مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية والمعمارية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 4

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 البعث :**

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 بالنسبة لكليات (الآداب – الاقتصاد– 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 للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث 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 (50000) ل.س أربعون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.**
2. **دفع رسم نشر (200000) ل.س مئة الف 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 (15000) ل.س ستة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.**

المحتوى

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
تعزيز موثوقية التنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون باستخدام خوارزميات التعلُّم الآلي وتقنيات التحليل التفسيري	د. غصون اندراوس	38-11
نمذجة الطلب والعرض المائي لحوض نهر الكبير الجنوبي بسوريا	د.م. كنان الأحمد + م. فتاة خضور	58-39
دراسة تأثير موقع صمام الأمان في حماية خط الضخ من الصدمة الهيدروليكية	شذى خلوف أ.د. عادل جرجي	80-59
دراسة تجريبية لتأثير إضافة المطاط على خواص الرص للترب الناعمة	واصف هيثم كوسى د. محمد تقلا د. لينا كراكيت	104-81

تعزيز موثوقية التنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون باستخدام خوارزميات التعلُّم الآلي وتقنيات التحليل التفسيري

د. غصون اندراوس*

ملخص

يهدف هذا البحث إلى تعزيز موثوقية نماذج التنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون باستخدام خوارزميات التعلُّم الآلي، مع تحسين دقة التنبؤ وفهم تأثير مكوّنات الخلطة على مقاومة الضغط من خلال تقنيات التحليل التفسيري. تمَّ في البداية بناء نموذج XGBoost كنموذج مرجعي أساسي باستخدام Python 3.10.11، ثمَّ تحسين أدائه من خلال دمج مجموعة من الميزات المشتقة، مما أدّى إلى تطوير نموذج محسَّن بمعامل تحديد 0.93.

استُخدمت تقنيات التحليل التفسيري، بما في ذلك تحليل أهمية المتغيّرات، تحليل الحساسية، وتحليل "ماذا لو؟" لتفسير سلوك النموذج وتحديد مدى تأثير المتغيّرات المختلفة على مقاومة الضغط للبيتون.

أظهرت النتائج أنَّ محتوى الإسمنت وعمر البيتون، كانت الأكثر تأثيراً في تطور مقاومة الضغط بنسبة بلغت نحو 49%، إضافةً إلى كونها الأعلى حساسيةً بالمقارنة مع بقية المتغيرات المُدخلة. في المقابل، كان تأثير الميّزات المشتقة محدوداً نسبياً، مما يشير إلى أنَّ أداء النموذج يعتمد بشكل رئيسي على المكوّنات الأساسية للخلطة وعمر البيتون، بينما تلعب الميّزات المشتقة دوراً داعماً في تحسين دقة التنبؤ.

تؤكد نتائج البحث أهمية الدمج بين التنبؤ الدقيق والتحليل التفسيري، لتعزيز شفافية نماذج التعلم الآلي وموثوقية نتائجها، ودعم اتخاذ القرارات المتعلقة بتصميم الخلطات البيتونية.

الكلمات المفتاحية: مقاومة الضغط، XGBoost، تعلّم آلي، تحليل الأهمية، تحليل الحساسية.

* عضو هيئة تعليمية (مديرة أعمال)– قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية– جامعة اللاذقية– اللاذقية– سورية. E-mail:gosonandraws@latakia-univ.edu.sy

Enhancing the Reliability of Compressive Strength Prediction of Concrete Using Machine Learning Algorithms and Explainable Analysis Techniques

Dr. Ghousson Andrawes *

Abstract

This study aims to enhance the reliability of predictive models for concrete compressive strength using machine learning algorithms, while improving prediction accuracy and understanding the influence of mix constituents through explainable analysis techniques. Initially, an XGBoost model was developed as a baseline reference using Python 3.10.11. Its performance was subsequently improved by incorporating a set of derived features, resulting in an enhanced model with a coefficient of determination (R^2) of 0.93. Explainable analysis techniques, including feature importance analysis, sensitivity analysis, and "what-if" analysis, were employed to interpret the model behavior and assess the influence of different variables on concrete compressive strength.

The results showed that cement content and concrete age, had the greatest influence on the development of compressive strength, accounting for approximately 49%, and exhibited the highest sensitivity compared to the other input variables. In contrast, the derived features showed a relatively limited impact, indicating that the model's performance primarily depends on the fundamental mix components and concrete age, while the derived features play a supportive role in enhancing prediction accuracy.

The findings highlight the importance of integrating accurate prediction with explainable machine learning techniques to improve model transparency and reliability, thereby supporting informed decision-making in concrete mix design.

Keywords: compressive strength, XGBoost, Machine learning, importance analysis, sensitivity analysis**.**

* **Faculty Member (Academic Rank: Business Manager), Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria.** E-mail:gosonandraws@latakia-univ.edu.sy

1- مقدمة

تُعدُّ مقاومة الضغط من أهم الخواص الميكانيكية التي تتحكم في أداء البيتون، إلّا أن تقديرها تجريبياً يتطلب وقتاً وكلفةً مرتفعة، مما أدّى إلى تزايد الاعتماد على خوارزميات التعلم الآلي كأدوات فعّالة للتنبؤ بمقاومة الضغط اعتماداً على بيانات الخلطات، وعلى الرغم مما حققته هذه الخوارزميات من دقة تنبؤية عالية، إلّا أن محدودية قابليتها للتفسير أظهرت الحاجة إلى فهم أعمق لدور المتغيّرات المختلفة في عملية التنبؤ. انطلاقاً من ذلك، ركّزت الدراسات الحديثة على دمج نماذج التعلم الآلي مع تقنيات التحليل التفسيري مثل تحليل أهمية المتغيرات، تحليل الحساسية، وتحليل ماذا لو، بهدف تعزيز موثوقية النماذج وربط نتائجها بالسلوك الفيزيائي للبيتون.

يَعرض هذا القسم أهم الدراسات السابقة التي تناولت التنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون باستخدام التعلم الآلي، مع التركيز على الأساليب التفسيرية ودور الميزات المشتقة في تحسين أداء النماذج وفهم آليات عملها.

- قدّم الباحث (Almutairi, 2025) دراسة لتطوير إطار تعلّم آلي قابل للتفسير للتنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون ذاتي الدمك، والذي يحوي ركام معاد تدويره، مع دمج مواد إضافية مثل خبث أفران الصهر والرماد المتطاير. تمَّ إنشاء قاعدة بيانات تجريبية مؤلفة من 400 عينة بيتونية، مع تطوير أربع خوارزميات تعلم آلي (SVR, RF, MLP, XGBoost) لتحسين المعاملات الفائقة. كان نموذج XGBoost أفضلها أداءً بدقة تنبؤ عالية ($R^2 \approx 0.96–0.98$). استُخدم التحليل التفسيري SHAP لتحديد تأثير المدخلات، وقد أظهرت النتائج أن الملدّن الفائق والإسمنت، هي المتغيرات الأكثر تأثيراً، بينما زيادة كمية الماء تؤثر سلباً على المقاومة. برهن النموذج القابل للتفسير على فعاليته في التقاط العلاقات غير الخطية بين متغيرات الخلطة ومقاومة الضغط، مما يدعم تحسين تصميم الخلطات البيتونية ذات الاستدامة. **[1]**

- استخدم الباحثان (Baseer & Ali, 2026) نماذج تعلّم آلي لتوقع مقاومة الضغط للبيتون المسامي (Pervious Concrete) بهدف تقليل الحاجة لاختبارات مختبرية. تم

تجميع 253 خلطة بيتونية، ثم استخدام مجموعة من خوارزميات التجميع مثل Random Forest، Extra Trees، AdaBoost، XGBoost، و Gradient Boosting Regressor (GBR) لبناء نماذج تنبؤية.

أظهرت النتائج أن GBR المحسّن حقّق أفضل أداء في التنبؤ بمقاومة الضغط مقارنةً بالخوارزميات الأخرى، مما يدل على قدرة نماذج التعلم الآلي على تقدير القوة الميكانيكية استناداً إلى مكونات الخلطة مثل نسبة الماء إلى الإسمنت، المسامية، ونسبة الركام. كما تمَّ التحقق التجريبي من صحة النموذج باستخدام عينات مختبرية، وأكدت النتائج توافق التنبؤات مع القيم الحقيقية، مما يدعم استخدام التعلم الآلي كأداة مساعدة في تصميم الخلطات وتقليل الكلفة والوقت. **[2]**

– قدّم الباحثون (Fu, et al, 2025) دراسة لتطوير إطار تنبؤي لمقاومة الضغط للبيتون باستخدام نماذج التعلم الآلي القابلة للتفسير. استخدم الباحثون عدة خوارزميات مثل Gradient Boosting، Random Forest، وNeural Networks ، مع 223 مجموعة من البيانات التجريبية، وتمَّ ضبط المعاملات الفائقة باستخدام Bayesian optimization. أثبت النموذج CatBoost أنه الأفضل أداءً حيث حقّق دقة عالية ($R^2 \approx 0.9388$) مع خطأ تنبؤ منخفض. تمَّ استخدام تحليل SHAP لقياس مساهمة المتغيرات المختلفة، وأظهرت النتائج أن محتوى الإسمنت هو العامل الأكثر تأثيراً على مقاومة الضغط، يليه بالترتيب محتوى الماء، المواد المضافة، الرماد المتطاير، والركام. قدّمت هذه الدراسة أداة تفسيرية موثوقة لدعم تحسين تصميم الخلطات البيتونية. **[3]**

– استخدم الباحث (Li, 2023) خوارزمية XGBoost كأداة فعّالة للتنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون باستخدام تقنيات التعلم الآلي وتحليل البيانات. اعتمد الباحث على مجموعة بيانات متاحة من مصادر أكاديمية، حيث تمَّ فحص درجة الارتباط بين مختلف مكونات البيتون مثل الإسمنت، الماء، الركام، والمواد الإضافية وعلاقتها بمقاومة الضغط. ثم تمّت مقارنة دقة أداء XGBoost مع خوارزميات أخرى شائعة في التنبؤ، مثل Support Vector Machine وDecision Tree، لتحديد أفضل نموذج تنبؤ. أظهرت النتائج أن XGBoostحقق أداءً متفوقاً في تقدير مقاومة البيتون مقارنة بالنماذج التقليدية، وذلك

بفضل قدرته على التقاط العلاقات غير الخطية بين المُدخلات والمُخرجات. كما أوضحت الدراسة أهمية تطبيق تحليل الأهمية التفسيري في فهم تأثير المتغيرات المختلفة على المقاومة المتوقعة. **[4]**

– قدَّم الباحثون (Liu et al, 2023) دراسة حول تطوير منصة برمجية متكاملة للتنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون العادي باستخدام تقنيات التعلم الآلي، بهدف تحسين الكفاءة وتقليل الزمن والكلفة المرتبطة بالاختبارات التجريبية التقليدية.

تمَّت مقارنة عدة خوارزميات تعلم آلي، شملت أساليب الانحدار (مثل Ridge و Lasso و Elastic Net) وطرق متقدمة مثل Support Vector Regression (SVR) و K–Nearest Neighbors (KNN)، بالإضافة إلى نماذج Ensemble مثل Gradient Boosting Decision Tree (GBDT) و XGBoost و Random Forest. أظهر التحليل أن نماذج التجميع (Ensemble models) حققت أداء تنبؤي أعلى من النماذج الفردية، حيث بلغ معامل التحديد (R^2) للنماذج الفردية نحو 0.80، بينما تجاوزت قيمة R^2 في نماذج التجميع 0.95. كذلك ارتفعت دقة النموذج بشكل كبير، بعد تحسين المعاملات الفائقة باستخدام Grid Search Optimization، وكان نموذج GSXGBoost الأفضل أداءً. بعد ذلك طوَّر الباحثون منصة برامج بواجهة رسومية (GUI) للاستفادة من النماذج التنبؤية، مما يساعد المهندسين في تصميم الخلطات وتوقع مقاومتها بسرعة وفعالية دون الاعتماد الكامل على اختبارات مختبرية مكلفة. **[5]**

– قام الباحثون (Lv et al, 2025) بتطوير نموذج تنبؤ موثوق لمقاومة الضغط للبيتون باستخدام خوارزمية XGBoost مدمجة مع تحليل التفسير SHAP، ما يجمع بين الدقة العالية والفهم الهندسي للعوامل المؤثرة. اعتمدت الدراسة على قاعدة بيانات ضخمة تضم 1078 عيّنة بيتونية، مع تحليل خمس متغيرات رئيسية مثل نسبة الماء إلى المواد الرابطة، العمر، المواد المضافة، الماء، ونسبة الرمل إلى الركام. حقّق النموذج أداءً قوياً بقيم $R^2 \approx 0.909$ و RMSE ≈ 4.65، كما أظهر تحليل SHAP أن نسبة المواد الرابطة والعمر هما العاملان الأبرز في تحديد مقاومة الضغط، وأنَّ تقسيم البيانات حسب العمر، يؤدي

إلى تحسّن إضافي في التنبؤ، مما يدعم استخدام النموذج في تحسين تصميم الخلطات عملياً. **[6]**

– استخدم الباحثون (Mahmood et al, 2025) نماذج التعلم الآلي للتنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون عالي الأداء المحتوية على مسحوق الزجاج، مع التركيز على قابلية تفسير النماذج. قام الباحثون بتطوير عدة نماذج تنبؤية، ثم استخدموا تقنيات تفسيرية متقدمة هي SHAP وPDP وICE لتحليل تأثير المتغيرات المختلفة على مقاومة الضغط. أظهرت نتائج تفسير النموذج أنَّ محتوى الإسمنت، نسبة الماء إلى الإسمنت، عمر البيتون، ومحتوى مسحوق الزجاج هي من أكثر المتغيّرات تأثيراً على مقاومة الضغط. كما بيّنت مخططات PDP وICE العلاقات غير الخطية بين المتغيرات، وقدّمت رؤية واضحة لكيفية تغيّر المقاومة المتوقعة عند تعديل قيم متغيرات الخلطة، وهذا يتوافق مع مفهوم تحليل "ماذا لو" عملياً. **[7]**

– قام الباحثون (Wang et al, 2025) بتطوير نماذج تنبؤية متقدمة، ثمَّ استخدام أدوات تفسيرية مثلSHAP لتحليل أهمية المتغيرات الفردية، بالإضافة إلى دراسة تأثير التفاعل بين المتغيرات وليس تأثير كل متغير بشكل منفرد فقط. أظهرت النتائج أن بعض المتغيرات الأساسية، مثل محتوى الإسمنت، نسبة الماء إلى المواد الرابطة، والعمر، لها تأثير مسيطر على الخواص الميكانيكية، إلا أن تأثيرها يتغير تبعاً لتفاعلها مع متغيرات أخرى مثل الإضافات المعدنية والركام. أوضح البحث أنَّ تجاهل هذه التفاعلات قد يؤدي إلى تفسير غير مكتمل لسلوك النموذج، كما أظهر أنَّ استخدام التعلم الآلي التفسيري لا يساهم فقط في تحسين دقة التنبؤ، بل يوفر أيضاً فهماً فيزيائياً أعمق لسلوك البيتون، مما يعزز موثوقية النماذج ويدعم تصميم خلطات أكثر كفاءةً واستدامةً. **[8]**

– استخدم الباحثون (Yang et al, 2025) نماذج تعلم آلي متعددة لتوقع مقاومة الضغط للبيتون الرغوي وتطبيق تحليل الحساسية لفهم تأثير كل متغير مُدخل على قوة الضغط. استُخدم تحليل Shapley Additive Explanations (SHAP) كأداة حساسية لقياس مقدار تأثير كل متغير على مخرجات النموذج، حيث ساعد ذلك في تحديد ترتيب تأثير

المتغيرات مثل كثافة البيتون، نسبة الماء إلى الإسمنت، العمر، نسبة الركام، محتوى الملدن، ومعدل استبدال المواد المساعدة على المقاومة المتوقعة.
أظهرت النتائج أنَّ نموذج Gaussian Process Regression هو الأفضل أداءً، وأنَّ كثافة البيتون ونسبة الماء إلى الإسمنت وعمر البيتون هي العوامل الأكثر حساسية في التنبؤ بمقاومة الضغط. أوضح البحث أن دمج التنبؤ الدقيق مع تحليل الحساسية يساهم في تفسير سلوك النموذج بشكل عميق. **[9]**

- تُعدُّ الدراسة التي قدّمها الباحث (Yeh, 1998) من أوائل الدراسات العلمية التي اعتمدت الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لتقدير مقاومة الضغط للبيتون عالي الأداء. استخدم الباحث بيانات تجريبية من خلطات بيتونية مختلفة لتدريب نموذج (ANN)، وتمت مقارنة أداء النموذج مع طرق الانحدار التقليدية. أظهرت النتائج أنَّ النموذج المبني باستخدام (ANN) هو الأكثر دقة في التنبؤ من نموذج الانحدار التحليلي، وأنَّ أساليب التعلُّم الآلي تمتلك قدرة كبيرة على التعامل مع العلاقات غير الخطية والمعقدة بين مكونات البيتون ومقاومته على الضغط. **[10]**

2- هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى تعزيز موثوقية التنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون، وذلك من خلال تطوير نموذج تعلم آلي محسّن باستخدام خوارزمية XGBoost بلغة Python، مع إضافة مجموعة من الميزات المشتقة لتحسين دقة التنبؤ ورفع أداء النموذج.
كما يسعى البحث إلى توظيف تقنيات التحليل التفسيري لدراسة تأثير المكونات الأساسية والميزات المشتقة على مقاومة الضغط، وذلك لدعم اتخاذ قرارات تصميمية دقيقة وموثوقة للخلطات البيتونية.

