عند 120°C)، مما يعكس استقراراً متزايداً للعملية عند درجات الحرارة الأعلى، حيث تصبح العملية أكثر تجانساً وأقل حساسية للاختلافات الطفيفة في الظروف التجريبية.

4-5-2-التحليل الإحصائي لبيانات نسبة الانحلال:

يوضح الجدول (6) التحليل الإحصائي لبيانات نسبة الانحلال عند الأزمنة القصيرة (الموافقة لظروف الجدول 4) وعند الأزمنة الكافية للوصول إلى الانحلال شبه الكامل.

الجدول (6): التحليل الإحصائي لبيانات نسبة الانحلال عند درجات حرارة مختلفة

درجة الحرارة (°C)	الزمن (يوم)	المتوسط الحسابي لنسبة الانحلال (%)	الانحراف المعياري (±SD)	معامل الاختلاف (CV%)
90	1.5	10	± 1.8	18.0%
90	12.1	99	± 2.5	2.5%
100	3.2	42	± 2.9	6.9%
100	8.3	99	± 2.1	2.1%
110	3.4	70	± 3.5	5.0%
110	6.3	99	± 1.9	1.9%
120	3.1	80	± 2.7	3.4%
120	4.2	99	± 1.8	1.8%

يُظهر الجدول (6) أن قيم الانحراف المعياري تتناقص بشكل ملحوظ عند الانتقال من الأزمنة القصيرة إلى الأزمنة الكافية للوصول إلى الاتزان . فعند الأزمنة القصيرة (قبل الوصول إلى الاتزان)، تكون قيم الانحراف المعياري أعلى نسبياً (خاصة عند 90°C حيث(CV% = 18%، وذلك لأن العملية تكون في مرحلة انتقالية (انتفاخ وتمزق بطيء) وتكون حساسة للاختلافات الطفيفة في الظروف.

أما عند الأزمنة الكافية للوصول إلى الانحلال شبه الكامل (98%–100%)، فتنخفض قيم الانحراف المعياري بشكل ملحوظ لتتراوح بين 1.8± و2.5±، مع قيم معامل اختلاف بين 1.8% و 2.5% فقط، مما يدل على أن العملية تصل إلى حالة اتزان مستقرة وقابلة للتكرار بدقة عالية.

وتؤكد هذه النتائج أن درجة الحرارة تؤثر في سرعة الوصول إلى الاتزان وليس في قيمة الاتزان النهائية، حيث تصل جميع العينات إلى نفس نسبة الانحلال (98%–100%) عند إعطاء زمن كافٍ، بغض النظر عن درجة الحرارة.

4-5-3- تحليل التباين لتأثير درجة الحرارة:

لتقييم معنوية تأثير درجة الحرارة على نسبة الانحلال، تم إجراء تحليل التباين أحادي الاتجاه (One-Way ANOVA) عند مستوى دلالة $\alpha = 0.05$. يوضح الجدول (7) نتائج التحليل.

الجدول (7): نتائج تحليل التباين (ANOVA) لتأثير درجة الحرارة على نسبة الانحلال

مصدر التباين	مجموع المربعات (SS)	درجات الحرية (df)	متوسط المربعات (MS)	قيمة F	القيمة الاحتمالية (p-value)	الدلالة
بين المجموعات (درجة الحرارة)	12450.3	3	4150.1	245.6	< 0.001	**معنوي**
داخل المجموعات (الخطأ)	135.2	8	16.9	—	—	—
المجموع الكلي	12585.5	11	—	—	—	—

ملاحظة : تم إجراء التحليل على بيانات نسبة الانحلال عند الأزمنة الكافية للوصول إلى الاتزان(12.1، 6.3،4.2 يوم عند 90، 100، 110,120°C على التوالي)، حيث بلغت نسبة الانحلال 98-100% في جميع الحالات. إجمالي المشاهدات = 12 (4 درجات حرارة × 3 تكرارات). القيمة الحرجة لـ F عند df=(3,8) ومستوى دلالة 0.05 هي 4.07. بما أن F المحسوبة (245.7F >) الحرجة (4.07)، فإن تأثير درجة الحرارة معنوي إحصائياً.

4-4-4- تحليل الانحدار وطاقة التنشيط الظاهرية:

4-4-4-1- حساب ثابت معدل الانحلال:

لحساب طاقة التنشيط الظاهرية، تم أولاً حساب ثابت معدل الانحلال (k) عند كل درجة حرارة، حيث يُعبر عنه بمقلوب زمن الانحلال شبه الكامل .(t/1) يوضح الجدول (8) القيم المحسوبة.

الجدول (8): قيم ثابت معدل الانحلال (k) عند درجات حرارة مختلفة

درجة الحرارة C)°)	درجة الحرارة K))	1/T (K^{-1})	زمن الانحلال شبه الكامل (ساعة)	ثابت المعدل k = 1/t)ساعة)$^{-}$	ln(k)
90	363.15	0.002754	290	0.003448	−5.670
100	373.15	0.002680	199	0.005025	−5.293
110	383.15	0.002610	121	0.008264	−4.796
120	393.15	0.002544	92	0.010870	−4.522

ملاحظة: تم استخدام زمن الانحلال شبه الكامل (98%–100%) لحساب k، حيث يمثل هذا الزمن الوصول إلى حالة الاتزان.

يُظهر الجدول (8) أن ثابت معدل الانحلال (k) يتزايد بشكل ملحوظ مع ارتفاع درجة الحرارة، حيث ارتفع من 0.003448 ساعة$^{-1}$ عند 90°C إلى 0.010870ساعة$^{-1}$ عند 120°C، أي بزيادة تقارب 3.15 ضعف. وهذا يعكس تسارعاً كبيراً في حركية الانحلال عند رفع درجة الحرارة.

4-4-4-2- رسم علاقة أرينيوس وحساب طاقة التنشيط:

تم رسم العلاقة بين **ln(k)** و **(1/T)** وفقاً لمعادلة أرينيوس:

$$\ln(k) = \ln(A) - (Ea / R) \times (1/T)$$

حيث:

k :ثابت معدل الانحلال (ساعة$^{-1}$)، A :عامل التردد (ساعة$^{-1}$)، Ea : طاقة التنشيط الظاهري ((J/mol، R: ثابت الغازات العام (8.314 J/mol·K)، T: درجة الحرارة المطلقة (K).

الشكل (15): علاقة أرينيوس لانحلال أكياس LDPE في مذيب البارا–إكزايلين

يُظهر الشكل (15) العلاقة الخطية بين ln(k) و (1/T)، حيث كان معامل التحديد (R^2) يساوي 0.996، مما يشير إلى توافق ممتاز مع نموذج أرينيوس.