3- مواد وطرق البحث

1.3. قاعدة البيانات

استُخدمت قاعدة البيانات Concrete Compressive Strength Dataset، والتي جُمِعت أساساً من قِبَل Yeh (1998)، وقد تمَّ الحصول عليها من مستودع التعلم الآلي UCI Machine Learning Repository. **[11]**

تتضمن قاعدة البيانات 1028 خلطة بيتونية، حيث تحتوي كل خلطة على كمية المتغيّرات الأساسية المُستخدمة في الدراسة وهي: الإسمنت، الماء، الحصويات الناعمة، الحصويات الخشنة، خبث الأفران العالية، الرماد المتطاير، الملدّن الفائق، عمر البيتون بالأيام، أما المتغير الهدف فهو مقاومة الضغط للبيتون.

يبين الجدول (1) الملخص الإحصائي لمكونات الخلطات المُستخدمة في قاعدة البيانات المُعتمدة في هذا البحث.

الجدول (1) قيم المتوسط الحسابي والقيم الدنيا والقيم العظمى للبيانات

المكوّن (kg/m^3)	المتوسط الحسابي	القيمة الدنيا	القيمة العظمى
الإسمنت	280.85	102.00	540.00
خبث الأفران العالية	74.04	0	359.40
الرماد المتطاير	54.29	0	200.00
الماء	181.54	121.75	247.00
الملدّن	6.21	0	32.20
الحصويات الخشنة	972.77	801.00	1145.00
الحصويات الناعمة	773.74	594.00	992.60

وفقاً لما ورد في سجّل البيانات المتعلق بكل خلطة، تختلف قيمة المقاومة الفعلية للبيتون على الضغط من خلطة لأخرى، تبعاً لتغيّر خصائص المواد الداخلة في تركيب الخلطة وعمر البيتون الذي تراوح بين 3 أيام إلى 365 يوماً.

2.3. معالجة البيانات

تمَّ إجراء معالجة مسبقة للبيانات لضمان جودتها ومدى ملاءمتها للتحليل، وتمَّ التحقق من القيم المفقودة والقيم الشاذة، بالإضافة إلى التأكد من توحيد وحدات القياس لجميع المتغيرات، كما تم تنظيم البيانات في صيغة رقمية مناسبة لإدخالها إلى نماذج التعلم الآلي.

3.3. بناء نموذج التعلم الآلي XGBoost (نموذج التعزيز التدريجي الفائق)

تم اعتماد خوارزمية XGBoost (Extreme Gradient Boosting) كنموذج أساسي للتنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون. يتميز نموذج XGBoost بقدرته العالية على التعامل مع العلاقات غير الخطية والتفاعلات المعقدة بين المتغيرات، فهو نموذج متقدم للتعلّم التجميعي المعزّز، مع إضافة تقنيات تحسين لتقليل الخطأ ومنع فرط التعلّم، ويُستخدم في مسائل الانحدار والتصنيف بدقة عالية جداً.

تمَّ تقسيم البيانات إلى مجموعة تدريب بنسبة 70% ومجموعة اختبار بنسبة 30%، ثم بناء نموذج XGBoost باستخدام لغة (Python)، وتقييم أداء النموذج عن طريق حساب مؤشرات الأداء مثل معامل التحديد (R^2)، متوسط مربع الخطأ (MSE) ومتوسط الخطأ المطلق (MAE).

تمَّ إدراج كود Python المستخدم في بناء نموذج XGBoost وتقييم أدائه، ضمن الملحق (1).

4.3. تحسين النموذج XGBoots

بهدف تحسين قدرة النموذج XGBoots على تمثيل العلاقات الفيزيائية بين مكوّنات الخلطة ومقاومة الضغط، تم إضافة مجموعة من الميزات المشتقة من المتغيرات الأساسية وهي:
نسبة الإسمنت إلى الماء (Cement-to-Water Ratio).
مجموع المواد الرابطة (Binder): يشمل الإسمنت، خبث الأفران العالية، والرماد المتطاير.
نسبة الحصويات (agg_ratio): أي نسبة الحصويات الخشنة إلى الحصويات الناعمة.
تمَّ دمج هذه الميزات المشتقة مع المتغيرات الأساسية للخلطة، لتشكيل مجموعة الميزات النهائية المستخدمة في تدريب النموذج.

كذلك تمّ إجراء ضبط للمعاملات الفائقة أي تحديد عدد الأشجار، العمق الأقصى لكل شجرة، ومعدّل التعلُّم، حيث تؤثر هذ المعاملات بشكل مباشر على قدرة النموذج على التعلم من البيانات والتقاط العلاقات غير الخطية والمعقدة بين المتغيرات المستقلة ومقاومة الضغط.

تمَّ إدراج كود Python المستخدم في تحسين النموذج XGBoost وتقييم أدائه، ضمن الملحق (2).

5.3. تقنيات التحليل التفسيري

تشير تقنيات التحليل التفسيري إلى مجموعة من الأساليب الكميّة التي تهدف إلى فهم سلوك نماذج التعلم الآلي، وتفسير كيفية تأثير المتغيرات المُدخلة على مقاومة الضغط للبيتون.

تشمل تقنيات التحليل التفسيري المُعتمدة في هذا البحث ما يلي:

1.5.3- تحليل أهمية المتغيرات (Feature Importance Analysis):

يُعدّ تحليل أهمية المتغيرات أحد أهم تقنيات التحليل التفسيري في نماذج التعلم الآلي، ويهدف إلى قياس مقدار مساهمة كل متغيّر مُدخل في التأثير على مقاومة الضغط، سواء كان من المتغيرات الأساسية أو من الميزات المشتقة.

من الجدير بالذكر أنّه عند التنبؤ بمقاومة الضغط للبيتون، لا تكفي دقة النموذج وحدها لتقييم جودته، إذ إن النماذج عالية الدقة قد تعتمد على علاقات غير واقعية هندسياً، لذلك يُستخدم تحليل أهمية المتغيرات للتحقق من توافق سلوك النموذج مع المبادئ الفيزيائية والميكانيكية المعروفة لمكونات الخلطة البيتونية.

بما أنَّ النموذج المُستخدم شجري (XGBoost/Gradient Boosting)، فقد تمَّ استخراج أهمية المتغيرات مباشرة من النموذج المحسّن القائم على الخوارزميات الشجرية، حيث تُحسب أهمية كل متغير بناءً على عدد مرات استخدامه في تقسيم العقد داخل الأشجار، ومدى مساهمته في تقليل الخطأ أثناء التدريب.

تمَّ إدراج كود Python المُستخدم في تحليل أهمية المتغيرات الفردية للنموذج المحسّن (Enhanced model)، ضمن الملحق (3).

على الرغم من أنَّ تحليل أهمية المتغيرات الفردية يوفّر معلومات قيّمة حول تأثير كل متغيّر على حدة، إلا أنّه لا يوضّح الدور النسبي للفئات المختلفة من المتغيرات، لذلك تمَّ تقسيم المتغيرات إلى مجموعات فيزيائية وتركيبية ومشتقة، بهدف الانتقال من تفسير تأثير كل متغير على حدة إلى تقييم الأثر الكلي لكل مجموعة من المتغيرات، مما يتيح فهماً هرمياً لسلوك النموذج، ويعزز إمكانية ربط نتائج التعلم الآلي بالمنطق الهندسي التقليدي، مما يدعم موثوقية النموذج وقابليته للتطبيق العملي.

تمَّ تقسيم المتغيرات إلى ثلاث مجموعات:

1- المتغيرات الفيزيائية:

تم تصنيف كمية الإسمنت والعمر ضمن مجموعة مستقلة تمثّل المتغيرات الفيزيائية الأساسية، نظراً لارتباطهما المباشر بالآليات الفيزيائية والكيميائية الحاكمة لتطور مقاومة الضغط، ولا سيما تفاعلات الإماهة مع الزمن.

2- المتغيرات التركيبية:

تضم هذه المجموعة المكوّنات الكمية المباشرة للخلطة البيتونية، والتي تتحكم في البنية الحبيبية، ونسبة الفراغات، وقابلية التشغيل، وبالتالي تؤثر بشكل غير مباشر على مقاومة الضغط.

تضم هذه المجموعة: الماء، الحصويات، الرماد المتطاير، خبث الأفران العالية، الملدّن الفائق.

3- المتغيرات المشتقة:

تمثل المتغيرات المشتقة علاقات مركبة بين المكوّنات الأساسية للخلطة، مثل نسبة الإسمنت إلى الماء، مجموع المواد الرابطة، ونسبة الحصويات، وهي تعكس مفاهيم هندسية مستخدمة في تصميم الخلطات البيتونية.

تمَّ إدراج كود Python المُستخدم في تحليل أهمية المتغيرات المُجمّعة للنموذج المحسّن (Enhanced model)، ضمن الملحق (4).

2.5.3- تحليل الحساسية (Sensitivity Analysis)

تحليل الحساسية هو تقنية كميّة، تهدف إلى قياس استجابة مُخرجات النموذج للتغيّر النسبي في قيمة كل متغير على حدة، مع تثبيت باقي المتغيرات عند قيمها المرجعية.

تمَّ إجراء تحليل الحساسية للنموذج المُحسَّن من خلال زيادة قيمة متغير واحد فقط في كل مرة بنسبة 5% مع إبقاء باقي المتغيرات ثابتة دون تغيير، ثمَّ حساب متوسط التغير في مقاومة الضغط المتوقعة. بعد ذلك تم ترتيب المتغيرات حسب أهميتها وعرض النتائج بيانياً لتوضيح أكثر المتغيرات تأثيراً على مقاومة الضغط للبيتون.

تمَّ استخدام تحليل الحساسية لفهم تأثير كل مكوّن من مكونات الخلطة على مقاومة الضغط المتوقعة للبيتون، مما يعزز تفسيرية النموذج ويؤكد توافقه مع المبادئ الهندسية التقليدية.

تمَّ إدراج كود Python المُستخدم في تحليل الحساسية للنموذج المحسّن (Enhanced model)، ضمن الملحق (5).

3.5.3- تحليل "ماذا لو؟" (What-if Analysis)

تحليل "ماذا لو؟" هو أسلوب تفسيري يُستخدم لدراسة سلوك النموذج تحت سيناريوهات افتراضية أو تغييرات محتملة في قيم المُدخلات. يتيح هذا التحليل دراسة مدى تأثير التغيرات في مكونات الخلطة البيتونية على مقاومة الضغط، مع إبقاء المتغيرات الأخرى ثابتة عند قيمها المرجعية.

يُستخدم تحليل "ماذا لو؟" لاستكشاف السيناريوهات المحتملة لتعديل الخلطة ومعرفة تأثيرها على مقاومة الضغط للبيتون، مما يدعم اتخاذ القرار المبني على بيانات موثوقة من نموذج التعلم الآلي.

تمَّ إجراء تحليل "ماذا لو؟" باستخدام النموذج المُحسَّن، مع اختيار الإسمنت والماء كمتغيرات رئيسية، واعتماد قيم مرجعية تمثل متوسط قيم جميع متغيرات الخلطات في قاعدة البيانات. تمَّ تغيير محتوى الإسمنت والماء ضمن مجال $\pm 20\%$ مع تثبيت باقي المتغيرات دون تغيير، وإعادة حساب الميزات المشتقة المرتبطة بكل حالة. بعد ذلك، تمَّ حساب مقاومة الضغط المتوقعة وتمثيل النتائج بيانياً لتحليل استجابة النموذج للتغيرات النسبية في المتغيرات المؤثرة.

تمَّ إدراج كود Python المُستخدم في تحليل "ماذا لو؟" للنموذج المحسّن (Enhanced model)، ضمن الملحق (6).

4- النتائج ومناقشتها

4-1- تقييم أداء النموذج الأساسي والنموذج المُحسّن

تمَّ تقييم أداء النموذج الأساسي المبني باستخدام خوارزمية XGBoost وذلك باستخدام مؤشرات الأداء الإحصائية: معامل التحديد (R^2)، ومتوسط مربع الخطأ (RMSE) ومتوسط الخطأ المطلق (MAE). أظهرت النتائج أن النموذج الأساسي حقق قيمة R^2 مقدارها 0.896، مع قيم RMSE وMAE بلغت 5.228 و3.821 على التوالي، مما يشير إلى قدرة جيدة على التقاط العلاقات بين مكونات الخلطة ومقاومة الضغط، مع وجود مجال لتحسين دقة التنبؤ.

كذلك تمَّ تقييم أداء النموذج المحسّن Enhanced Model، والذي تم تطويره من خلال إضافة مجموعة من الميزات المشتقة وضبط المعاملات الفائقة. أظهرت النتائج ارتفاع في دقة التنبؤ بشكل ملحوظ حيث بلغت قيمة معامل التحديد R^2 للنموذج المحسّن 0.931، مع انخفاض في قيم متوسط الأخطاء MAE وRMSE مقارنة بالنموذج الأساسي لتصبح 4.244 و2.731 على التوالي، مما يعكس تحسّناً كبيراً في قدرة النموذج على التنبؤ بمقاومة البيتون بشكل دقيق.

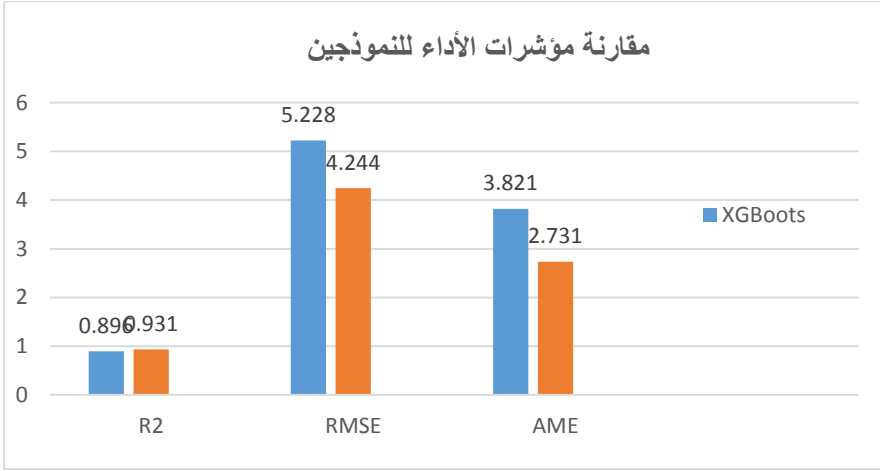
يَعرض الجدول (2) مقارنةً عدديةً لمؤشرات الأداء لكلٍّ من النموذج الأساسي والمحسّن، في حين يوضّح الشكل (1) المقارنة نفسها بصورة بيانية.

الجدول (2) مقارنة مؤشرات الأداء للنموذجين

النموذج	R^2	RMSE	AME
XGBoost	0.896	5.228	3.821
Enhanced model	0.931	4.244	2.731

أظهرت نتائج المقارنة بين النموذج الأساسي والنموذج المحسَّن تحسّناً واضحاً في جميع مؤشرات الأداء الإحصائية. فقد ازدادت القدرة التفسيرية للنموذج بعد التحسين، حيث ارتفعت

قيمة معامل التحديد (R^2)، مما يدل على تمثيل أدق للعلاقة بين مكونات الخلطة ومقاومة الضغط. كما انخفضت قيم كل من RMSE و MAE، مما يعكس انخفاضاً ملحوظاً في أخطاء التنبؤ. ويُعزى هذا التحسّن إلى إضافة الميزات المشتقة التي عزّزت تمثيل العلاقات غير الخطية بين المتغيرات، إلى جانب ضبط المعاملات الفائقة لنموذج XGBoost، مما أدى إلى تحسين قدرة النموذج على التعميم.