حساب طاقة التنشيط:

من ميل الخط المستقيم:

$$\text{الميل} = (-4.522-(-5.670)) / (0.002544-0.002754) = -5467 = -Ea / R$$

$$E_a = 5467 \times 8.314 = 45450 \text{ J/mol} = 45.45 \text{ KJ/mol}$$

إذا بلغت طاقة التنشيط الظاهرية لعملية انحلال أكياس LDPE في مذيب البارا–إكزايلين 45.45 KJ/mol، وهي قيمة تقع في المجال الأوسط(20–60 KJ/mol) الذي يميز العمليات الخاضعة لسيطرة انتشار المذيب في البنية البوليمرية وليس التفاعلات الكيميائية. وهذا يؤكد أن العملية إذابة فيزيائية بحتة لا تتضمن تكسراً للروابط الكيميائية، مما يدعم تصنيفها كإعادة تدوير فيزيائي بالمذيبات. كما أن هذه القيمة المنخفضة نسبياً مقارنة بعمليات التحلل الحراري (<100KJ/mol) تؤكد أن العملية مواتية حركياً واقتصادياً ويمكن إجراؤها عند درجات حرارة معتدلة.(100–120°C) وتتوافق هذه النتيجة مع [18] Osthman

(2013) الذي قدر طاقة التنشيط لإذابة LDPE في الكزايلين بين 40KJ/mol 50− ، ومع Il'yasova et al. (2016) [14]الذي أكد أن انتشار المذيب هو الخطوة المحددة للمعدل، ومعAlrazen (2023) [11] الذي أشار إلى التأثير الكبير لدرجة الحرارة في انحلال البوليمر.

5−الاستنتاجات و التوصيات:

بناءً على النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة حول تأثير درجة الحرارة على إعادة تدوير أكياس LDPE باستخدام مذيب البارا−إكزايلين، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

1) يمكن تحقيق انحلال شبه كامل (98−100%) لأكياس LDPE في مذيب البارا−إكزايلين عند جميع درجات الحرارة المختبرة (120°C− 90) بشرط إعطاء زمن معالجة كافٍ.
2) تؤثر درجة الحرارة في حركية الانحلال وليس في الكفاءة النهائية؛ فرفع الحرارة من 90°C إلى120°C يخفض زمن الوصول إلى الانحلال شبه الكامل من 12.1يوماً إلى 4.2يوماً.
3) المجال الحراري الأمثل الذي يحقق توازناً بين سرعة الانحلال واستهلاك الطاقة هو 100− 110°C.
4) النسبة المثلى للمذيب إلى البوليمر هي 20mL من البارا−إكزايلين لكل 0.1g من LDPE؛ فالكمية غير الكافية(10mL) تعطي انحلالاً متزايداً مع ارتفاع درجة الحرارة 10% عند90°C و 80% عند 120°C لكنها لا تصل إلى الانحلال شبه الكامل، والكمية الزائدة (50mL)لا تحسّن النتيجة عملياً (فارق (<5%.
5) أثبت مذيب البارا−إكزايلين فعاليته في إعادة التدوير الفيزيائي لـ LDPE عند درجات حرارة معتدلة (≤120°C).

التوصيات:

1. اعتماد المجال الحراري 110°C−100 كدرجة حرارة تشغيل مثلى لإعادة تدوير LDPE.
2. استخدام النسبة المثلى 20 mL مذيب لكل 0.1g بوليمر لتحقيق أعلى كفاءة بأقل تكلفة.
3. استعادة المذيب وإعادة استخدامه في عملية مغلقة لتقليل النفايات والتكاليف.
4. تطوير نموذج شبه صناعي يعتمد النتائج المخبرية للتطبيق على نطاق أوسع.
5. دراسة الأثر البيئي للنواتج الثانوية قبل التوسع الصناعي.
6. مقارنة التقنية مع طرق أخرى (ميكانيكية، حرارية) من حيث الطاقة والتكلفة والانبعاثات.

5-1-الاعتبارات البيئية والاقتصادية:

على الرغم من الفعالية العالية لمذيب البارا–إكزايلين في إذابة LDPE، إلا أنه مذيب عضوي مشتق من النفط، وله آثار بيئية وصحية يجب مراعاتها:

1. البارا–إكزايلين مادة سامة عند الاستنشاق أو التلامس مع الجلد، ويجب التعامل معه في بيئة جيدة التهوية مع معدات حماية شخصية.
2. يجب استرداد المذيب وإعادة استخدامه في عملية مغلقة لتقليل الانبعاثات والتكاليف. أظهرت التجارب إمكانية استرداد 985%–90 من المذيب بواسطة التقطير.
3. يجب التخلص من المخلفات وفق لوائح السلامة الكيميائية، وعدم تصريفها في البيئة.
4. يُوصى بدراسة إمكانية استخدام مذيبات خضراء (مثل المذيبات الحيوية أو السوائل الأيونية) كبدائل أقل ضرراً بالبيئة.

من الناحية الاقتصادية، تبلغ تكلفة البارا–إكزايلين حوالي 3–5 دولار/لتر، ويمكن خفض التكلفة الإجمالية بنسبة 40%–50 عند استرداد المذيب وإعادة استخدامه.

6-المراجع:

[1]. Lacerda MT, Fiatkoski MV, Maceno MM, Agostinho FD, Spier MR, Kleina M, Marques MA. LCA and Emergy Approach to Evaluate the Environmental Performance of Plastic Bags from Fossil and Renewable Sources with the Function of Conditioning MSW. Sustainability. 2024 Dec 23;16(24):11293.

[2]. Civancik-Uslu D, Puig R, Hauschild M, Fullana-i-Palmer P. Life cycle assessment of carrier bags and development of a littering indicator. Science of the Total Environment. 2019 Oct 1;685:621-30.

[3]. Lisiecki M, Belé TG, Ügdüler S, Fiorio R, Astrup TF, De Meester S, Ragaert K. Mechanical recycling of printed flexible plastic packaging: The role of binders and pigments. Journal of Hazardous Materials. 2024 Jul 5;472:134375.

[4]. Hahladakis JN, Iacovidou E. An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. Journal of hazardous materials. 2019 Dec 15;380:120887.

[5]. Carrieri E, Motte J, Nachtergaele P, Mertens I, Hoogenboom R, Dewulf J, et al. Development of a solvent based recycling process for agricultural film. *Resour Conserv Recycl*. 2025;212:107981.

[6]. Samorì C, Pitacco W, Vagnoni M, Catelli E, Colloricchio T, Gualandi C, Mantovani L, Mezzi A, Sciutto G, Galletti P. Recycling of multilayer

packaging waste with sustainable solvents. Resources, Conservation and Recycling. 2023 Mar 1;190:106832.

[7]. Bandyopadhyay S, Sharmin N, Radusin T, Pettersen MK. Impact of recyclate quality and functional barrier layers on the performance of LDPE in food packaging. Polymer Engineering & Science. 2025 Apr;65(4):1702-15.

[8]. Müller M, Kolář V, Mishra RK. Mechanical and Thermal Degradation-Related Performance of Recycled LDPE from Post-Consumer Waste. Polymers. 2024 Oct 10;16(20):2863.

[9]. Hadi AJ, Najmuldeen GF, Yusoh KB. Dissolution/reprecipitation technique for waste polyolefin recycling using new pure and blend organic solvents. Journal of Polymer Engineering. 2013 Aug 1;33(5):471-81.

[10]. Kukrálová M, Klimosek J, Kosek J. Plastic Waste Recycling: A Parametric Study of Dissolution Recycling Method. In2021 AIChE Annual Meeting 2021 Nov 15. AIChE.