الشكل (1) مقارنة مؤشرات الأداء للنموذجين بيانياً

تشير النتائج السابقة إلى أن النموذج المحسَّن (Enhanced Model) أكثر ملاءمةً للتطبيقات الهندسية العملية التي تتطلب تنبؤات دقيقة وموثوقة لمقاومة الضغط.

4-2- التحليل التفسيري للنموذج المحسَّن

بعد مقارنة النموذجين من جهة الأداء وتقييم النتائج، تمَّ التوجّه إلى تحليل النموذج المحسَّن باستخدام تقنيات التحليل التفسيري لفهم دور المتغيرات المختلفة في التنبؤ بمقاومة الضغط.

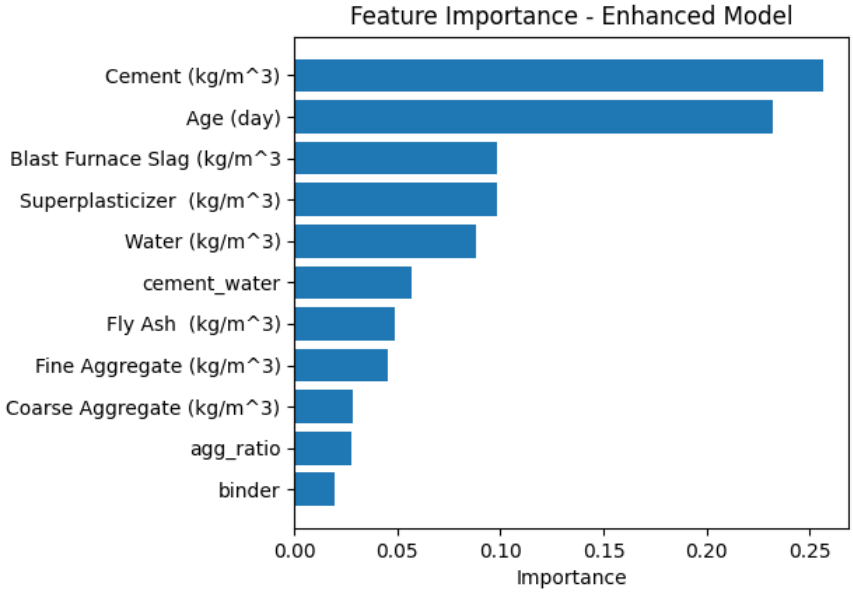
1- تحليل أهمية المتغيرات

تم تحليل أهمية المتغيرات الفردية في النموذج المحسَّن باستخدام مقياس تحليل الأهمية (Feature Importance)، وذلك بهدف تحديد المتغيرات الأكثر تأثيراً في التنبؤ بمقاومة الضغط.

يَعرض الجدول (3) القيم النسبية لأهمية المتغيرات في النموذج المحسَّن، والتي تمَّ الحصول عليها باستخدام مقياس تحليل الأهمية (Feature Importance)، بينما يوضّح الشكل (2) التمثيل البياني للتوزيع النسبي لهذه الأهمية.

الجدول (3) القيم النسبية لأهمية المتغيرات الفردية

المتغير/ الميّزة	الأهمية
الإسمنت	0.256406
العمر	0.232171
خبث الأفران العالية	0.098530
الملدّن الفائق	0.098274
الماء	0.088442
نسبة الإسمنت إلى الماء	0.056879
الرماد المتطاير	0.048415
الحصويات الناعمة	0.045223
الحصويات الخشنة	0.028099
نسبة الحصويات	0.027775
مجموع المواد الرابطة	0.019786



الشكل (2) التوزيع النسبي لأهمية المتغيرات الفردية

أظهرت النتائج أنَّ محتوى الإسمنت وعمر البيتون يمتلكان أعلى أهمية نسبية، حيث يمثل كل منهما حوالي 25% و 24% من التأثير الكلي، مما يشير إلى الدور المحوري لهذين المتغيرين في تعزيز دقة التنبؤ بمقاومة الضغط، تليهما المتغيرات الأخرى مثل الماء، الحصويات، والإضافات بمساهمات نسبية أقل، بينما أظهرت الميزات المشتقة تأثيراً نسبياً محدوداً.

على الرغم من أنَّ الميزات المشتقة لم تكن الأعلى تأثيراً، إلّا أنها كانت فعّالة في تنظيم العلاقات بين المتغيرات الأساسية وتقليل تشتت البيانات، وبالتالي تحسين أداء النموذج.

بعد تقييم المتغيرات الفردية، تمَّ تجميع المتغيرات في ثلاث مجموعات رئيسية (المتغيرات الفيزيائية، المتغيرات التركيبية، المتغيرات المشتقة)، وذلك لتوضيح الأهمية النسبية لكل مجموعة، كما هو مبين في الجدول (4).

الجدول (4) القيم النسبية لأهمية المتغيرات المُجمّعة

مجموعة المتغيرات	الأهمية
المتغيرات الفيزيائية (الإسمنت، العمر)	48.857%

المتغيرات التركيبية (الماء، الحصويات، الرماد المتطاير، خبث الأفران العالية، الملدّن الفائق)	40.698%
المتغيرات المشتقة (نسبة الإسمنت إلى الماء، مجموع المواد الرابطة، نسبة الحصويات)	10.444%

أظهرت النتائج تأثير كل مجموعة من المتغيرات على مقاومة الضغط وفقاً لما يلي:

– شكّلت مجموعة المتغيرات الفيزيائية، والمتمثلة في محتوى الإسمنت وعمر البيتون، النسبة الأكبر من إجمالي أهمية المتغيرات بما يقارب 49%، مما يعكس الدور المحوري لهذين المتغيرين في تطور مقاومة الضغط، مما يدل على أن النموذج موثوق فيزيائياً.

– ساهمت المتغيرات التركيبية المرتبطة بمكونات الخلطة بنسبة تقارب 41% من إجمالي أهمية المتغيرات، مما يشير إلى أنَّ النموذج حسّاس لتركيب الخلطة وليس فقط للإسمنت، وأنَّه لا يعمل كنموذج تبسيطي بل يلتقط التفاعلات المركبة بين مكونات الخلطة.

– كان تأثير الميزات المشتقة محدوداً نسبياً وبنسبة تقارب 10% من الأهمية الكلية للمتغيرات. يشير ذلك إلى أنَّ هذه الميزات لا تمثّل العامل المسيطر في التنبؤ بمقاومة الضغط، إلّا أنها تؤدي دوراً مكملاً مهماً في تحسين دقة النموذج من خلال تعزيز قدرته على تمثيل العلاقات غير الخطية بين مكونات الخلطة، دون الإخلال بالمنطق الفيزيائي الحاكم لسلوك البيتون.

2- تحليل الحساسية

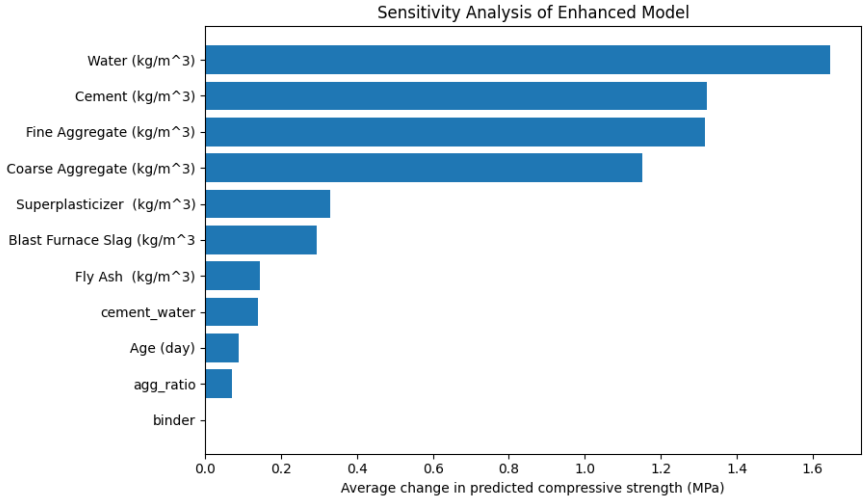
تمَّ إجراء تحليل الحساسية للنموذج المُحسَّن من خلال زيادة قيمة كل متغير من متغيرات الخلطة على حدة بنسبة 5%، مع تثبيت باقي المتغيرات دون تغيير، وذلك لدراسة مدى استجابة مقاومة الضغط المتوقعة لتغيرات محدودة في قيم المُدخلات.

يبيّن الجدول (5) درجة حساسية كل متغير أو ميّزة على مقاومة الضغط المتوقعة، بينما يَعرض الشكل (3) التمثيل البياني لهذه الدرجات.

الجدول (5) درجة حساسية متغيرات الخلطة

المتغيّر/ الميّزة	الحساسية

الماء	1.6447
الإسمنت	1.3219
الحصويات الناعمة	1.3157
الحصويات الخشنة	1.1505
الملدّن	0.3295
خبث الأفران	0.2940
الرماد المتطاير	0.1437
نسبة الإسمنت إلى الماء	0.1399
العمر	0.0873
نسبة الحصويات	0.0705
المواد الرابطة	0.0000



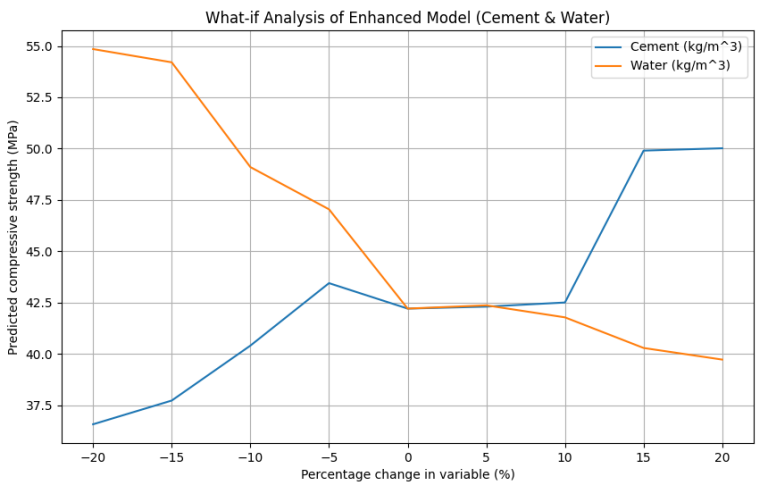
الشكل (3) التمثيل البياني لدرجة حساسية متغيرات الخلطة

يُبيّن الجدول (5) والشكل (3) أنَّ الإسمنت والماء يمتلكان أعلى درجات الحساسية، مما يجعلهما المتغيرين الأكثر تأثيراً على مقاومة الضغط المتوقعة، وبالتالي يعكس الدور الأساسي لهذين المكونين في تكوين البنية الداخلية للبيتون والتحكم في نسبة الإسمنت إلى الماء. تليهما الحصويات الناعمة والخشنة بدرجات حساسية مرتفعة نسبياً، حيث تسهم في ملء الفراغات وتوزيع الأحمال داخل الخلطة. أما الملدّن والإضافات فقد أظهرت تأثيراً

متوسطاً، حيث يحسّن الملدن قابلية التشغيل للخلطة، بينما تعمل الإضافات على تحسين التفاعل الكيميائي وملء الفراغات الدقيقة، مما يدعم تحسين الخواص الثانوية للبيتون.
من جهة أخرى، تبيّن أنَّ الميزات المشتقة (نسبة الإسمنت إلى الماء، نسبة الحصويات، العمر والمواد الرابطة)، لها تأثير محدود على المقاومة، مما يشير إلى أن دورها مكمّل يهدف لتحسين دقة النموذج دون التأثير على السلوك الفيزيائي للخلطة البيتونية.

3- تحليل "ماذا لو؟"

تمَّ إجراء تحليل "ماذا لو؟" على النموذج المُحسَّن، حيث تمَّ اختيار الإسمنت والماء كمتغيرين رئيسيين نظراً لأهميتهما في تحديد مقاومة الضغط للبيتون، مع تثبيت باقي متغيرات الخلطة عند قيمها المتوسطة.
يبيّن الشكل (4) التغير في مقاومة الضغط المتوقعة عند تعديل نسب الإسمنت والماء ضمن مجال يتراوح بين (20%−) و (20%+)، والناتج عن تحليل "ماذا لو؟".



الشكل (4) تحليل "ماذا لو؟" تأثير الإسمنت والماء على مقاومة الضغط

أظهرت نتائج التحليل والموضّحة بيانياً بالشكل (4) ما يلي:

– وجود علاقة طردية واضحة بين كمية الإسمنت ومقاومة الضغط، حيث أدّت زيادة محتوى الإسمنت حتى (20%+) إلى ارتفاع تدريجي في مقاومة الضغط من حوالي 42 MPa إلى ما يقارب 50 MPa، في حين أدّى تقليل كمية الإسمنت إلى انخفاض واضح في المقاومة. ويُعزى ذلك إلى الدور الأساسي للإسمنت في تكوين الهيكل الداخلي للعجينة الإسمنتية وتأثيره المباشر على نسبة الإسمنت إلى الماء.

– وجود علاقة عكسية قوية بين محتوى الماء ومقاومة الضغط، حيث أنَّ تقليل كمية الماء بنسبة 20% أدّى إلى زيادة مقاومة الضغط إلى نحو 55 MPa، في حين أنَّ زيادة كمية الماء أدّت إلى انخفاض تدريجي في المقاومة، مما يعكس الدور الحاسم للماء في التحكم بمسامية العجينة الإسمنتية وتكوّن المسارات الضعيفة داخلها.

5- الاستنتاجات والتوصيات

5-1- الاستنتاجات

- أظهر النموذج المحسّن (Enhanced Model) أداءً متفوقاً مقارنةً بالنموذج الأساسي، مع زيادة دقة التنبؤ إلى 0.931 وانخفاض متوسط الأخطاء RMSE وMAE، مما يعكس فعالية إضافة الميزات المشتقة وضبط المعاملات الفائقة، ويعزز موثوقية التنبؤ بمقاومة البيتون على الضغط.
- أظهرت نتائج تحليل الأهمية والحساسية أنَّ الإسمنت والماء هما المكوّنان الأكثر تأثيراً على مقاومة الضغط، بينما تلعب الحصويات والملدّنات والإضافات دوراً ثانوياً أو مكملاً، مما يعزز فهم دور كل مكوّن، ويحوّل نموذج التعلم الآلي من أداة تنبؤية إلى أداة تفسيرية هندسية أيضاً.
- أظهر تحليل "ماذا لو؟" علاقة طردية واضحة بين محتوى الإسمنت ومقاومة الضغط، وعلاقة عكسية بين محتوى الماء ومقاومة الضغط، مما يتيح إمكانية محاكاة التغييرات النسبية في المكونات، والتنبؤ بتأثيرها دون الحاجة إلى إجراء تجارب مخبرية إضافية.

❖ توفّر النتائج السابقة إطاراً متكاملاً لتقييم وتحسين النماذج التنبؤية لمقاومة الضغط للبيتون من جهة، وتبيّن أهمية دمج نماذج التعلم الآلي مع تقنيات التحليل التفسيري من جهة أخرى، مما يُسهم في تعزيز موثوقية النماذج وربط مخرجاتها بالسلوك الفيزيائي للخلطة البيتونية، ويدعم اتخاذ قرارات تصميمية دقيقة وموثوقة لتطوير خلطات بيتونية أكثر كفاءة واستدامة.

5-2- التوصيات

- الاستفادة من النماذج المحسّنة قبل إجراء التجارب المخبرية، لتقليل الوقت والتكاليف وزيادة موثوقية التنبؤ.
- محاكاة سيناريوهات التغييرات، لتقييم تأثير التغييرات النسبية في مكونات الخلطة على مقاومة الضغط، قبل تنفيذ الخلطات الفعلية.
- توسيع نطاق الدراسة ليشمل أنواعاً مختلفة من الإسمنت والإضافات.
- دراسة تأثير العوامل البيئية مثل درجات الحرارة والرطوبة، لتطوير نماذج أكثر شمولية وموثوقية.
- إنشاء منصات حاسوبية تمكّن المهندسين والمصممين من التفاعل مع النموذج والتنبؤ بالنتائج، بدلاً من الاعتماد على الحسابات اليدوية أو التجارب المخبرية.

المراجع

[1] ALMUTAIRI, A. 2025, Explainable machine learning based prediction of compressive strength in sustainable recycled aggregate self compacting concrete using SHAP analysis, Sustainability, Vol.17, No. 24, 11334.