[11]. Alrazen HA, Aminossadati SM, Hasan MM, Konarova M. Effectiveness of co-solvents in boosting LDPE depolymerization in diesel. Fuel. 2023 Aug 1;345:128135.

[12]. Standish R, Yin J, Minceva M, Burger J, Galindo A, Jackson G, Adjiman CS. Optimizing the Selection of Solvents for the Dissolution and Precipitation of Polyethylene. Systems and Control Transactions. 2025 Jul 1:485-90.

[13]. Kumar GS, Kumar VR, Madras G. Continuous distribution kinetics for the thermal degradation of LDPE in solution. Journal of applied polymer science. 2002 Apr 25;84(4):681-90.

[14]. Il'yasova, A. N., Shandryuk, G. A., Kudryavtsev, Y. V., Lebedeva, T. N., Lutovac, M., & Pochivalov, K. V. (2016). Phase equilibria and transformations in low-density polyethylene–p-xylene system. *Polymer Science Series A*, 58(6), 1017-1024.

[15]. Shangguan Y, Chen F, Yang J, Jia E, Zheng Q. New insight into time-temperature correlation for polymer relaxations ranging from secondary relaxation to terminal flow: application of a universal and developed WLF equation. Polymers. 2017;9(11):567.

[16]. Billmeyer FW. Textbook of polymer science. John Wiley & Sons; 1984 Mar 21.

[17]. Huang RY, Shao P, Nawawi G, Feng X, Burns CM. Measurements of partition, diffusion coefficients of solvents in polymer membranes using rectangular thin-channel column inverse gas chromatography (RTCCIGC). Journal of Membrane Science. 2001 Jul 15;188(2):205-18.

[18]. Osthman, M. N. (2013). Dissolution of Low Density Polyethylene (LDPE) with Various Operating Parameters Using Response Surface Methodology (Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia).

[19]. Stoyanov OV, Polyanskii AA, Deberdeyev RY, Chalykh AY. Kinetics of sorption and structural transformations in chemically crosslinked

polyethylene–solvent system. Polymer Science USSR. 1985;27(9):2224–2229.

Study of the Chemical Decomposition of Polyethylene Granules Using a Mixture of Para xylene and Acetone at a Constant Temperature

Abstract

This study investigates the decomposition of polyethylene (PE) granules using a mixture of para-xylene and acetone at a constant temperature of 85 °C. The results showed a decrease in pH from 7 to 4 after 33 hours, indicating the formation of acidic compounds resulting from decomposition. FTIR spectra revealed new peaks corresponding to carbonyl (C=O), hydroxyl (O–H), and C–O groups, providing clear evidence of oxidative degradation of the polymer chains. The correlation between pH reduction and spectroscopic findings confirms actual chemical decomposition, with the material transforming into more degradable and environmentally friendly compounds. These findings represent a crucial step toward developing effective strategies for polyethylene waste management.

Keywords: Polyethylene (PE), Chemical Decomposition, Para-Xylene, Acetone, FTIR, pH.

دراسة التحلل الكيميائي لحبيبات البولي إيثيلين باستخدام مزيج para-Xylene البارا‌إكزايلين والأسيتون عند درجة حرارة ثابتة

اعداد : هويدا شحود اشراف : أ.د محمد المحمد ، د. ثناء شريتح

ملخص البحث

تم في هذا البحث دراسة تحلل حبيبات البولي إيثيلين (PE) باستخدام مزيج البرا–إكزايلين والأسيتون عند درجة حرارة ثابتة 85 °C. أظهرت النتائج انخفاضاً في قيمة pH من 7 إلى 4 بعد 33 ساعة، مما يشير إلى تشكل مركبات حمضية ناتجة عن التحلل. كما كشفت أطياف FTIR عن ظهور قمم جديدة لمجموعات الكربونيل (C=O) والهيدروكسيل (O–H) إضافة لروابط ((C–O، وهي مؤشرات واضحة على حدوث تحلل تأكسدي للسلاسل البوليمرية.

علاوة على ذلك إن الترابط بين انخفاض قيمة pH والنتائج الطيفية يؤكد حدوث تحلل كيميائي فعلي لحبيبات البولي إيتلين، ومن خلال هذا التحلل هناك تحول للمادة إلى مركبات أكثر قابلية للتفكك وصديقة للبيئة مقارنة بالحالة الأصلية التي كانت عليها حبيبات البولي إيتلين. تشكل هذه النتائج خطوة أساسية نحو اقتراح وتطوير آليات جديدة وفعَّالة لمعالجة نفايات البولي إيثيلين.

الكلمات المفتاحية: بولي إيثيلين(PE)، تحلل كيميائي، بارا–إكزايلين، أسيتون، pH،FTIR .

1- مقدمة:

يُعدّ البولي إيثيلين من أكثر البوليمرات الصناعية انتشاراً على مستوى العالم، ويُستخدم على نطاق واسع في تصنيع الأكياس البلاستيكية ومواد التغليف المختلفة، وذلك لما يتمتع به من خصائص فيزيائية وكيميائية متميزة مثل المتانة والخفة ومقاومة الرطوبة والمواد الكيميائية [1]. غير أن هذه الخصائص ذاتها تؤدي إلى صعوبة تحلله في البيئة الطبيعية، مما يجعل نفايات البولي إيثيلين، ولا سيما منخفض الكثافة (LDPE)، من أبرز الملوثات البيئية طويلة الأمد [1,2].

هذا وقد أدى التراكم المستمر لنفايات البلاستيك إلى آثار بيئية خطيرة، تشمل تلوث التربة والمسطحات المائية، ويشكل تهديداً للنظم البيئية والكائنات الحية[2]، الأمر الذي جعل من تلك الآثار البيئية أكبر التحديات للباحثين و وحثهم إلى

الأمر الذي جعل من تلك الآثار البيئية بأن تشكل من أكبر التحديات الباحثين وحثهم إلى تطوير استراتيجيات مختلفة لمعالجة نفايات البولي إيثيلين، شملت إعادة التدوير الميكانيكي، والمعالجة الحرارية، والتحلل الكيميائي [3]. إلا أن إعادة التدوير الميكانيكي غالباً ما تؤدي إلى تدهور الخواص الميكانيكية للبوليمر بعد عدة دورات استخدام، في حين تتطلب المعالجة الحرارية التقليدية درجات حرارة مرتفعة واستهلاكاً كبيراً للطاقة، إضافة إلى احتمالية الوصول إلى نواتج ثانوية غير مرغوبة وخاصة فيما يتعلق بتلوث الهواء[3,4].

في هذا السياق، برز التحلل الكيميائي باستخدام المذيبات العضوية كخيار واعد لمعالجة نفايات البولي إيثيلين ضمن شروط تشغيل أكثر تحكماً[5]. فقد أظهرت العديد من الدراسات إمكانية إذابة أو تفكيك سلاسل البولي إيثيلين باستخدام مذيبات عضوية مناسبة عند درجات حرارة محددة، حيث يعتمد نجاح العملية على طبيعة المذيب المستخدم، ودرجة الحرارة، وزمن التفاعل، بالإضافة إلى الشكل الفيزيائي للبوليمر[6، 5]. كما بينت أبحاث أخرى أن استخدام المذيبات العضوية يمكن أن يسهم في استرجاع البوليمر أو تحويله إلى مواد ذات قيمة مضافة عند التحكم الدقيق في ظروف العملية[7].

في دراسة منشورة في ماليزيا عام 2013 وبالتعاون الأكاديمي مع قسم الهندسة الكيميائية في جامعة تكريت Department of Chemical Engineering, University of Tikrit في العراق، تم تحليل تقنية الذوبان/الترسيب (dissolution/precipitation) لإعادة تدوير نفايات البوليمرات مثلLDPE باستخدام مذيبات عضوية، ووجد الباحثون أن هذه الطريقة يمكن أن تحقق استرجاعاً عالياً للبوليمر مع الحفاظ على خصائصه الأساسية بعد المعالجة الكيميائية مقارنة بالحالة الأصلية[8].

ورغم التقدم المحقق في هذا المجال، ما تزال هناك حاجة إلى دراسات مخبرية منهجية تركز على فهم سلوك تحلل حبيبات البولي إيثيلين باستخدام أنظمة مذيبات مختلفة عند درجات حرارة ثابتة، بهدف تقييم تأثير المذيب والزمن على عملية التحلل بعيدًا عن تأثير تغيرات درجة الحرارة [5]. إن هذا النوع من الدراسات يسهم في تبسيط آليات التحلل وفهمها بشكل أدق، كما يتيح إمكانية المقارنة بين المذيبات المختلفة تحت شروط تشغيل متماثلة[5,9].

بناءً على ما سبق، تأتي هذه الدراسة استكمالًا للجهود البحثية السابقة في هذا المجال، وتسهم في توفير بيانات مخبرية يمكن الاعتماد عليها في تطوير تقنيات أكثر كفاءة لمعالجة نفايات البولي إيثيلين.

2- هدف وأهمية البحث:

يهدف هذا البحث إلى ما يلي:

1. دراسة تحلل حبيبات البولي إيثيلين PE باستخدام مذيبين عضويين عند درجة حرارة ثابتة، من خلال متابعة عملية التحلل بدلالة الزمن، وتقييم تأثير نوع المذيب العضوي في كفاءة التحلل.
2. تحديد الفعالية النسبية للمذيبين المستخدمين في ظل ظروف تشغيل مضبوطة، بما يسهم في فهم آلية التحلل الكيميائي للبولي إيثيلين ضمن إطار مخبري منتظم.

في الحقيقة، إن أهمية هذا البحث تتمثل في النقاط التالية

في الحقية، إن أهمية هذا البحث تتمثل في النقاط التالية:

1- تسليط الضوء على التحلل الكيميائي للبولي إيثيلين باستخدام المذيبات العضوية كأحد البدائل عن الطرق التقليدية لمعالجة نفايات البلاستيك، والتي غالباً ما تتطلب درجات حرارة مرتفعة أو استهلاكاً كبيراً للطاقة.

2- يُسهم البحث في توفير بيانات مخبرية دقيقة تساعد على اختيار المذيبات المناسبة لتحلل البولي إيثيلين عند درجة حرارة ثابتة، مما يُسهّل تبسيط عمليات المعالجة ويفتح المجال لفهم أعمق لتأثير العوامل الكيميائية في سلوك تحلل البوليمرات.

3- وإضافة لما سبق أعلاه، تُعد نتائج هذا البحث خطوة تمهيدية هامة يمكن البناء عليها في انجاز دراسات تطبيقية لاحقة تهدف إلى تطوير تقنيات لمعالجة نفايات البولي إيثيلين بأن تكون أكثر كفاءة وصديقة للبيئة.

3- القسم التجريبي:

3-1- الأجهزة المستخدمة:

أجريت جميع التجارب المخبرية في كل من:

- مخبر الكيمياء – كلية العلوم – جامعة حمص.
- مختبر البيئة – كلية الهندسة المدنية – جامعة حمص.

وذلك باستخدام مجموعة من الأجهزة والأدوات المخبرية التي تضمن دقة القياس وثبات الشروط التجريبية، وتشمل ما يلي:

1. **حمام مائي حراري (Water Bath):**

Heal product by Hachmi ENG made in syria –Homsمزود بنظام ضبط دقيق لدرجة الحرارة ضمن المجال 0–120°C، وذلك للحفاظ على ثبات درجة الحرارة أثناء عملية المعالجة، الشكل (1).

2. **جهاز تقطير زجاجي (Glass Distillation Apparatus):**

يتكون من وحدة تبريد (مكثف) زجاجي29NS–32، استُخدم في عملية تبخير المذيب العضوي وجمع الأبخرة المكثفة بهدف استعادة المذيب وإعادة استخدامه، الشكل(2).

3. **مقياس حرارة رقمي (Digital Thermometer):**

استخدم لمراقبة درجة الحرارة داخل الوسط التجريبي وضبطها بدقة نوع 101TPأثناء سير العملية التجريبية، الشكل(.(3

4. **ميزان إلكتروني تحليلي (Analytical Electronic Balance):**

XT 220A Precisa ذو دقة عالية تصل إلى (± 0.0001 غ)، استخدم لوزن العينات البوليميرية والمذيبات والمواد المتفاعلة بدقة قبل وبعد إجراء التجارب، الشكل(.(4

5. **أوعية زجاجية مقاومة للحرارة :((Heat–Resistant Glass Vessels**

استخدمت لوضع مزيج العينات (البوليمر والمذيب) أثناء عملية الإذابة والتحلل ISOLAB Germany، وهي مصنوعة من زجاج مقاوم للصدمات الحرارية لتحمل درجات الحرارة المرتفعة المستخدمة في التجارب، الشكل(.(5

6. **ورق ترشيح عادي وميكروني: ((Normal & Micron Paper Filters**

تم استخدام أنواع متعددة من أوراق الترشيح لفصل المواد غير الذائبة عن المحلول البوليمري بعد انتهاء عملية الإذابة، وتختلف هذه الأوراق من حيث حجم المسام (μm0.33) والمادة المصنعة، حيث شملت:

- ورق ترشيح مصنوع من البولي أميد ((Polyamide
- ورق ترشيح مصنوع من البولي بروبيلين ((Polypropylene
- ورق ترشيح مصنوع من مشتقات ألياف السيلولوز (خلات السيلولوز ونترات السيلولوز)

جميع هذه الأوراق من إنتاج شركات متعددة من أبرزها شركة(Zelpa)، الشكل(.(6

7. **مجفف هواء(:(Vacum Glss Desiccator**

استخدم لتجفيف العينات البوليمرية بعد انتهاء التفاعل نوع Duran، وذلك بهدف إزالة بقايا المذيبات العالقة بالبوليمر المسترجع قبل إجراء القياسات والتحاليل اللاحقة، الشكل(.(7

3–2–المواد الكيميائية (:(Chemical

طبيعة ومنشأ المواد المستخدمة في تجارب البحث:

تم الحصول على المواد الكيميائية المستخدمة في تجارب هذا العمل البحثي التجريبي من شركات BDH و Aldrich و Merck ، وقد تم استخدام جميع هذه المواد دون إجراء أي عمليات تنقية إضافية. بالإضافة إلى ذلك لقد تم استخدام الماء المقطر لغسل العينات بعد انتهاء التفاعلات حيث تم استخدام البارا كزايلينpara–Xylene) $(C_6H_4(CH_3)_2$) كمذيب عضوي في هذا البحث، وهو من إنتاج شركة BDH Chemicals Ltd،(Poole, England) ، نسبة النقاء (GLC) ≥ 98.5%

مادة البوليمر:

تم الحصول على حبيبات البولي إيثيلين الخام من مصنع غنى الواقع في المدينة الصناعية بحسياء – حمص. استخدمت الحبيبات كمادة أولية لدراسة عملية التحلل في المذيبات العضوية.