[2] BASEER, H. A., ALI, G.G.M.N. 2026, Machine learning-based compressive strength prediction in pervious concrete, Applied Sciences, Vol.7, No.1, p.3.

[3] FU, H., ZHOU, X., XU, P., & SUN, D. 2025, Prediction of compressive strength of concrete using explainable machine learning models, Materials, Vol.18, No.21, P.5009.

[4] LI, G. 2023, Prediction of Concrete Strength Using XGBoost. Highlights in Science, Engineering and Technology, Vol.39, 311–314.

[5] LIU, K., ZHANG, L., WANG, W., ZHANG, G., XU, L., FAN, D., & YU, R. 2023, Development of compressive strength prediction platform for concrete materials based on machine learning techniques, Journal of Building Engineering, Vol.80, 107977.

[6] LV, Q., ZHANG, J., ZHANG, L., ZHAO, H., & REN, J. 2025, Machine learning‐based optimization of concrete strength using interpretable models, Materials Today Communications, Vol.47, 112872.

[7] MAHMOOD, M. S., ALI, T., INAM, I., et al. 2025, Machine learning prediction and explainability analysis of high strength glass powder concrete using SHAP, PDP, and ICE, Scientific Reports, Vol.15, No.1, 22089.

[8] WANG, J., DENG, J., LI, S., et al. 2025, Explainable machine learning for multicomponent concrete: Predictive modeling and feature interaction insights, Materials, Vol.18, No.19, 4456.

[9] YANG, S., ZHONG, J., GAN, B., SUN, Y., BU, C., & ZHANG, M. 2025, Prediction and sensitivity analysis of foam concrete compressive strength based on machine learning techniques with hyper parameter optimization, Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol.144, No.3, 2943–2967.

[10] YEH, I. C. 1998, Modeling of Strength of High‐Performance Concrete Using Artificial Neural Networks, Cement and Concrete Research, Vol.28, No.12, 1797–1808.

[11] YEH, I. C. 1998, Concrete compressive strength [Dataset], UCI Machine Learning Repository. https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Concrete+Compressive+Strength

الملحق (1) كود بناء وتقييم أداء نموذج XGBoost

```
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from xgboost import XGBRegressor
from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error
data = pd.read_excel("mix.xlsx")
X = data.iloc[:, 0:8]
y = data.iloc[:, 8]
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3,
random_state=42)
model = XGBRegressor(n_estimators=100, learning_rate=0.1,
max_depth=3, random_state=42, objective='reg:squarederror')
model.fit(X_train, y_train)
y_pred = model.predict(X_test)
r2 = r2_score(y_test, y_pred)
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
rmse = mse**0.5
mae = mean_absolute_error(y_test, y_pred)
print("R²:", r2)
print("MSE:", mse)
print("RMSE:", rmse)
print("MAE:", mae)
```

الملحق (2) كود تحسين نموذج XGBoost باستخدام الميّزات المشتقة وضبط المعاملات

```
import pandas as pd
from xgboost import XGBRegressor
from sklearn.model_selection import train_test_split,
RandomizedSearchCV, cross_val_score
from sklearn.metrics import r2_score, mean_squared_error
from scipy.stats import randint, uniform
import numpy as np
data = pd.read_excel("mix.xlsx")
X = data.iloc[:, 0:8].copy()
y = data.iloc[:, 8].copy()
X["cement_water"] = X.iloc[:, 0] / (X.iloc[:, 1] + 1e-5)
X["binder"] = X.iloc[:, 0] + X.iloc[:, 4] + X.iloc[:،5]
```

```
X["agg_ratio"] = X.iloc[:, 2] / (X.iloc[:, 3] + 1e-5)
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3,
random_state=42)
xgb = XGBRegressor(objective="reg:squarederror", random_state=42)
param_dist = {
"n_estimators": randint،(600 ،1201)
"max_depth": randint،(4 ،7)
"learning_rate": uniform،(0.03 ،0.04)
"subsample": uniform،(0.8 ،0.2)
"colsample_bytree": uniform،(0.8 ،0.2)
"gamma": uniform،(0 ،0.2)
"reg_alpha": uniform،(0.2 ،0)
"reg_lambda": uniform(1 ،1)}
random_search = RandomizedSearchCV(xgb ،
param_distributions=param_dist،n_iter=40,
cv=5،scoring="r2،"n_jobs=-1،verbose=1،random_state=42)
random_search.fit(X_train, y_train)
model = random_search.best_estimator_
y_pred = model.predict(X_test)
r2 = r2_score(y_test, y_pred)
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred))
print("R2 =", r2)
print("RMSE =", rmse)
print("MAE =", mae)
```

الملحق (3) كود تحليل أهمية المتغيرات الفردية للنموذج المحسّن Enhanced model

```
import joblib
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
model = joblib.load("Enhanced model.pk1")
feature_names=model.feature_names_in_importances=
model.feature_importances_
importance_df = pd.DataFrame({"Feature":
feature_names"،Importance":
importances}).sort_values(by="Importance", ascending=False)
plt.figure()
plt.barh(importance_df["Feature"], importance_df["Importance"])
plt.gca().invert_yaxis()
plt.xlabel("Importance")
```

```
plt.title("Feature Importance - Enhanced Model")
plt.show()
print(importance_df)
```

الملحق (4) كود تحليل أهمية المتغيرات المُجمّعة للنموذج المحسّن Enhanced model

```
import joblib
import pandas as pd
model = joblib.load("Enhanced model.pk1")
features = ['Cement (kg/m^3)'،'Blast Furnace Slag (kg/m^3)،'
'Fly Ash (kg/m^3)'،'Water (kg/m^3)'،'Superplasticizer (kg/m^3)،'
'Coarse Aggregate (kg/m^3)'،'Fine Aggregate (kg/m^3)'،'Age (day)،'
'cement_water'،'binder'،'agg_ratio']
importances = model.feature_importances_
df = pd.DataFrame({ "feature": features، "importance": importances})
group_physical= ['Cement (kg/m^3)'،'Age (day)' ]
group_basic = ['Blast Furnace Slag (kg/m^3)'،'Fly Ash (kg/m^3)،'
'Water (kg/m^3)'،'Superplasticizer (kg/m^3)'،'Coarse Aggregate
(kg/m^3)،'
'Fine Aggregate (kg/m^3)']
group_derived = ['cement_water'،'binder'،'agg_ratio' ]
physical_importance =
df[df["feature"].isin(group_physical)]["importance"].sum()
basic_importance =
df[df["feature"].isin(group_basic)]["importance"].sum()
derived_importance =
df[df["feature"].isin(group_derived)]["importance"].sum()
total = physical_importance + basic_importance + derived_importance
print("Physical importance =", physical_importance)
print("Basic importance =", basic_importance)
print("Derived importance =", derived_importance)
print("Physical (%) =", physical_importance / total * 100)
print("Basic (%) =", basic_importance / total * 100)
print("Derived (%) =", derived_importance / total * 100)
```

الملحق (5) كود تحليل الحساسية للنموذج المحسّن Enhanced model

```
import joblib
import pandas as pd
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
model = joblib.load("Enhanced model.pk1")
data = pd.read_excel("mix.xlsx")
features = ['Cement (kg/m^3)'،'Blast Furnace Slag (kg/m^3)،'
'Fly Ash (kg/m^3)'،'Water (kg/m^3)'،'Superplasticizer (kg/m^3)،'
'Coarse Aggregate (kg/m^3)'،'Fine Aggregate (kg/m^3)'،'Age (day)،'
data['cement_water'] = data['Cement (kg/m^3)'] / (data['Water (kg/m^3)']
+ 1e-5)
data['binder'] = data['Cement (kg/m^3)'] + data['Blast Furnace Slag
(kg/m^3'] + data['Fly Ash (kg/m^3)']
data['agg_ratio'] = data['Coarse Aggregate (kg/m^3)'] / (data['Fine
Aggregate (kg/m^3)'] + 1e-5)
features += ['cement_water', 'binder', 'agg_ratio']
sensitivity{} =
delta = 0.05
y_pred_orig = model.predict(data[features])
for feature in features:
X_mod = data.copy()
X_mod[feature] = X_mod[feature] * (1 + delta)
y_pred_mod = model.predict(X_mod[features])
mean_change = np.mean(np.abs(y_pred_mod - y_pred_orig))
sensitivity[feature] = mean_change
sensitivity_df = pd.DataFrame.from_dict(sensitivity, orient='index',
columns=['Mean Change'])
sensitivity_df = sensitivity_df.sort_values(by='Mean Change',
ascending=False)
print(sensitivity_df)
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.barh(sensitivity_df.index, sensitivity_df['Mean Change'])
plt.gca().invert_yaxis()
plt.xlabel('Average change in predicted compressive strength (MPa)')
plt.title('Sensitivity Analysis of Enhanced Model')
plt.show()
```