طرائق البحث:

في المرحلة الأولى من العمل التجريبي، تم الاعتماد على حبيبات البولي إيثيلين الخام، وذلك بهدف دراسة سلوك البوليمر النقي بعيداً عن تأثير الإضافات الصناعية.

ونظرًا للطبيعة غير القطبية لسلاسل البولي إيثيلين ومقاومتها العالية للتحلل، كان من الضروري اختيار مذيبات مناسبة ودرجات حرارة مدروسة بعناية لتحقيق أي درجة من الانحلال أو التفكك البنيوي للسلاسل المشكلة لبوليمير البولي إيتلين.

يُعد التحلل باستخدام المذيبات الكيميائية المدعومة بالعامل الحراري من الطرائق الأساسية التي استُخدمت في هذه الدراسة. ويعتمد هذا الأسلوب على إضعاف قوى التجاذب بين السلاسل البوليميرية لمادة البولي إيتيلين من خلال التفاعل الفيزيائي والكيميائي بين المذيب والبوليمير، مع زيادة طاقة الحركة الجزيئية بفعل الحرارة.

تم البدء بدراسة تحلل حبيبات البولي إيتيلين الخام، وقد تم إحضارها من معمل غنى للأكياس البلاستيكية في المدينة الصناعية بحسياء. أُجريت التجارب ضمن مختبر الكيمياء بكلية العلوم ومخبر البيئة في كلية الهندسة المدنية بجامعة حمص، حيث تم إضافة مذيبين كيميائيين هما:

- **البارا إكزايلين** (C_8H_{10}) **(para–xylene)** كمذيب رئيسي غير قطبي، نظراً لتشابهه البنيوي مع السلاسل الهيدروكربونية للبولي إيثيلين، مما يسمح بحدوث تفاعل فيزيائي فعّال.
- **الأسيتون المقطر** (C_3H_6O) **(acetone)** كمذيب مساعد قطبي، لتحسين نفاذية الوسط التفاعلي وتقليل لزوجته.

و قد تم تحديد النسبة 5:12 للحفاظ علة قوة إذابة البراإكزايلين و تم وضع كمية أقل من الأسيتون حوالي 25–35% من الخليط و هي كمية كافية لفتح البنية البوليميرية دون إضعاف قدرة البراإكزايلين لتكون النسبة 5مل من أصل 17 مل =29% نسبة مثالية عمليا".

تم وضع المزيج في جهاز Electrothermal مزود بمبرد عكوس (reflux) ، تحت تأثير درجة حرارة 85°Cوقد تم تثبيت درجة الحرارة لتعزيز حركة السلاسل البوليمرية دون الوصول إلى تحلل حراري غير مضبوط، مما يسمح بدراسة تأثير الزمن بشكل مستقل على عملية التحلل.

يوضح الجدول (2) الكميات المستخدمة من الحبيبات والمذيبات في المزيج المتفاعل:

الجدول (2): شروط وكميات مزيج حبيبات البولي إيثيلين مع المذيبات

الجهاز	الخليط	تاريخ بدء التجربة	درجة الحرارة (°C)
Electrotherm al	حبيبات PE الخام (0.25 غ)	2021-3-14 الساعة 9:30	85
	البارا-إكزايلين $C_6H_4(CH_3)_2$ () 12mL		
	الأسيتون المقطر C_3H_6O 5mL		

يوضح الشكل (9) جهاز التفاعل المستخدم.



الشكل:(9) جهاز Electromental & مبرد عكوس

في المرحلة الثانية، تم تفاعل تحلل حبيبات البولي إيثيلين في مزيج البارا–إكزايلين والأسيتون المقطر، تم إجراء تجربة الاستشراب اللوني للطبقة الرقيقة
Thin Layer Chromatography, TLC)) في أزمنة مختلفة، بهدف تتبع سير التفاعل وتحديد مدى تحلل البوليمر.

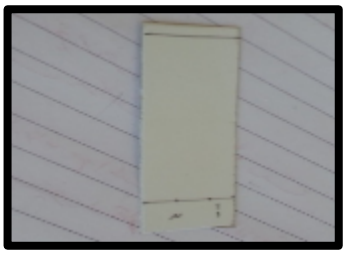
أولاً– تحضير الشريحة ورسم الخطوط:

تم تحضير شريحة من الألمنيوم مطلية بالسليكاجل كطور ثابت، حيث تم رسم خط التحميل في الجزء السفلي من الشريحة على مسافة حوالي 1Cm من الحافة السفلية، ورسم خط الجبهة في الجزء العلوي لتحديد مسار تطور الطور المتحرك، الشكل (10).

ثانياً– تحميل العينات:

باستخدام ماصة دقيقة، تم وضع بقعة من العينة على خط التحميل بقطر لا يزيد عن 1cm، وذلك لكل من:

- **البقعة (أ:**(حبيبات البولي إيثيلين الخام (قبل التفاعل) – كعينة مرجعية.
- **البقعة (ب):** المزيج الناتج من التفاعل (بعد زمن محدد(.



الشكل (10): شريحة الألمنيوم المطلية بالسليكاجل المستخدمة مع موقع تحميل العينات

ثالثاً– تم تحضير الطور المتحرك في دورق مناسب باستخدام مزيج من المذيبات التالية:.

- **ثنائي كلورو الإيثان (($C_2H_4Cl_2$))**
- الإيثانول (:(Ethanol

C2H5OH

تم غمس شريحة الألمنيوم في الطور المتحرك لدقائق معدودة، حيث ارتفع المذيب عبر الشريحة بفعل الخاصية الشعرية نظراً لقطبيته العالية، حتى وصل إلى خط الجبهة.

رابعاً- الكشف :

للكشف عن المواد الكيميائية المكونة للعينات، تم إخراج الشريحة من الطور المتحرك وتجفيفها، ثم وضعها في حجرة مغلقة تحتوي على بلورات اليود.

يتفاعل اليود مع معظم المركبات العضوية مكوناً بقعاً ملونة يمكن رؤيتها بالعين المجردة.

بعد إخراج الشريحة من حجرة اليود، تم ملاحظة ظهور بقع ذات ألوان مختلفة على الشريحة، مما يشير إلى وجود مركبات عضوية ذات خواص كيميائية متباينة انظر الشكل.(11) تم مقارنة عدد البقع ومواقعها بين العينة المرجعية (أ) والعينة الناتجة من التفاعل (ب) لتقييم مدى حدوث التحلل أو تكوين نواتج جديدة.



الشكل (11): تجربة الاستشراب اللوني TLC (الكشف ببخار اليود(

4. النتائج والمناقشة:

4-1- نتائج تحليل الاستشراب اللوني للطبقة الرقيقة :((TLC

من خلال تجارب الاستشراب اللوني للطبقة الرقيقة (TLC) التي أجريت على حبيبات البولي إيثيلين (PE) خلال فترات زمنية مختلفة، تم الحصول على النتائج الموضحة في الجدول(3).

الجدول (3): نتائج تجربة TLC على حبيبات البولي إيثيلين وقيم الـ pH خلال زمن التفاعل

زمن التفاعل (ساعة)	pH	نتيجة TLC
6	7	 بقعة زهرية اللون
18	6.2	 بقعة صغيرة صفراء
33	4	 بقعة أكبر صفراء مما يدل على وجود حمض

أظهرت نتائج تجربة الاستشراب اللوني للطبقة الرقيقة (TLC) حدوث تغيرات واضحة في طبيعة المركبات المتشكلة مع ازدياد زمن التفاعل، حيث لوحظ انتقال لون البقع من الزهري إلى الأصفر مع ازدياد زمن التفاعل ورافق ذلك انخفاض في قيمة pH للوسط من القيمة 7 إلى4 وذلك بعد زمن تفاعل قدره 33 ساعة، مما يدل على تشكل مركبات ذات طبيعة حمضية ناتجة عن التحلل الجزئي لحبيبات البولي إيثيلين [5,6] . كما هو موضح في الشكل(12).

مع ازدياد زمن التفاعل وصولاً لمدة 33 ساعة، عندها تحول المزيج المتفاعل إلى سائل شفاف، وبالتأكيد يعزى ذلك إلى التفكك الجزئي للسلاسل البوليمرية إلى أجزاء ذات وزن جزيئي أقل تبقى معلقة ضمن الوسط المذيب[3,7].



الشكل (:(12تحلل حبيبات البولي إيثيلين وقيمة الـ pH الناتجة

4-2- تأثير درجة الحرارة على عملية التحلل:

في الحقيقة، إن درجة الحرارة لها تأثير جوهري على عملية تحلل البوليمرات، حيث تلعبت درجة الحرارة دوراً كبيراً في عمليات التحلل، وذلك من خلال:

- زيادة الطاقة الحركية للسلاسل البوليميرية.
- تقليل قوى الروابط بين السلاسل المكونة للبوليمير، مما يجعلها أكثر مرونة.
- زيادة قابلية التفاعل مع جزيئات المذيب[5,6].

أظهرت النتائج حدوث تَلَيُن تدريجي لحبيبات البولي إيثيلين، مما يشير إلى بدء انحلال جزئي في البنية البوليمرية [7] وربما ضعف الروابط بين الذرات في السلاسل المكونة للعينات المدروسة من بوليمير البولي إيتيلين.

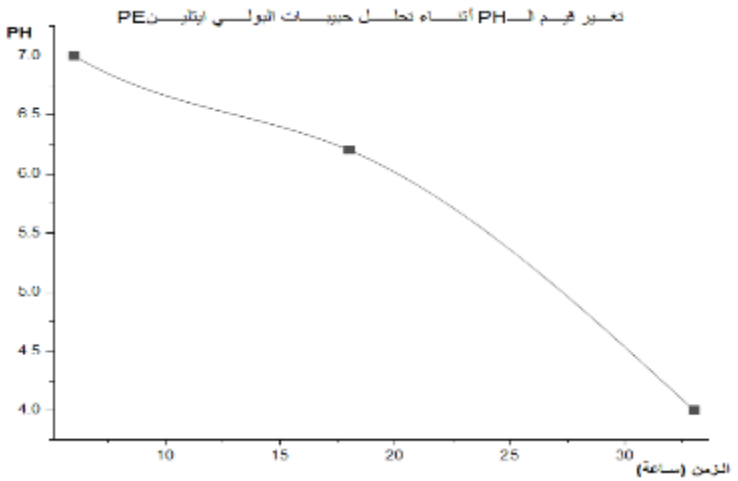
4-3 تقييم التغير في قيمة pH:

تشير المراجع العلمية والمواصفات القياسية إلى أن البولي إيتيلين منخفض الكثافة (LDPE) الخام لا يمتلك قيمة حموضة (pH) ذاتية، نظراً لطبيعته البوليمرية غير القابلة للذوبان في الماء وخلو بنيته الكيميائية من المجموعات الوظيفية الحمضية أو الأساسية [3,4] .

ووفقًا للدراسات العلمية والمواصفات القياسية الدولية، تتراوح قيمة pH للمستخلص المائي لحبيبات البولي إيتيلين الخام بين 6.5 و 7.5، مما يدل على الطابع المتعادل تقريباً للبوليمر قبل أي معالجة كيميائية [4,5]. وتعكس هذه القيمة الاستقرار الكيميائي للبولي إيتيلين منخفض الكثافة في حالته الخام.

بالمقارنة مع ذلك، أظهرت نتائج هذه الدراسة انخفاضاً ملحوظاً في قيمة pH بعد عملية انحلال الحبيبات باستخدام المذيبات العضوية المعتمدة البحث والمشار إليها سابقاً، حيث انخفضت قيمة pH من 7 (عند زمن 6 ساعات) إلى 4 (عند زمن 33 ساعة)، مما يشير إلى تشكل مركبات ذات طبيعة حمضية ناتجة عن تفكك السلاسل البوليمرية[2,6].

يوضح المخطط البياني في الشكل (13) تغير قيمة pH للوسط مع زمن انحلال حبيبات البولي إيثيلين (PE).

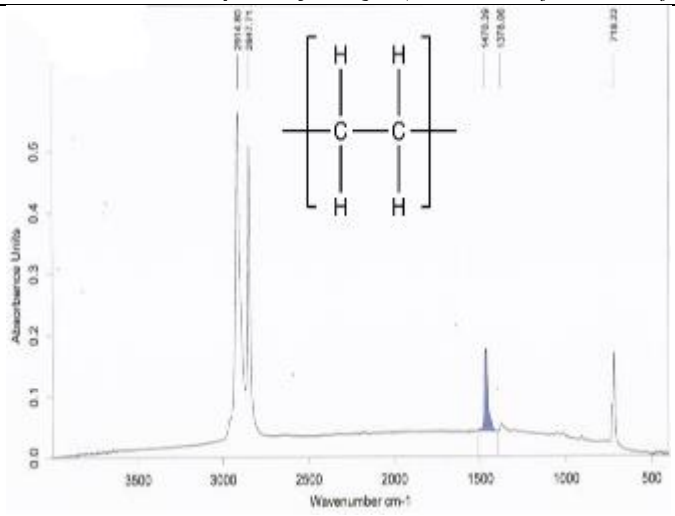


الشكل (13): العلاقة بين زمن التفاعل وقيمة pH للوسط

4-4 تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء:(FTIR) -

4-4-- 1 طيف الأشعة تحت الحمراء للبولي إيثيلين الخام:

يوضح الشكل (14) طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فوريه (FTIR) للبولي إيثيلين (PE) الخام. تقع الامتصاصات المميزة للبولي إيثيلين عند الأعداد الموجية 2914cm^{-1}، 2847cm^{-1}، 1470cm^{-1} ، 718cm^{-1}، حيث تُستخدم هذه الامتصاصات لتحديد وقياس وجود البولي إيثيلين[10، 11] .