الملحق (6) كود تحليل "ماذا لو؟" للنموذج المحسّن Enhanced model

```
import joblib
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
model = joblib.load("Enhanced model.pk1")
data = pd.read_excel("mix.xlsx")
data['cement_water'] = data['Cement (kg/m^3)'] / (data['Water (kg/m^3)']
+ 1e-5)
data['binder'] = data['Cement (kg/m^3)'] + data['Blast Furnace Slag
(kg/m^3'] + data['Fly Ash  (kg/m^3['(
data['agg_ratio'] = data['Coarse Aggregate (kg/m^3)'] / (data['Fine
Aggregate (kg/m^3)'] + 1e-5)
features = ['Cement (kg/m^3)'،'Blast Furnace Slag (kg/m^3)،'
'Fly Ash (kg/m^3)'،'Water (kg/m^3)'،'Superplasticizer (kg/m^3)،'
'Coarse Aggregate (kg/m^3)'،'Fine Aggregate (kg/m^3)'،'Age (day)،'
'cement_water'،'binder'،'agg_ratio']
sample = data[features].mean().to_frame().T
variables_to_test = ['Cement (kg/m^3)', 'Water (kg/m^3)']
deltas = np.linspace(-0.2, 0.2, 9)
plt.figure(figsize=(10,6))
for var in variables_to_test: predicted =[]
for d in deltas:
temp = sample.copy()
temp[var] = temp[var] * (1 + d)
temp['cement_water'] = temp['Cement (kg/m^3)'] / (temp['Water
(kg/m^3)'] + 1e-5)
temp['binder'] = temp['Cement (kg/m^3)'] + temp['Blast Furnace Slag
(kg/m^3'] + temp['Fly Ash  (kg/m^3)']
temp['agg_ratio'] = temp['Coarse Aggregate (kg/m^3)'] /
(temp['Fine Aggregate (kg/m^3)'] + 1e-5)
y_pred = model.predict(temp[features])[0]
predicted.append(y_pred)
plt.plot(deltas*100, predicted, label=var)
plt.xlabel('Percentage change in variable (%)')
plt.ylabel('Predicted compressive strength (MPa)')
plt.title('What-if Analysis of Enhanced Model (Cement & Water)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

نمذجة الطلب والعرض المائي لحوض نهر الكبير الجنوبي بسوريا

د.م.كنان الاحمد : عضو هيئة تعليمية بكلية الهندسة المدنية – جامعة حمص
م.فتاة خضور :مهندسة مدنية استشارية–حمص

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تحليل التوازن بين العرض والطلب المائي في حوض نهر الكبير الجنوبي في سورية باستخدام نموذج WEAP21 بوصفه أداة متقدمة للتخطيط المائي والإدارة المتكاملة. وقد تم بناء نموذج تمثيلي للنظام المائي في منطقة الدراسة اعتمادًا على البيانات المناخية والهيدرولوجية والخصائص الزراعية والسكانيّة مع تمثيل مصادر المياه المختلفة المتمثلة في الأنهار والروافد والينابيع والسدود إضافة إلى مواقع الطلب المائي المتمثلة في الأراضي الزراعية والتجمعات السكانية.

أظهرت نتائج السيناريو المرجعي أن إجمالي الاحتياج المائي الصافي في منطقة الدراسة يبلغ نحو34.5 مليون متر مكعب سنويًا ويقدر العجز المائي بنحو 30.9 مليون متر مكعب سنويًا يتركز بشكل رئيسي في القطاع الزراعي. كما بيّنت نتائج سيناريو النمو السكاني أن الطلب المنزلي سيرتفع من نحو 690 ألف متر مكعب سنويًا في بداية فترة الدراسة إلى ما يقارب مليون متر مكعب سنويًا في نهايتها إلا أن الموارد المائية الحالية قادرة على تغطية هذا الطلب بنسبة تقارب 100% دون حدوث عجز مائي في القطاع المنزلي. وفيما يتعلق بسيناريو الجفاف الذي يفترض انخفاض الواردات المائية بنسبة 20% لمدة ثلاث سنوات متتالية فقد أظهرت النتائج أن العجز المائي لا يزداد بصورة ملحوظة مقارنة بالسيناريو المرجعي مما يشير إلى أن المشكلة الأساسية ترتبط بكفاءة إدارة وتوزيع المياه أكثر من ارتباطها بتوفر الموارد المائية. أما في سيناريو تحسين كفاءة شبكات الري من 65% إلى 75 % فقد انخفض العجز المائي الزراعي من 30.9 مليون متر مكعب إلى حوالي 26 مليون متر مكعب سنويًا بحلول عام 2030.

الكلمات المفتاحية: نمذجة العرض والطلب المائي، WEAP21، حوض نهر الكبير الجنوبي، العجز المائي، كفاءة الري.

Water Supply–Demand Modeling in the Southern Al-Kabir River Basin, Syria

Dr.Kinan Alahmad:Faculty Member At The Faculty Of Civil Engineering,Homs University
Eng.Fatat Khadour:Consulting Civil Engineer,Homs,Syria

Abstract

This study aims to analyze the balance between water supply and demand in the Southern Al-Kabir River Basin in Syria using the Water Evaluation and Planning System (WEAP21) as an advanced tool for water planning and integrated water resources management. A representative model of the basin's water system was developed based on climatic and hydrological data, as well as agricultural and demographic characteristics. The model incorporates the various water sources in the basin, including rivers, tributaries, springs, and reservoirs, in addition to the main water demand sites represented by agricultural lands and population settlements.

The results of the reference scenario indicate that the total net water demand in the study area reaches approximately 34.5 million m^3 per year, while the estimated water deficit is about 30.9 million m^3 annually, mainly concentrated in the agricultural sector. The population growth scenario shows that domestic water demand is expected to increase from approximately 0.69 million m^3 per year at the beginning of the study period to nearly 1 million m^3 per year by the end of the period. However, the current water resources are capable of meeting this demand with nearly 100% coverage, without a deficit in the domestic water supply sector.

Regarding the drought scenario, which assumes a 20% reduction in water inflows for three consecutive years, the results indicate that the water deficit does not increase significantly compared with the reference scenario. This suggests that the main challenge is related more to the efficiency of water management and distribution than to the actual availability of water resources. In the irrigation efficiency improvement scenario, where irrigation efficiency increases from 65% to 75%, the agricultural water deficit decreases from 30.9 million m^3 to approximately 26 million m^3 per year by 2030

Key Words: Water Supply–Demand Modeling, WEAP21, Southern Al-Kabir River Basin, Water Deficit, Irrigation Efficiency.

1- المقدمة:

تشكل الموارد المائية عنصرًا حاسمًا في دعم استقرار المجتمعات واستمرار أنشطتها الاقتصادية والبيئية نظرًا لما للمياه من دور مباشر في تحسين مستوى المعيشة وتعزيز الإنتاج الزراعي والصناعي والحفاظ على التوازن البيئي. غير أن العقود الأخيرة شهدت تصاعدًا ملحوظًا في الضغوط الواقعة على هذه الموارد سواء بفعل التقلبات المناخية أو نتيجة الممارسات البشرية. الأمر الذي أفضى إلى تعقيد قضايا إدارة المياه ولا سيما في الأقاليم ذات الخصائص المناخية الجافة وشبه الجافة.

وفي سورية برزت مظاهر هذه الإشكالية بشكل متزايد نتيجة عدم انتظام الهطولات المطرية وتفاوتها مكانيًا وزمانيًا إضافة إلى تكرار سنوات الجفاف وازدياد الطلب على المياه لتغطية الاحتياجات السكانية والزراعية. كما أدى الاستمرار في الاعتماد على أنماط تقليدية في استثمار المياه إلى جانب ضعف التكامل بين مختلف قطاعات الاستخدام إلى تفاقم الضغط على الموارد المائية السطحية والجوفية، وظهور مؤشرات واضحة على تنامي حالة الإجهاد المائي.

ويحتل حوض نهر الكبير الجنوبي مكانة مهمة ضمن الأحواض المائية في الساحل السوري، إذ يُعد مصدرًا أساسيًا لتأمين مياه الشرب والري ويسهم بشكل مباشر في دعم النشاط الزراعي في المناطق التي يمر بها. إلا أن هذا الحوض يواجه تحديات متعددة، تتمثل في التذبذب الملحوظ في كميات الجريان السنوي فضلًا عن محدودية توافر قواعد بيانات شاملة ودقيقة تساعد على توصيف وضعه المائي وتقييمه بصورة علمية متكاملة.

إن التعامل مع هذه التحديات يفرض ضرورة تبنّي نهج حديث في إدارة الموارد المائية، يقوم على تجاوز الأساليب التقليدية، والاعتماد على مقاربات أكثر شمولًا ومرونة تستند إلى التحليل العلمي واستخدام أدوات النمذجة المائية لدعم عملية اتخاذ القرار.

2- هدف البحث:

تنبع أهمية هذا البحث من كونه يوفّر إطارًا علميًا لتحليل التوازن المائي في حوض نهر الكبير الجنوبي من خلال دراسة العلاقة بين الموارد المائية المتاحة والطلب المتزايد عليها

مع الأخذ في الاعتبار تأثير العوامل المناخية والتنموية المختلفة. ويسهم هذا التحليل في فهم ديناميكية النظام المائي للحوض وتحديد مواطن الخلل والضغوط الحالية والمستقبلية ضمن آفاق زمنية قصيرة وطويلة الأمد.

كما تتجلى أهمية البحث في سعيه إلى تقييم واقع إدارة الموارد المائية في الحوض بالاعتماد على دراسة خصائصه الهيدرولوجية وتقدير الاحتياجات المائية لمختلف القطاعات وتحليل الفجوة المحتملة بين العرض والاستهلاك. إضافة إلى ذلك يهدف البحث إلى تقديم مجموعة من البدائل والإجراءات الإدارية والتقنية التي من شأنها دعم الاستخدام المستدام للمياه وتزويد متخذي القرار بمخرجات علمية تساعدهم على صياغة سياسات مائية أكثر كفاءة وملاءمة لخصوصية المنطقة وظروفها الطبيعية.

3- طرائق البحث والمنهجية:

اعتمدت هذه الدراسة منهجية علمية تحليلية تهدف إلى تقييم التوازن المائي بين احتياجات القطاع الزراعي ومتطلبات التجمعات السكانية وذلك من خلال تمثيل واقعي لمصادر المياه المتاحة وآلية توزيعها على مختلف قطاعات الاستخدام. وقد تم توظيف نموذج تقييم وإدارة المياه (WEAP21) بوصفه أداة تخطيط ونمذجة قادرة على محاكاة النظام المائي لمنطقة الدراسة وتحليل مكوناته الحالية والمستقبلية. /1/

فيما يخص القطاع الزراعي جرى استخدام النموذج لتقدير الاحتياجات المائية للمحاصيل مع محاكاة كفاءة نظم الري وتوزيع المياه خلال الدورات الزراعية المختلفة، إضافة إلى إمكانية دراسة تأثير السيناريوهات المناخية المحتملة على الطلب المائي. أما بالنسبة للاستخدامات المنزلية فقد أتاح النموذج تقدير الطلب المائي للتجمعات السكانية استنادًا إلى عدد السكان ومعدلات الاستهلاك الفردي ومعدلات النمو السكاني فضلًا عن تحليل كفاءة شبكات التزويد ونسب الفاقد المائي.

4- الدراسات المرجعية :