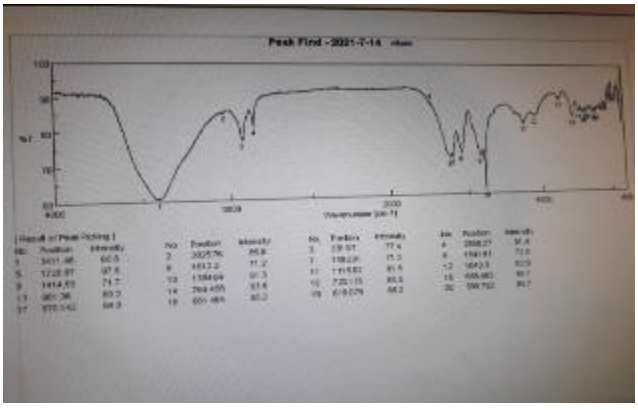


الشكل (14): طيف الأشعة تحت الحمراء FT–IRللبولي إيثلين قبل الانحلال

1– – 4–4طيف الأشعة تحت الحمراء للبولي إيثيلين بعد التحلل:

تم إجراء تحليل FTIR لمزيج حبيبات البولي إيثيلين (PE) المنحلة في المذيبات في قسم الكيمياء بكلية العلوم ، ويوضح الشكل (15) الطيف الناتج. يظهر طيف البولي إيثيلين الخام امتصاصات مميزة عند $2850\ cm^{-1}$ و $723\ cm^{-1}$، مما يدل على انتظام السلسلة البوليمرية ووجود التبلور[10,11]. أما بعد عملية الانحلال، تظهر عصابة امتصاص جديدة عند $1728\ cm^{-1}$، مما يشير إلى بدء التحلل وتشكل مركبات حمضية ناتجة عن أكسدة السلسلة البوليمرية [12,13].

يوضح الجدول (4) النقاط المميزة في طيف FT–IR للبولي إيثيلين المنحل مع تفسيراتها العلمية.



الشكل (15): طيف الأشعة تحت الحمراء FT–IRالمزيج حبيبات البولي إيثيلين المنحلة

الجدول (4): النقاط المميزة في طيف FT–IR للبولي إيثيلين المنحل

التفسير العلمي	المجموعة الوظيفية	العدد الموجي (cm^{-1})
بداية الأكسدة وتشكل ألدهيدات،كيتونات،إسترات، وهو دليل مباشر على تقدم عملية التحلل	C=O	1728
تشير إلى إيثرات،كحولات،أوكسيدات ناتجة عن تكسر السلسلة الرئيسية (مواد صديقة للبيئة)	C–O–C	1115
بوليميرات متأكسدة	C–O	1043

بناءً على ما سبق، أظهر تحليل FT–IR لحبيبات البولي إيثيلين بعد معالجتها بالمذيبين الكيميائيين ظهور قمم واضحة للتحلل التأكسدي، حيث لوحظت زيادة ملحوظة في شدة القمة عند $1728\ cm^{-1}$، وهي القيمة التي تُعزى إلى اهتزاز مجموعة الكربونيل (C=O)، مما يشير إلى تكسر السلسلة الهيدروكربونية وتشكل نواتج أكسدة مثل الألدهيدات والكيتونات والإسترات[14] . كما ازدادت شدة القمم الواقعة بين $1100\ cm^{-1}$و $1200\ cm^{-1}$، والتي تُعزى إلى اهتزازات روابط C–O ، مما يؤكد تكون نواتج ثانوية مثل الإيثرات والكحولات [14]. في الوقت نفسه، بقيت القمم الأساسية للبولي إيثيلين عند $720cm^{-1}$،$1470cm^{-1}$، $2850cm^{-1}$، $2919cm^{-1}$، ظاهرة مع انخفاض تدريجي في شدتها، مما يدل على تقدم عملية التحلل مع احتفاظ جزئي بالبنية الأساسية للبوليمر، وتحول المادة إلى مركبات أكثر قابلية للتفكك وصديقة للبيئة [15، 16].

يوضح الجدول (5) مقارنة بين طيفي الـ FT–IR للبولي إيثيلين الخام والمنحل، مع التفسير العلمي للنقاط الموجية.

الجدول (5): مقارنة بين طيفي الـ FT–IR للبولي إيثيلين الخام والمنحل

التفسير العلمي	نوع الاهتزاز	PE المنحل	PE الخام	العدد الموجي (cm^{-1})
اهتزاز غير متماثل لمجموعة CH_2	C–H stretch (asym)	قوي/أقل	قوي	2919
اهتزاز متماثل لمجموعة CH_2	C–H stretch (sym)	قوي/أقل	قوي	2850
انثناء CH_2 في السلسلة البوليمرية	CH_2 bending	متوسط	متوسط	1470
دليل على انتظام السلسلة	CH_2 scissoring	متوسط	متوسط	1463
ناتج عن تفرعات أو تحلل جزئي	CH_3 bending	أوضح	ضعيف	1377
مؤشر على التبلور في PE	CH_2 rocking	أضعف	قوي	723
تشكل مجموعات كربونيل (تأكسد وتحلل)	C=O stretching	ظاهر	غير موجود	1728
نواتج أكسدة (حموض)	O–H stretching	واضح	غير موجود	3411
نواتج أكسدة ثانوية (إيثرات، كحولات)	C–O stretching	ضعيف/متوسط	غير موجود	1115
نواتج أكسدة إضافية	C–O stretching	ضعيف	غير موجود	1043

مما سبق نجد أن هناك توافقاً واضحاً بين انخفاض قيمة pH وظهور القمم الجديدة في تحليل FTIR. فقد لوحظ ظهور قمم تعود إلى مجموعات الكربونيل (C=O) عند $1728cm^{-1}$ ومجموعات الهيدروكسيل

(O–H) عند $3411cm^{-1}$، وهي قمم لم تكن موجودة في طيف البولي إيثيلين الخام (3،2،1). كما ظهرت قمم جديدة في المنطقة بين بين $1000\ cm^{-1}$و $1200\ cm^{-1}$ تعود إلى روابط C–O، مما يؤكد تكون نواتج أكسدة ثانوية مثل الإيثرات والكحولات[14] .

يؤكد هذا الترابط بين نتائج pH و FT–IR حدوث تحلل كيميائي فعلي للسلاسل البوليمرية، وليس مجرد تغيرات فيزيائية سطحية. إذ يشير انخفاض pH إلى تشكل مركبات حمضية، في حين تؤكد القمم الطيفية الجديدة وجود مجموعات كربونيل وهيدروكسيل وهي نواتج مميزة للتحلل التأكسدي [15، 17] .