4-1- تتناول هذه الدراسة (Hassan,etc, 2024) تقييم وإدارة منظومة إمدادات المياه والطلب عليها في محافظة الفيوم بمصر باعتبارها نموذجًا مصغرًا للتحديات المائية التي تواجه البلاد. تقع منطقة الدراسة في منخفض الفيوم جنوب غرب القاهرة وتعتمد بشكل

رئيسي على المياه المتفرعة من نهر النيل إضافة إلى المياه الجوفية الضحلة وإعادة استخدام مياه الصرف الزراعي. اعتمدت الدراسة على نموذج WEAP21 كأداة لدعم اتخاذ القرار في تخطيط وإدارة الموارد المائية حيث تمت محاكاة الوضع الحالي لعام 2017 وسيناريوهات مستقبلية حتى عام 2050. شملت السيناريوهات تحليل النمو السكاني المتسارع وزيادة الطلب الزراعي وتحسين كفاءة الري وإعادة استخدام المياه غير التقليدية. أظهرت النتائج وجود عجز مائي متزايد خاصة في القطاع الزراعي قد يصل إلى أكثر من 3 مليارات م³ سنويًا بحلول 2050 ما يؤكد الحاجة إلى سياسات متكاملة لإدارة الطلب وتحسين كفاءة استخدام المياه./3/

4-2- تتناول دراسة(Akanbi,etc,2020) التقييم المتكامل لتأثيرات التغير المناخي على التوفر المائي الحالي والمستقبلي في حوض نهر فال بجنوب أفريقيا وهو أحد أهم الأحواض المائية ذات الأهمية الاقتصادية والاستراتيجية إذ يخدم أكثر من 45% من سكان البلاد ويساهم بنحو 24% من الناتج المحلي الإجمالي. اعتمدت الدراسة على دمج نماذج المناخ الإقليمية (CORDEX) مع نموذج WEAP21 لمحاكاة التوازن بين العرض والطلب المائي مع الأخذ في الاعتبار الضغوط السكانية والاقتصادية المتزايدة.

أظهرت النتائج وجود عجز مائي في الحوض حيث يتجاوز الطلب المائي المتاح الطبيعي مما يستدعي الاعتماد على تحويلات مائية بين الأحواض. وتشير السيناريوهات المناخية إلى ارتفاع ملحوظ في درجات الحرارة وانخفاض في الهطول المطري قد يصل إلى 30% بنهاية القرن الأمر الذي يؤدي إلى تراجع الجريان السطحي الشهري بنسبة تتراوح بين 8-10% خاصة خلال أشهر الصيف الحرجة للزراعة. كما بينت سيناريوهات الطلب المستقبلي أن النمو السكاني غير المصحوب بإجراءات إدارة الطلب سيؤدي إلى اتساع فجوة العجز المائي في حين أن تطبيق استراتيجيات ترشيد الاستهلاك وإعادة استخدام المياه يمكن أن يخفف من حدة هذا العجز. وتؤكد الدراسة ضرورة تبني سياسات تكيف متكاملة لضمان الاستدامة المائية على المستوى الشهري داخل الحوض . /2/

4-3- تستعرض هذه الدراسة (Takele ,etc,2024) تحليل الطلب والعرض المائي في حوض النيل الأزرق الأعلى ضمن إطار سيناريوهات التنمية المائية المستقبلية وتأثيرات تغير المناخ بهدف تقديم تقييم شامل للتوازن المائي في الحوض. أظهرت النتائج أن الوضع الحالي يتميز بتوازن نسبي بين الموارد المائية المتاحة واحتياجات الري غير أن سيناريوهات تغير المناخي تشير إلى حدوث عجز مائي. وقد عزت الدراسة هذا النقص إلى التزامن بين آثار تغير المناخ على إمدادات المياه والتوسع المستمر في الأنشطة الزراعية. وتشير الاستنتاجات إلى أن تعزيز إدارة الموارد المائية إلى جانب ترشيد استهلاك المياه يمثل خطوة حاسمة لتقليل العجز المتوقع مما يؤكد على أهمية اعتماد سياسات مائية مستدامة لمواجهة التحديات المستقبلية في الحوض. /4/

4-4- استهدفت هذه الدراسة (عبدالله ،2016) تحليل إدارة الموارد المائية في حوض نهر السن الساحلي في سورية من خلال تطبيق نهج التخطيط المتكامل باستخدام نموذج WEAP21 لتقييم حالة التوازن المائي واستشراف السيناريوهات المستقبلية المحتملة. وقد تم اعتماد عدة سيناريوهات ضمن الدراسة منها استمرار الوضع الحالي وزيادة الطلب على المياه نتيجة النمو السكاني والتوسع الزراعي إضافة إلى سيناريو يركز على تحسين كفاءة استخدام المياه. وأظهرت النتائج أن الحوض يواجه نقصاً مائياً متنامياً إذا استمر الاستهلاك بالمعدل الحالي لا سيما خلال سنوات الجفاف بينما أشارت النتائج أيضاً إلى أن تعزيز كفاءة الري وتقليل الفاقد في شبكات التوزيع يساهم بشكل كبير في الحد من هذا النقص وتحسين موثوقية الإمداد المائي. كما أكدت الدراسة أن تبني الإدارة المتكاملة للموارد المائية يمثل السبيل الأمثل لضمان استدامة المياه في حوض السن./5/

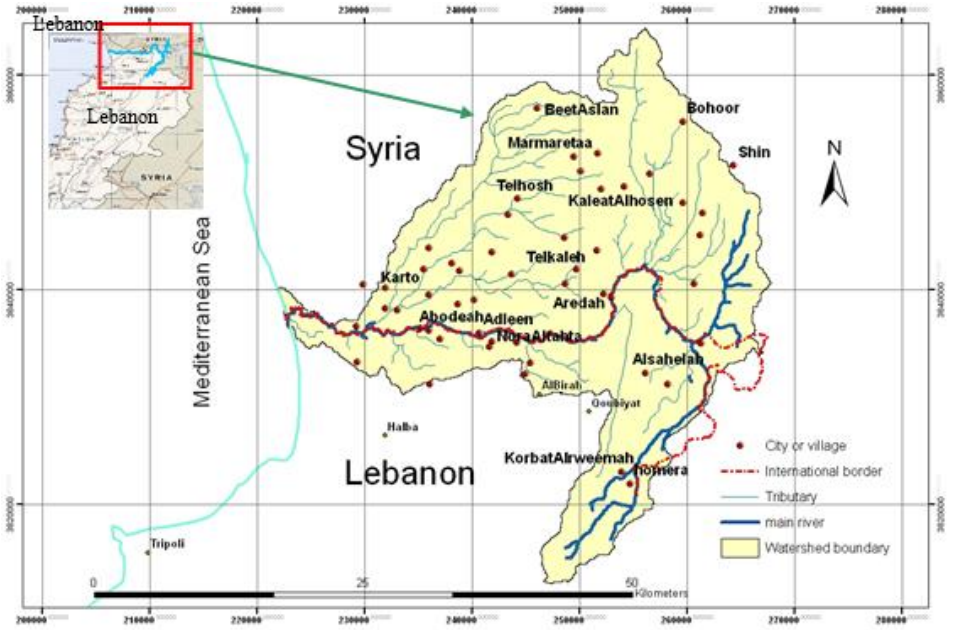
4-5- تشير الدراسة (خزام ،2008) إلى تطوير نموذج متكامل لإدارة الموارد المائية في حوض العاصي الأعلى الممتد من الحدود السورية–اللبنانية حتى سد قطينة بهدف تحقيق التوازن بين الموارد المائية المتاحة والطلب المتزايد عليها. اعتمدت الدراسة على برنامج WEAP21 لمحاكاة سيناريوهات مستقبلية تأخذ بعين الاعتبار النمو السكاني وازدياد الطلب في مختلف القطاعات. أظهرت النتائج أن تحسين كفاءة شبكات الري ومياه الشرب إلى جانب ترشيد الاستهلاك الفردي يمكن أن يخفّض العجز المائي بنسبة تصل إلى

65%. كما بيّنت أهمية استثمار المنشآت المائية مثل بحيرة قطينة وسد زيتا في تعزيز كفاءة الإدارة المائية خاصة خلال فترات الجفاف. وخلصت الدراسة إلى إمكانية القضاء الكامل على العجز المائي بحلول عام 2030 عند توافر واردات مائية باحتمالية 75%، وذلك بشرط رفع كفاءة شبكات الشرب إلى 80% وشبكات الري إلى 75% مع الاعتماد المتكامل على المياه السطحية والجوفية./8/

4-6- تناولت دراسة (الاسعد واخرون ،2015) تقييم وإدارة الموارد المائية في حوض نهر الصنوبر في محافظة اللاذقية الذي يُعد النهر فيه المصدر الرئيسي للمياه على مساحة تقارب 268.8 كم². ركّزت على التحديات المرتبطة بالتغيرات المناخية وتزايد الطلب على المياه مع اعتماد النمذجة المائية باستخدام برنامج WEAP21 لتحليل الوضع الراهن. أظهرت النتائج أن تحسين تقنيات الري ولا سيما اعتماد الري بالتنقيط يمكن أن يساهم في تقليل استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 59% مما يعزز كفاءة استخدام الموارد المائية في الحوض./9/

5- منطقة البحث:

يمتد نهر الكبير الجنوبي على طول الحدود بين لبنان وسوريا تبلغ مساحة حوضه الكلية (ضمن الأراضي اللبنانية والسورية) حوالي 990 كم² منها 295 كم² تقع ضمن الأراضي اللبنانية. يمتد الحوض في اتجاه شرقي–غربي ويتراوح ارتفاعه بين سطح البحر وأعلى ارتفاع حوالي 2300 متر ، يجري النهر لمسافة 56 كم على طول الحدود بين لبنان وسوريا ويجمع مياهه من الروافد الموجودة على جانبي الحدود متجهًا من الشرق إلى الغرب حتى يصل إلى ساحل البحر الأبيض المتوسط عند خليج عكار على بعد 15 كم شمال طرابلس. يبلغ متوسط ميلان حوض النهر 12.8%./6/



الشكل (1) : خريطة نهر الكبير الجنوبي (منطقة وجود الدراسة)

6- بناء النموذج في برنامج (WEAP21) :

يُعد بناء النموذج الفيزيائي باستخدام برنامج WEAP21 خطوة أساسية لفهم ديناميكية الموارد المائية وتقييم إدارتها ضمن حوض الدراسة. ويعتمد إعداد هذا النموذج على الخصائص الطبيعية والمناخية للمنطقة والموارد المائية والأنشطة لتمثيل النظام المائي بشكل واقعي ليدعم تحليل الطلب على المياه وإدارة الموارد المائية بشكل مستدام.

حيث يتباين في منطقة الدراسة الهطول المطري تبعًا للعوامل الموسمية والجغرافية. ويتراوح متوسط الهطول المطري السنوي المسجل في الحوض بين 565 مم في محطة كرتو الواقعة على ارتفاع 55 مترًا فوق مستوى سطح البحر و 1180مم في محطة مرمريتا الواقعة على ارتفاع 527 مترًا فوق مستوى سطح البحر.

وتُظهر البيانات المناخية نمطًا عامًا متشابهًا في جميع المحطات، حيث يمتد موسم الهطول المطري من بداية شهر تشرين الاول وحتى أواخر شهر ايار مع تسجيل أعلى معدلات الهطول خلال شهر كانون الثاني، في حين تمتد الفترة الأكثر جفافًا من شهر حزيران حتى شهر ايلول. /6/

ويبلغ المتوسط السنوي للهطول المطري على مستوى حوض النهر حوالي 925مم وهو ما يعادل حجمًا إجماليًا من المياه يقارب 916 مليون متر مكعب سنويًا يخصّص منها نحو 273مليون متر مكعب للجانب اللبناني من الحوض.

يتميز حوض النهر بوجود شبكة تصريف مائي سطحي كثيفة. فبجانب مجرى النهر الرئيسي توجد مجموعة من الروافد الثانوية التي تسهم في تغذية النهر بالمياه.

ومن أبرز هذه الروافد :راويل، العروس، خليفة، شين، والصفا. وفيما يلي عرض موجز لبعض هذه الروافد الرئيسية: /6/

نهر راويل:

يُعد نهر راويل أحد الروافد الرئيسية لنهر الكبير الجنوبي حيث يجري من الشمال إلى الجنوب عبر سهل البقاع بطول يقارب 24كم .وتبلغ مساحة حوض تصريفه حوالي 113 كم² ويتغذى النهر بعدد من الينابيع. ويبين الجدول التالي قيم التصاريف في النهر.

الجدول (1):التصريف الشهري الوسطي لنهر راويل ل 30 عام بواحدة(m^3/sec) /7/

	Sep.	Aug.	Jul.	Jun.	May	Apr.	Mar.	Feb.	Jan.	Dec.	Nov.	Oct.
التصريف الوسطي	0.08	0.01	0.03	0.07	0.27	0.97	2.06	1.82	1.09	0.53	0.21	0.05

نهر خليفة:

يتجه مجرى نهر خليفة من الشمال الشرقي نحو الجنوب الغربي بطول يقارب 26كم . وتبلغ مساحة حوضه المائي حوالي 81كم² ويعد نبع خليفة المصدر الرئيسي لتغذية هذا النهر وتبلغ غزارة النبع $0.438\ m^3/sec$.

نهر الصفا:

يجري نهر الصفا من الجنوب الغربي باتجاه الشمال الشرقي ثم شمالًا بطول يقارب 30 كم .وتبلغ مساحة حوضه حوالي 118.8كم² ويعد نبع الصفا المصدر الأساسي لتغذية هذا النهر ويبين الجدول التالي قيم التصاريف في النهر.

الجدول (2):التصريف الشهري الوسطي لنهر الصفا ل 30 عام بواحدة(m^3/sec) /7/

	Sep.	Aug.	Jul.	Jun.	May	Apr.	Mar.	Feb.	Jan.	Dec.	Nov.	Oct.
التصريف الوسطي	0.30	0.33	0.40	0.51	0.69	1.84	2.033	3.18	2.04	1.14	0.4	0.27

وتشير الدراسات إلى وجود انخفاض تدريجي في كميات المياه المتدفقة خلال العقود الخمسة الأخيرة ويُعزى ذلك إلى تأثيرات التغير المناخي والاستغلال المفرط للينابيع الرئيسية التي تغذي النهر خاصة في الجانب اللبناني حيث تستخدم هذه الموارد بشكل رئيسي لتأمين المياه للاستخدامات المنزلية./6/

كما تم إنشاء ثلاثة سدود في الجانب السوري لأغراض الري وهي:

- سد المزينة بسعة تخزين تبلغ 19.2 مليون متر مكعب ويتغذى بالمياه القادمة من نهر راويل أحد روافد نهر الكبير الجنوبي.
- سد خليفة بسعة تخزين تبلغ 3 ملايين متر مكعب

سد تل حوش بسعة تخزين تبلغ 45 مليون متر مكعب. /6/ والذي يتزود بالمياه من وادي السدري ويبين الجدول التالي قيم التصاريف.

الجدول (3):التصريف الشهري الوسطي ل 30 عام بواحدة(m^3/sec) /7/

	Sep.	Aug.	Jul.	Jun.	May	Apr.	Mar.	Feb.	Jan.	Dec.	Nov.	Oct.
التصريف الوسطي	0	0	0	0	0	0.01	0.07	0.08	0.20	0.15	0	0

(الى السيد المحكم تم ذكر وتفصيل كمية الواردات في السيناريو المرجعي وفي شرح الشكل (2) وبشكل عام الواردات هي من الأنهار والينابيع ومن مياه الوديان الموسمية والسدود.. والواردات ليست ملبية للاحتياج الكلي لذلك حصل عجز مائي والجدول 3 هو التصريف الشهري الوسطي ل 30 سنة وهناك عدة جداول وقيم لغزارة ينابيع تدخل ضمن الواردات) كما تتميز منطقة الدراسة بتنوع الأنشطة الزراعية وبتعدد المحاصيل المزروعة حيث تنتشر زراعة عدد من المحاصيل الرئيسية التي تشكل أساس الإنتاج الزراعي في المنطقة ومن أبرزها (الأشجار المثمرة والقمح والخضار والبطاطا والذرة وفول الصويا والفول السوداني) وذلك وفقًا للخطة الزراعية المعتمدة من مديرية الزراعة (2023–2024). ولغرض تمثيل الواقع الزراعي بصورة أدق ضمن نموذج الدراسة تم اعتماد

التركيب المحصولي السائد وإدخال الدورات الزراعية المقترحة وذلك وفق التوزيع الموضح في الجدول.(4) .

الجدول (4): التركيب المحصولي للأراضي المروية

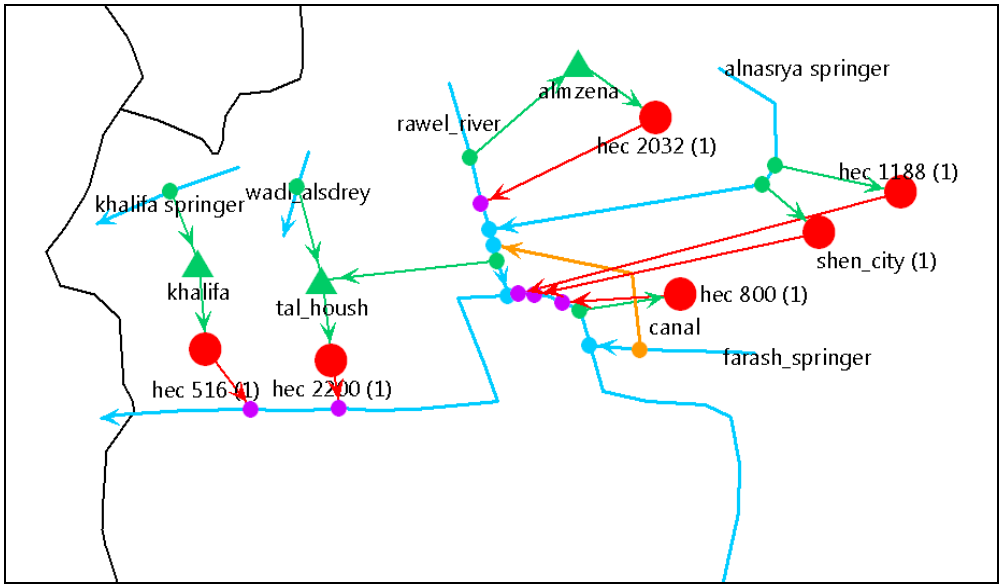
الأراضي المروية من سد المزينة (2032 هكتار) واليناييع (800 هكتار) ونبع الناصرية (1188 هكتار)		الأراضي المروية من سد تلحوش (2200 هكتار) وسد خليفة (516 هكتار)	
محاصيل	المساحة %	محاصيل	المساحة %
الأشجار المثمرة	26.9	الأشجار المثمرة	54.16
القمح	63.9	القمح	54
الخضار	3.28	الخضار	14.16
البطاطا	1	البطاطا	1
الذرة	10.2	فول سوداني	22
فول الصويا	9.35		

يوضح الجدول (5) والشكل (2) التمثيل التخطيطي للمشروع في واجهة الرسم.

الجدول (5) : الشكل ومايمثله من استخدام في البرنامج المذكور

الشكل	الوظيفة
	منطقة تمثل الاحتياج المائي (أراضي زراعية– تجمعات سكانية)
	قناة جر مياه رئيسية
	خط استجرار مياه من المصدر المائي نحو مواقع الاحتياج المائي
	ينابيع ومياه سطحية ومياه وادي السدري

الرواجع من مواقع الاحتياج المائي	
سد المزينة–تل حوش –خليفة	



الشكل (2) : المخطط العام لمنطقة الدراسة

نجد من الشكل (2) أن نهر الكبير الجنوبي يبدأ مساره من نبع الصفا يعبر منطقة الدراسة من الجنوب والممثل بالعنصر التخطيطي ( ) ويرفده بالمياه اثناء مساره نبع الفراش والذي تبلغ غزارته ($1.514 m^3/sec$) /6/ والذي يتم اخذ قناة مياه منه نحو نهر راويل وبمتابعه مسار نهر الكبير نجد انه يروي مساحات زراعية تقدر ب (800) هكتار والمتمثلة بالعنصر ( ) وبعدها نجد تقاطعه مع نهر راويل والذي تصب فيه مياه نبع الناصرية وباستعراض نهر راويل نجد انه يغذي سد المزينة والممثل بالعنصر التخطيطي ( ) حجم تخزينه (19.2) مليون متر مكعب ويقوم السد بدوره بري مساحات زراعية تقدر ب (2032) هكتار أما نبع الناصرية والذي تبلغ غزارته ($1.368 m^3/sec$) /6/ يقوم بتأمين المياه للتجمعات السكانية و مساحات زراعية تقدر ب (1188) هكتار بل إضافة لذلك يقوم وادي السدري بتزويد سد تل حوش بالمياه ،حيث حجم تخزينه (45) مليون متر مكعب والذي يقوم بدوره بري مساحات زراعية تقدر ب (2200) هكتار اما

سد خليفة،الذي حجم تخزينه (3) مليون متر مكعب فيزود بالمياه من نبع خليفة ويقوم الأخير بري مساحات زراعية تقدر ب (516) هكتار.

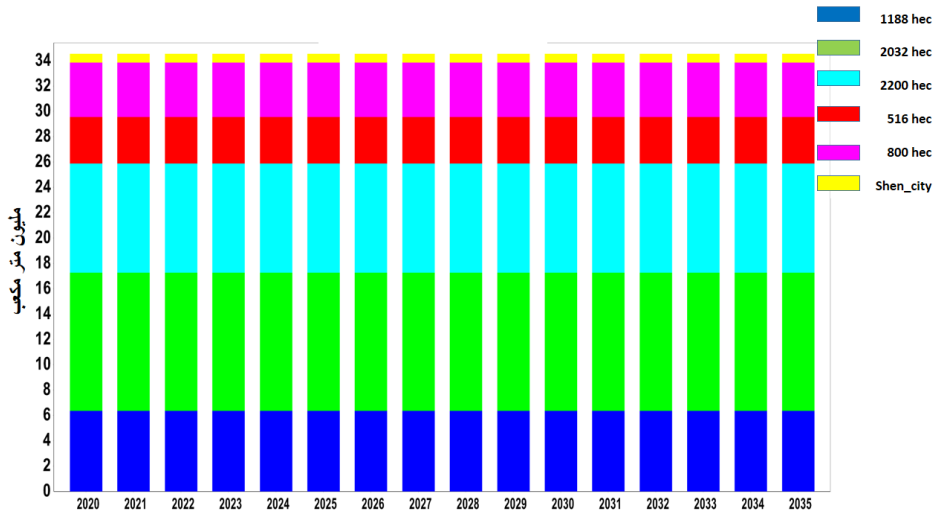
ويتم تصريف رواجع التجمعات السكانية والزراعية الى المجاري السطحية عن طريق العنصر الرسومي ( ) .

7-السيناريوهات :

7-1- السيناريو المرجعي :

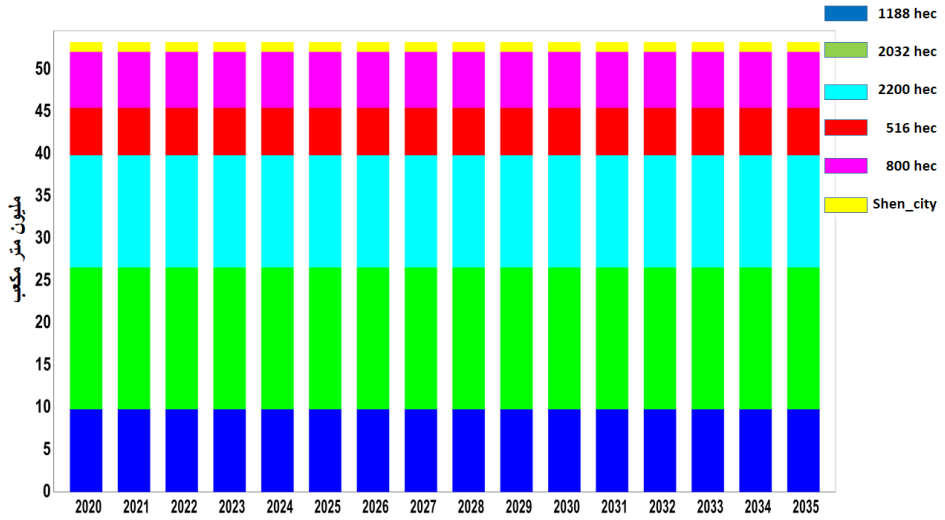
يمثل السيناريو المرجعي وصفًا تحليليًا للحالة الراهنة للنظام المائي من حيث كميات الموارد المائية المتاحة وأنماط استخدامها ويعكس هذا السيناريو الطريقة التي يعمل بها النظام حاليًا أو المسار المتوقع لتطوره مستقبلاً في حال استمرار الظروف القائمة والسياسات المطبقة دون إدخال أي تعديلات أو إجراءات جديدة ،لذلك يُستخدم كمرجع أساسي تُبنى عليه عمليات التحليل إذ تُقارن به نتائج السيناريوهات البديلة من أجل تقييم تأثير الإجراءات أو السياسات المقترحة على إدارة الموارد المائية.

وباستعراض الشكل (3) نجد ان قيمة الاحتياج الصافي في منطقة الدراسة لكامل مواقع الاحتياج المائية (تجمعات سكانية_ أراضي زراعية) بلغت نحو (34.5) مليون متر مكعب سنويا.



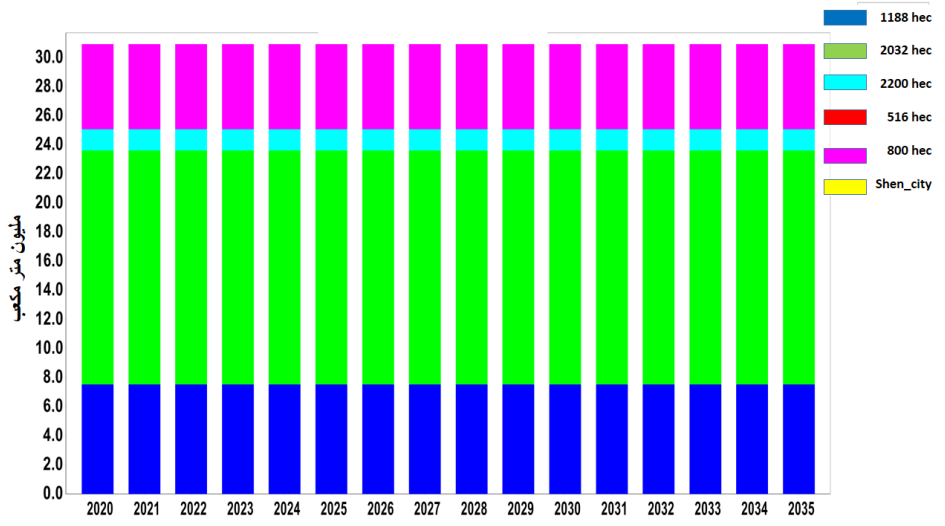
الشكل (3) : الاحتياج المائي الصافي لمواقع الطلب المائي (بواحدة مليون متر مكعب)

وبلغت قيمة الاستجرار المائي الكلي الى مواقع الاحتياج المائي حوالي (53.2) مليون متر مكعب سنويا كما هو موضح بالشكل التالي:



الشكل (4) : الاستجرار المائي الكلي لمواقع الطلب المائي (بواحدة مليون متر مكعب)

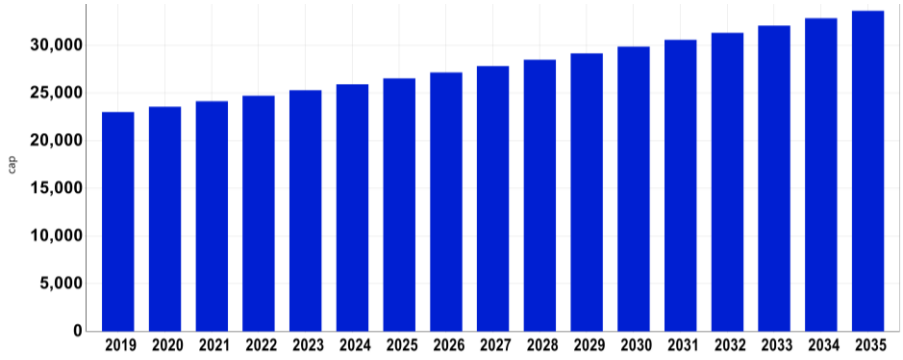
كما بلغت قيمة العجز المائي في منطقة الدراسة بنحو (30.9) مليون متر مكعب سنويا ، كما هو موضح بالشكل (5).



الشكل (5) : العجز المائي لمواقع الطلب المائي (بواحدة مليون متر مكعب)

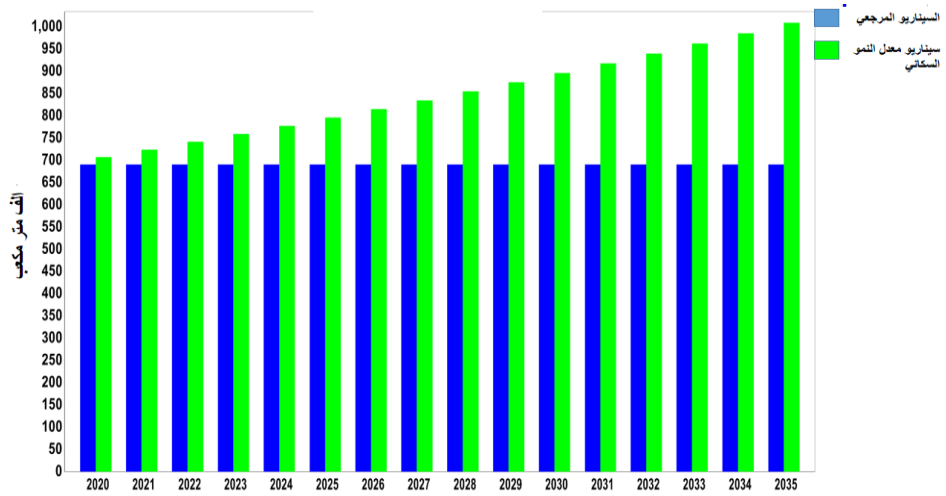
7-2- سيناريو معدل النمو السكاني:

تم في هذا السيناريو دراسة تأثير زيادة عدد السكان على الواقع المائي الحالي حيث يقدر عدد السكان الحالي في منطقة الدراسة نحو (23000) نسمة ليصل بنهاية فترة الدراسة لـ(33614) نسمة بمعدل نمو سكاني (24 ‰) كما هو موضح بالشكل (6).



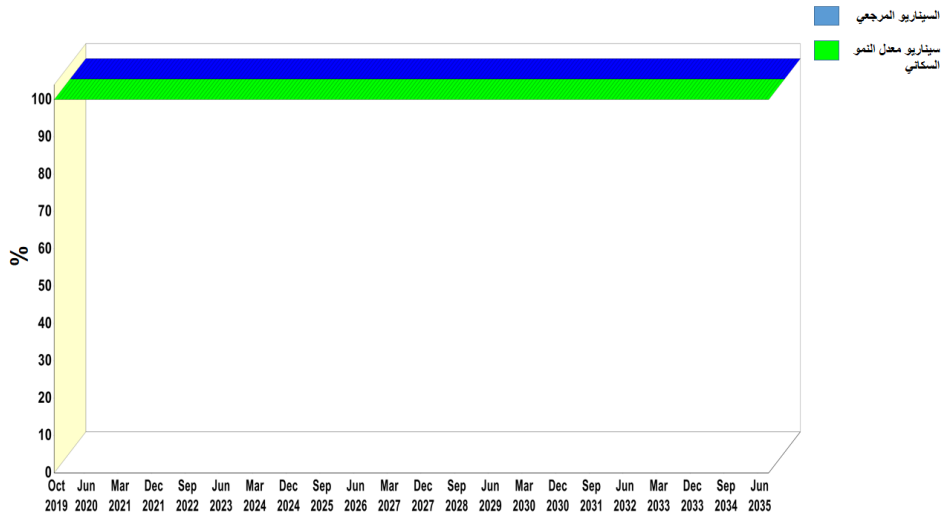
الشكل (6): التغير في عدد السكان للتجمعات السكانية في سيناريو معدل النمو السكاني

حيث بلغت قيمة الاحتياج المائي الصافي للتجمعات السكانية في بداية الدراسة /690/ الف متر مكعب وفي السنة الأخيرة للدارسة بلغت الكمية /1/ مليون متر مكعب كما هو مبين بالشكل (7) علما ان حصة الفرد من المياه بلغت مايقارب (85) لتر يوميا.



الشكل (7): التغير في الاحتياج المائي الصافي للتجمعات السكانية بين السيناريو المرجعي ومعدل النمو السكاني

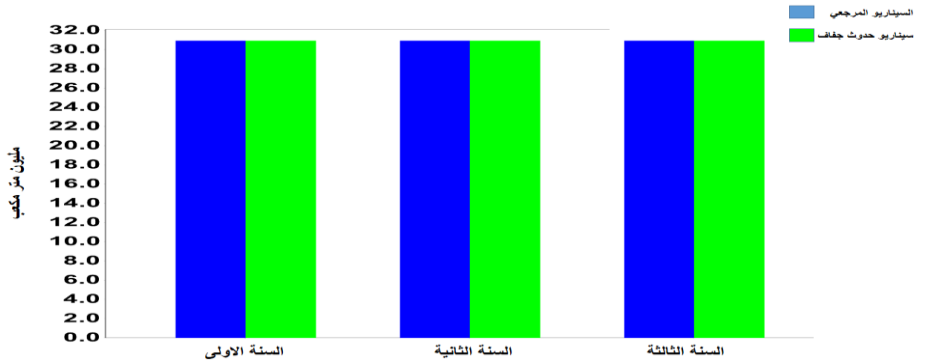
نجد بتطبيق هذا السيناريو ان قدرة الواردات المائية الحالية على الوفاء بمتطلبات مناطق التجمعات السكانية دون حدوث عجز مائي فيها كما هو موضح في الشكل (8) ، حيث تبلغ 100% في ظل الاعداد المتنبأ بها حسب الدراسات الإحصائية السابقة للمنطقة.



الشكل(8): مقارنة بين السيناريو المرجعي وزيادة عدد السكان من حيث تغطية الاحتياج المائي

7-3- سيناريو حدوث دورة جفاف:

بتزايد حدة التحديات المائية حيث تتحول ندرة المياه من خطر محتمل الى واقع ملموس ، يبرز هذا السيناريو كحالة بالغة الأهمية لمعرفة تأثير انخفاض الوارد المائي من الينابيع والمياه السطحية بحدود 20% سنويا ولمدة 3 سنوات على المنطقة .



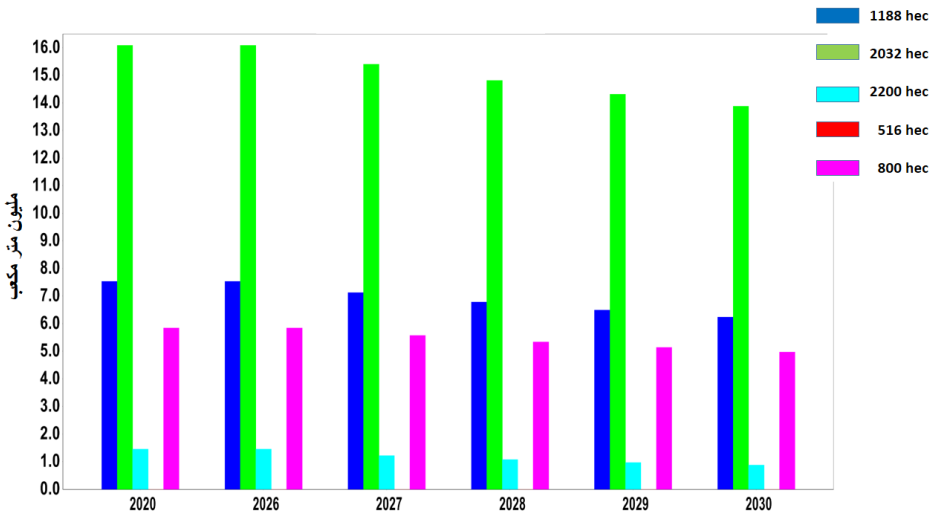
الشكل (9) : مقارنة بحجم العجز المائي بين السيناريو المرجعي وحدوث دورة جفاف

نلاحظ من الشكل (9) أن قيمة العجز المائي لم تزداد عند حدوث دورة جفاف مقارنه مع السيناريو المرجعي مما يدفعنا الى القول ان حدوث العجز المائي مرتبط بقيمة المياه المستجرة من المصادر المختلفة لعدم قدرتها على تامين الواردات رغم توفرها في السنوات المتوسطة والجافة نوعا ما.

7-4- سيناريو زيادة كفاءة شبكة الري:

في هذا السيناريو تمت دراسة تحسين كفاءة شبكة الري في منطقة الدراسة من 65 % الى 75% بشكل تدريجي ابتداءً من العام 2027 الى 2030 .

وباستعراض الشكل(10) نجد ان قيمة العجز المائي انخفضت في كافة مواقع الاحتياج المائي الزراعي من (30.9) مليون متر مكعب الى (26) مليون متر مكعب بنهاية 2030.



الشكل (10) : العجز المائي لكل مواقع الاحتياج المائي الزراعي في منطقة الدراسة

8- النتائج :

1. أظهرت نتائج السيناريو المرجعي أن إجمالي الاحتياج المائي الصافي في منطقة الدراسة بلغ نحو 34.5 مليون م^3 سنوياً في حين سُجّل عجز مائي يقارب 30.9 مليون م^3 سنوياً يتركز بشكل رئيسي في القطاع الزراعي.
2. بيّن سيناريو النمو السكاني حيث بزيادة عدد السكان من 23 ألف نسمة إلى نحو 33614 نسمة زيادة الطلب المنزلي من 0.69 إلى نحو 1 مليون م^3 سنوياً إلا أن الموارد المائية الحالية قادرة على تغطية هذه الاحتياجات دون تسجيل عجز في قطاع مياه الشرب.
3. أظهر سيناريو حدوث دورة جفاف بانخفاض الوارد المائي بنسبة 20% لمدة ثلاث سنوات أن العجز المائي لم يزداد بشكل ملحوظ مقارنة بالحالة المرجعية الوسطية مما يشير إلى أن المشكلة ترتبط بكفاءة إدارة الموارد المائية أكثر من ارتباطها بتوفرها الطبيعي

4. أوضح سيناريو تحسين كفاءة الري من 65% إلى 75% انخفاض العجز المائي الزراعي من 30.9 إلى نحو 26 مليون م³ سنوياً بحلول عام 2030 مما يؤكد أهمية رفع كفاءة استخدام المياه في تقليل الفجوة بين العرض والطلب.

9- المراجع:

المواقع الالكترونية:

WWW.WEAP21.ORG−1

المراجع الأجنبية :

2- *Akanbi, R. T., Ndarana, T., Davis, N., & Archer, E. (2020), Integrated assessment of the influence of climate change on current and future intra-annual water availability in the Vaal River catchment. Journal of Water and Climate Change, 11(4).*

3- Hassan, H. G., Omar, M. E. D. M., Badawy, N. B., & Altokhy, M. A. (2024). *Assessment of the Water Supply and Demand Management System in Fayoum using WEAP*. Engineering Research Journal (ERJ), 53(4), 168–129.

4- Takele, Gebrie, Engida, Water demand and supply under future water development and climate change scenarios in the upper Blue Nile basin , Water Supply Vol 24 No 12 ,2024.

المراجع العربية:

5-عبدالله ، مي، رسالة ماجستير بعنوان (إدارة الموارد المائية حوض السن)، كلية الهندسة المدنية ،جامعة حمص .2016

6− تقرير صادر عن شركة ماستر بلان الألمانية لدراسة حوض نهر الكبير الجنوبي، 2008

7−مديرية الموارد المائية بحمص ، وزارة الطاقة

8− خزام ، بشرى . ترشيد استخدام الموارد المائية في حوض العاصي الأعلى . رسالة دكتوراه في الهندسة المائية . جامعة البعث، حمص ، 2008

9- حويجة، الأسعد، تطوير سيناريو إدارة المياه في حوض نهر الصنوبر باستخدام WEAP،مجلة جامعة اللاذقية للبحوث والدراسات العلمية، لمجلد 37 ،العدد 2 ،2015.

دراسة تأثير موقع صمام الأمان في حماية خط الضخ من الصدمة الهيدروليكية

*أ.د عادل جرجي **شذى خلوف

الملخص

تضمن البحث وصف لظاهرة الصدمة المائية الناتجة عن التوقف المفاجئ للمضخات وعرض الأخطار الناتجة عنها على خطوط الضخ وشبكات المياه. كما تم توضيح مفهوم صمام الأمان وآلية عمله و دراسة تأثير موقع صمام الأمان في قيم الضغط الناتج عن الصدمة الهيدروليكية بهدف معرفة الموقع المناسب الذي يحقق أمان لشبكة المياه من قيم الضغط المرتفع وذلك بوضع عدة سيناريوهات تبين تأثير موقع الصمام على الشبكة باستخدام برنامج (Bently Hammer) وفق خط ضخ يمتد من محطة مرقية 3 باتجاه خزان القمصية في محافظة طرطوس. وتم التوصل إلى أن استخدام صمام أمان يخفض الضغط الأعظمي على مسافة 2كم تقريبا" ولكن ليس له أي تأثير إيجابي على الضغوط الدنيا المنخفضة.