يشكل هذا الربط بين القياسات الكيميائية (pH) والتحاليل الطيفية (FTIR) دليلاً إضافياً على فعالية عملية الإذابة الكيميائية باستخدام المذيبات العضوية، ودورها في تحويل البولي إيثيلين إلى نواتج أكثر تفاعلاً كيميائياً، مما يعزز إمكانية الاستفادة منها ضمن مسارات إعادة التدوير والتحويل إلى مواد صديقة للبيئة[18، 17] .

5. الاستنتاجات والمقترحات:

مما سبق حصلنا على النتائج التالية:

1. أثبت مزيج البارا إكزايلين والأسيتون عند درجة حرارة 85^oC قدرته على إحداث تحلل كيميائي جزئي في حبيبات البولي إيثيلين.
2. أظهرت نتائج تحليل FT–IR ظهور قمم جديدة تعود إلى مجموعات الكربونيل (C=O) والهيدروكسيل (O–H) وروابط C–O، مما يؤكد حدوث تحلل تأكسدي حقيقي للسلاسل البوليمرية وليس مجرد تغيرات فيزيائية سطحية.

   و هذه النتائج تتوافق مع أبحاث 2013 للباحثين Hadi و Najmuldeen وYusoh في ماليزيا التي تناولت تقنية الإذابة Dissolutionو إعادة تدوير نفايات البلاستيك باستخدام عدة مذيبات عضوية للحصول على بوليمير معاد تدويره بجودة عالية[8]
3. انخفضت قيمة pH للوسط المتفاعل من 7 إلى 4 بعد 33 ساعة من المعالجة، مما يعكس تشكل مركبات حمضية ناتجة عن تكسر السلسلة الهيدروكربونية، ويتوافق هذا الانخفاض بشكل واضح مع النتائج الطيفية كما تتوافق هذه النتيجة مع البحث السابق لجامعة ماليزيا 2013 [7] حيث تغير معهم الوسط التفاعلي عند تحلل البلاستيك ليتحول لوسط حامضي بانخفاض قيمة PH

4. تزايدت حدة التحلل وازدادت حموضة الوسط بزيادة مدة المعالجة، مما يشير إلى إمكانية التحكم بدرجة التحلل من خلال التحكم بزمن التفاعل.
5. تحول البولي إيثيلين بعد المعالجة إلى مركبات أكثر قابلية للتفكك مثل الإيثرات والكحولات والمركبات الحمضية، مما يمهد الطريق لتحويل نفاياته إلى مواد أقل ضرراً بالبيئة. [7]

و هذه النتائج تتوافق مع أبحاث عام 2015 للباحثين Wong و Abdullah و Ngadi عن تحويل نواتج تحلل النفايات البلاستيكية إلى مواد ثمينة صديقة للبيئة

بناء" على النتائج السابقة نقترح ما يلي:

- تطبيق المنهجية على عينات متنوعة من المنتجات البلاستيكية المصنعة من البولي إيثيلين (أكياس، أغشية تغليف، حاويات) لمقارنة استجابة كل مادة للمذيبات الكيميائية.
- استخدام مزائج مختلفة من المذيبات العضوية بنسب التي تحقق أعلى كفاءة تحلل بأقل استهلاك للطاقة وزمن معالجة.

6. المراجع

[1]. Andrady AL. Microplastics in the marine environment. Marine pollution bulletin. 2011 Aug 1;62(8):1596-605.

[2]. Hopewell J, Dvorak R, Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2009 Jul 27;364(1526):2115-26

[3]. Al-Salem SM, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste management. 2009 Oct 1;29(10):2625-43.

[4]. Aguado J, Serrano DP, Escola JM. Fuels from waste plastics by thermal and catalytic processes: a review. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008 Nov 5;47(21):7982-92.

[5]. Ragaert K, Delva L, Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste management. 2017 Nov 1;69:24-58.

[6]. Hadi AJ, Najmuldeen GF, Yusoh KB. Dissolution/reprecipitation technique for waste polyolefin recycling using new pure and blend organic solvents. J Polym Eng. 2013;33(5):471-81.

[7]. Wong SL, Ngadi N, Abdullah TA, Inuwa IM. Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review. Renewable and sustainable energy reviews. 2015 Oct 1;50:1167-80.

[8]. Hadi AJ, Najmuldeen GF, Yusoh KB. Dissolution/reprecipitation technique for waste polyolefin recycling using new pure and blend organic solvents. Journal of Polymer Engineering. 2013 Aug 1;33(5):471-81.

[9]. Wong SL, Ngadi N, Abdullah TA, Inuwa IM. Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review. Renewable and sustainable energy reviews. 2015 Oct 1;50:1167-80.

[10]. Gulmine JV, Janissek PR, Heise HM, Akcelrud L. Polyethylene characterization by FTIR. Polymer testing. 2002 Jan 1;21(5):557-63.

[11]. Socrates G. Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts. John Wiley & Sons; 2004 Jun 18.

[12]. Rajakumar K, Sarasvathy V, Thamarai Chelvan A, Chitra R, Vijayakumar CT. Natural weathering studies of polypropylene. Journal of Polymers and the Environment. 2009 Sep;17(3):191-202.

[13]. Gardette M, Perthue A, Gardette JL, Janecska T, Földes E, Pukánszky B, Therias S. Photo-and thermal-oxidation of polyethylene: Comparison of mechanisms and influence of unsaturation content. Polymer Degradation and Stability. 2013 Nov 1;98(11):2383-90.

[14]. Silverstein RM, Webster FX, Kiemle DJ. Spectrometric identification of organic compounds. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2005.

[15]. Roy PK, Surekha P, Rajagopal C, Choudhary V. Thermal degradation studies of LDPE containing cobalt stearate as pro-oxidant. Express Polym Lett. 2007 Apr 1;1(4):208-16.

[16]. Shen C, Wei X, Chen Q, Yan L, Zhao X, Liu X, Xu S, Wang YZ. On-Demand Upcycling of Polyethylene Wastes to Recyclable Multifunctional Materials by LEGO Strategy. CCS Chemistry. 2026 Jan 1;8(1):568-78.

[17]. Aniśko-Michalak J, Sokolohorskyj A, Szafraniak-Wiza I, Kosmela P, Piasecki A, Barczewski M. Unveiling the Effects of Thermal Aging on the Oxidative Stability of Biobased Low-Density Polyethylenes. ACS omega. 2025 Jun 11;10(24):25432-50.

[18]. Radkevich E, Granger C, Nelson K, Guigley K, Grey S, Miller D, Bar-Ziv E, Avraamidou S, Huber GW. Production of high-quality polyethylene (PE) films from post-consumer shrink wrap with solvent targeted recovery

and precipitation (STRAP). Waste Management. 2026 Mar 15;214:115395.

[19]. Shen C, Wei X, Chen Q, Yan L, Zhao X, Liu X, Xu S, Wang YZ. On-Demand Upcycling of Polyethylene Wastes to Recyclable Multifunctional Materials by LEGO Strategy. CCS Chemistry. 2026 Jan 1;8(1):568-78.