كلمات مفتاحية : صدمة مائية – صمام أمان – الضغط الأعظمي

* أستاذ في كلية الهندسة المدنية- قسم الموارد المائية – جامعة حمص

**طالبة ماجستير- كلية الهندسة المدنية – قسم الموارد المائية – جامعة حمص

Study the effect of safety valve location on protecting the pumping line from hydraulic shock

*Adel Gorgee **Shaza Khallof

Abstract

The research included a descriptive study of the phenomenon of water shock resulting from sudden pump stoppages, and presentation the dangerous resulting from it to pumping lines and water networks the concept of the safety valve and its operation mechanism were also explained. And studying the effect of the safety valve location on the pressure values resulting from the hydraulic shock with the aim of identifying the appropriate location that ensures the safety of the water network from high pressure values by setting several scenarios that show the effect of the valve location on the network using the Bently Hammer program according to a pumping line extending from the Marqa 3 station towards the Qamsiyeh reservoir in Tartous Governorate. It was found that using a safety valve reduces the maximum pressure over a distance of approximately 2 km, but has no positive effect on the lower minimum pressures.

Keywords: Water shock – Safety valve – Maximum pressure

*Professor–faculty of civil engineering– Water resources management–Homs Univerity.

** student – Faculty of Civil Engineering – Water Resources Management –Homs University.

مقدمة:

مفهوم الصدمة المائية :

إن الصدمة المائية هي عبارة عن موجات ارتفاع أو انخفاض تطرأ على الضغط الهيدروليكي في أنبوب مضغوط، نتيجة تغير سرعة الجريان في مقطع هذا الأنبوب، وتسير بسرعة تقارب سرعة انتشار الصوت في السائل متخامدة بفعل الاحتكاك وبعض الأجهزة الملحقة بنظام الضخ[1].

كما أن انضغاطية السائل وقابلية جدران الأنبوب للتشوه تكسبان الصدمة المائية صفة المرونة، وبإهمال هاتين الخاصيتين نحصل على صدمة مطلقة وهذا أمر بعيد عن الواقع.

الأخطار الناتجة عن الصدمة المائية :

إن التغير السريع والمفاجئ في الضغط ينتج عنه الأخطار التالية :

- ضغط عالي جدا" يؤدي إلى تمزق الانابيب وتضرر المضخات والصمامات ومانعات التسرب،مما يؤدي إلى تسرب السائل المنقول عبر الأنبوب إلى خارج خط الضخ ، وبالتالي يؤدي إلى تلوث بيئي.
- ضغط منخفض جدا" يؤدي إلى:
  - تآكل الجدران الداخلية للأنبوب أو ثقب أو تطبق الأنابيب نتيجة الضغوط السالبة[2] .

الشكل (1) تطبق أنبوب ضخ ناتج عن انخفاض الضغط

- تحطم الدعائم أو انزياحها
- دخول المياه الملوثة إلى الأنابيب بسبب حصول إجهادات إضافية للأنابيب والأكواع ودخول المياه إليها من المحيط.
- حصول حادثة انفصال عمود السائل والتي تترافق مع ضغوط عالية عند تصادم جزأي عمود السائل.

- التدفق العكسي يسبب أضرارا" في مانعات التسرب في المضخة وضررا" في مكوناتها.
- سرع تدفق منخفضة جدا" تؤدي إلى ترسب الطمي والمواد الصلبة ضمن الأنبوب مما يؤدي إلى انسداده جزئيا".ولذلك يجب على المصمم دراسة الصدمة المائية دراسة شاملة لكل نظام هيدروليكي، وإذا لم يكن بالإمكان تجنبها تصميميا" فيجب اعتماد وسائل أمان كافية للحماية منها[2].

هدف البحث:

دراسة الصدمة المائية الناتجة عن توقف مفاجئ للمضخة ودراسة تأثير موقع صمام الأمان على قيم الضغط الناتجة عن الصدمة المائية.

مواد البحث:

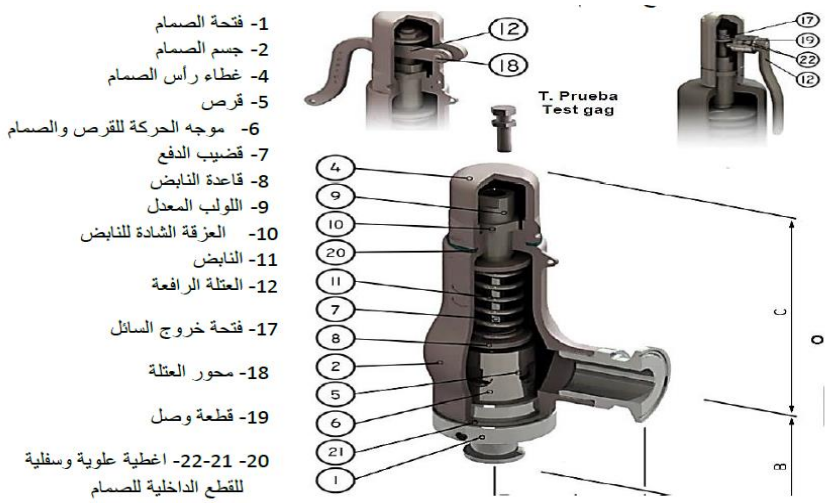
لدراسة تأثير موقع صمام الأمان سوف نستعرض في البداية شرح توضيحي بسيط لصمام الأمان.

- **صمام الأمان من الصدمة المائية :**

هو غالبا" من النوع الكوكبي أو الزاوي ، في النوع الزاوي يضاف إليه نظام تحكم مكون من نابض معدل متصل بالقرص ، فعندما تزيد القوة الناتجة عن ضغط السائل على القرص عن قساوة النابض يفتح الصمام ، ومن الاستخدامات الشائعة لهذا الصمام تركيبه بعد المضخة على تفرع T فيقوم الصمام بتحرير السائل (تمريره خارج النظام) قبل أن تتمكن موجة الضغط العالي من التطور و يركب أيضا" بالقرب من صمامات الفصل في الحوز العلوي لصمامات الأمان ، وهو مفيد خاصة" لأنابيب الدفع القصيرة وشديدة الميل حيث الجريان العكسي سيحدث بسرعة بعد توقف المضخة. ولكن هذا الجهاز لا يستطيع التحكم بموجات الضغط المنخفض. ولا يستطيع تخفيف موجة الضغط المرتفع بشكل فوري لأنه لا يفتح بشكل سريع كفاية لتشتيت الموجة قبل تطورها.

كما يحتاج لفترة زمنية لتفريغ جزء كافي من التصريف المار عبره خاصة عند حدوث انقطاع بعمود السائل وفي هذه الحالة يمكن استخدام البرامج الحاسوبية لتحديد القيمة الحقيقية للموجة وزمن عودتها ، ويمكن بهذه الحالة إضافة حساس لارتفاع الضغط ليعطي أمر بفتح الصمام قبل تطور الموجة ووصولها إلى الصمام .

عند ارتفاع الضغط بخط الضخ فوق الضغط التصميمي للصمام فإن الحساس سيعطي إشارة للصمام بالفتح قبل تطور الموجة .غالبا" يركب صمام الأمان بالقرب من أجهزة قياس الضغط ليتمكن من تحرير الضغط الزائد بسرعة مما يمنع حدوث أضرار محتملة كما يركب أيضا" في نهاية أنظمة الأنابيب مما يسمح له بإدارة الضغط بشكل فعال في جميع أنحاء النظام [3].



الشكل (2) يبين صمام أمان من النوع الزاوي

الدراسات المرجعية لصمام الأمان:

1–قام كل من (Ahmed Abdel–Naby,Mostafa Abdel–Moaty,Eslam Lotfy) بدراسة بعنوان "تأثير المطرقة المائية في الأنظمة الهيدروليكية ذات الضغط المنخفض"(2025)، تناولوا فيه استراتيجيات الحماية المثلى من تأثير الصدمة المائية وذلك على أنظمة إمداد المياه في مستشفى الإسكندرية باستخدام برنامج Bentiy Hammer كما قاموا بتقييم فعالية أجهزة الحماية كصمامات الأمان وأظهرت النتائج أهمية تصميم الأنظمة بشكل مناسب لتقليل تقلبات الضغط وحماية مكونات النظام[4].

2 – قام الباحث (2021) stevan taggat بدراسة بعنوان تحسين تصميم صمام الأمان لتلبية متطلبات الأداء حيث تمكن من تطوير تقنيات ديناميكية الموائع الحسابية (CFD) والتحقق من صحتها للتنبؤ بشكل موثوق بمثل هذه التدفقات والتحقيق في كيفية استخدام التقنيات لإنتاج صمامات أمان ذات أداء أفضل.وذلك بدراسة سلوك تدفق السوائل عبر صمام الأمان وكيفية تحسين سلوك الفتح و الإغلاق وقد تم عرض النماذج الرياضية المستخدمة في هذه الدراسة و

تطوير منهجية تصميم لاستخدام صمامات تخفيف الأمان باستخدام النمذجة الرياضية والخوارزميات والطرق العددية [5].

3 – قام الباحثان جانا وباولا وآخرون من جامعة كراكوف للتكنولوجيا،(2019), بدراسة حول تحسين جودة صمام الأمان مع استخدام الدراسات العددية والتجريبية حيث تم استخدام تجارب لصمام تخفيف ضغط هيدروليكي مباشر المفعول كصمام أمان. في نظام يتكون من مضخة ذات سرعة ثابتة، صمام التحكم، أسطوانة هيدروليكية كمشغل وصمام ضغط ثانٍ في خط التحميل يستخدم كمولد حمولة للأسطوانة. تمت صياغة نظام تفاضلي عادي ثم إنشاء نموذج المحاكاة في Matlab/Simulink لقيم ضغوط مختلفة أظهرت النتائج أن صمام التنفيس المستخدم كصمام أمان يفي بالمتطلبات ويحمي النظام بدرجة كافية[6].

4– قام الباحثون(Ewan & Weil & Scanlon)،(2023) بدراسة بعنوان "دراسة أوقات استجابة صمامات الأمان تحت تأثير ضغط معين"، يهدف البحث إلى تقييم استخدام صمامات الأمان لتقليل مخاطر ارتفاع الضغط من خلال اختبار ثلاث صمامات بأحجام مختلفة تحت ضغط ديناميكي وتم التوصل إلى أن أداء الصمامات لم يتأثر بشكل كبير بتغيرات الضغط بعد الاختبارات الديناميكية كما أن أوقات استجابة الصمامات تتراوح بين 6–8 ميلي ثانية وتم التأكيد على أهمية تحسين تصميم الصمامات لتحقيق أداء أفضل في ظروف الضغط المتغيرة.[7].

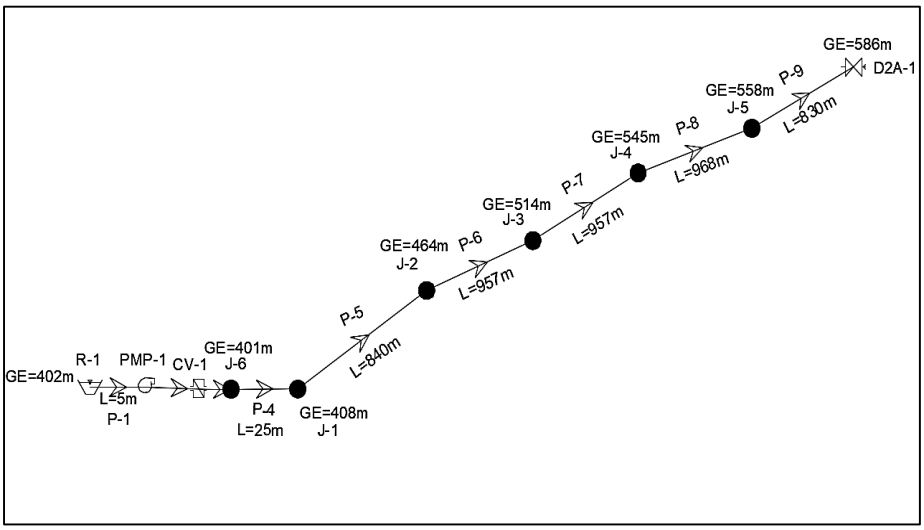
طرق البحث:

تم نمذجة خط الضخ باستخدام برنامج Bently Hammer ،وهو برنامج تخطيطي حسابي فعال لمحاكاة جريان السوائل المضغوطة داخل شبكات الانابيب لدراسة الحالة المستقرة(Steady) والحالة العابرة (Transient)،حيث يقوم بتبسيط العملية المعقدة لبناء نموذج للصدمة المائية، فمن خلال البرنامج يمكن تجنب الآثار الكارثية المحتملة للصدمة عن طريق تحديد الحالة الأسوأ التي يمكن أن يؤثر على النظام.

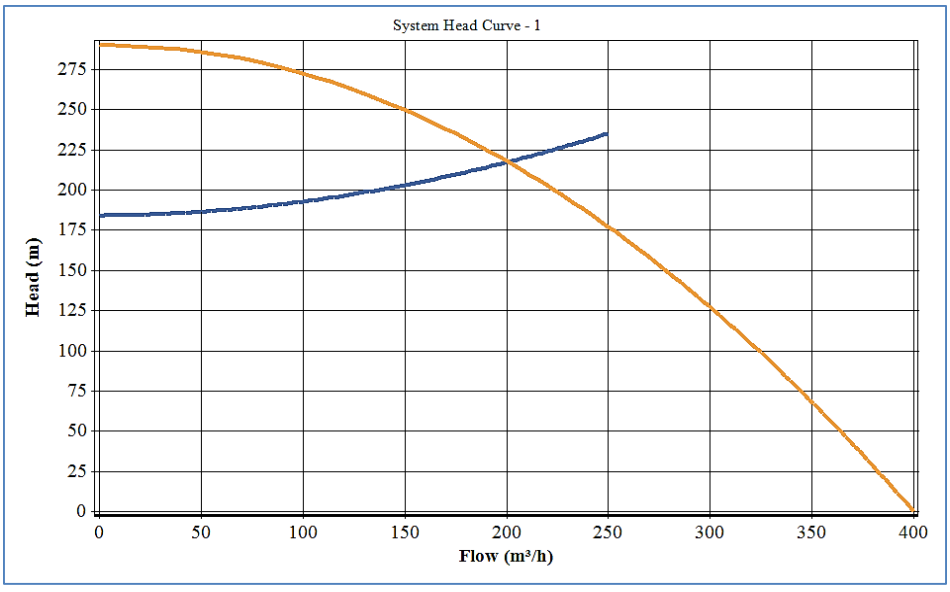
منهج البحث وإجراءاته :

سنقوم بدراسة تأثير موقع صمام الأمان في خطوط الدفع في قيم الضغط الناتج عن الصدمة الهيدروليكية، حيث قمنا باختيار خط الضخ (من المحطة الثالثة في مشروع ضخ مرقية حيث المنسوب 400م باتجاه خزان قرية القمصية حيث المنسوب 584م).والتي تبعد حوالي 35 كم شمال شرق محافظة طرطوس.هذا البحث يوضح تأثير موقع صمام الأمان في قيم الضغط (في حال تم تغيير موقعه الحالي لسبب ما).

خط الضخ يتألف من أنابيب من حديد الزهر (الفونت المرن) Ductile Iron قطر 250مم بطول 2780م وأنابيب من البولي ايتيلين عالي الكثافة ضغط اسمي 10بار قطر 250مم بطول 1800م يتم ضخ تدفق مقداره 200 متر مكعب بالساعة عن طريق مضخة عاملة وأخرى احتياطية فرق المنسوب الستاتيكي 184م.



الشكل (3) يبين البيانات المساحية لخط الضخ (طول الأنابيب ومناسيب العقد) من مؤسسة مياه طرطوس



الشكل (4) يبين نقطة العمل الناتجة عن تقاطع المنحني المميز لخط الضخ مع المنحني المميز للمضخة العاملة وذلك باستخدام برنامج (Bently Hammer)

سوف نستعرض عدة سيناريوهات تبين تأثير تغيير موقع الصمام على خط الضخ وهي :

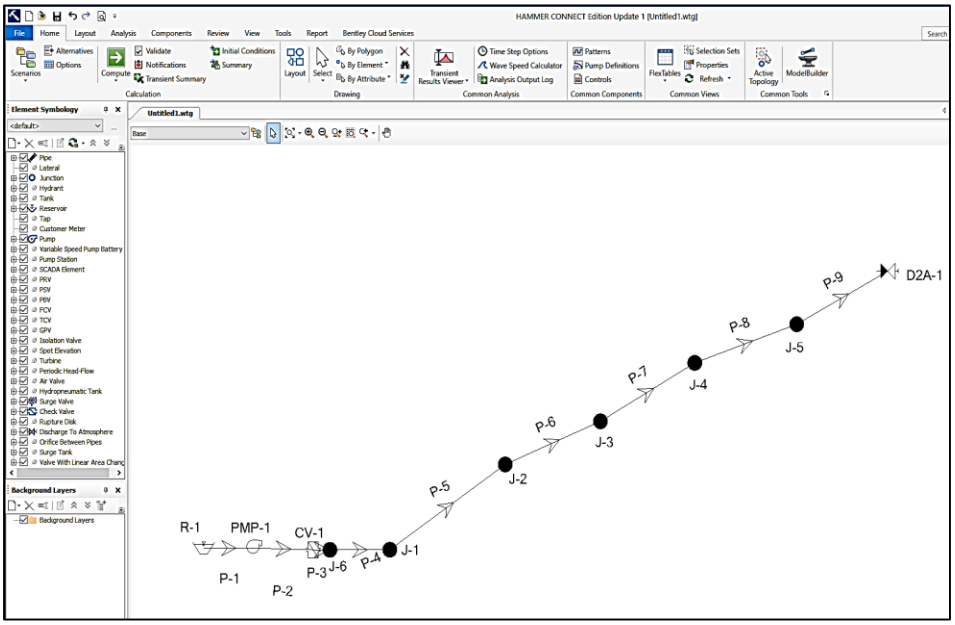
1- **السيناريو الأساس:** يمثل خط الضخ بدون أي وسيلة حماية ويعرض قيم الضغوط الأعظمية والأصغرية الناتجة عن توقف عمل المضخة بشكل مفاجئ.

2- **السيناريو الأول** : إضافة صمام أمان من ارتفاع الضغط في بداية خط الضخ بعد صمام عدم الرجوع مباشرة وعرض قيم الضغوط الأعظمية و الأصغرية ومقارنة تأثير وضع الصمام في بداية خط الضخ مع السيناريو الأساس.

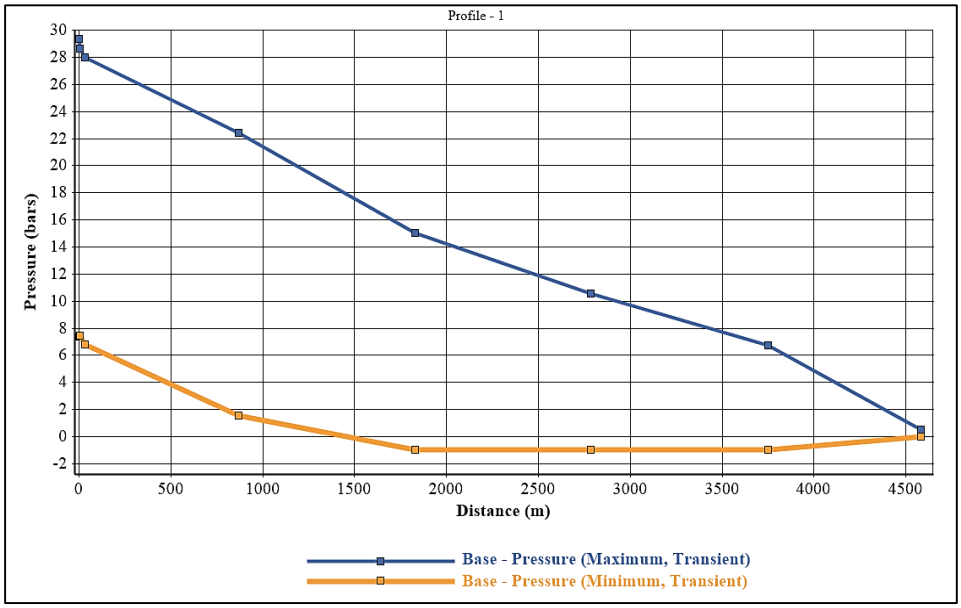
3- **السيناريو الثاني** : إضافة صمام أمان من ارتفاع الضغط في منتصف خط الضخ وعرض قيم الضغوط الأعظمية و الأصغرية ومقارنة تأثير وضع الصمام في منصف خط الضخ مع السيناريو الأساس.

4- **السيناريو الثالث** : إضافة صمام أمان من ارتفاع الضغط في نهاية خط الضخ وعرض قيم الضغوط الأعظمية و الأصغرية ومقارنة تأثير وضع الصمام في نهاية خط الضخ مع السيناريو الأساس.

السيناريو الأساس: (خط الضخ بدون حماية)

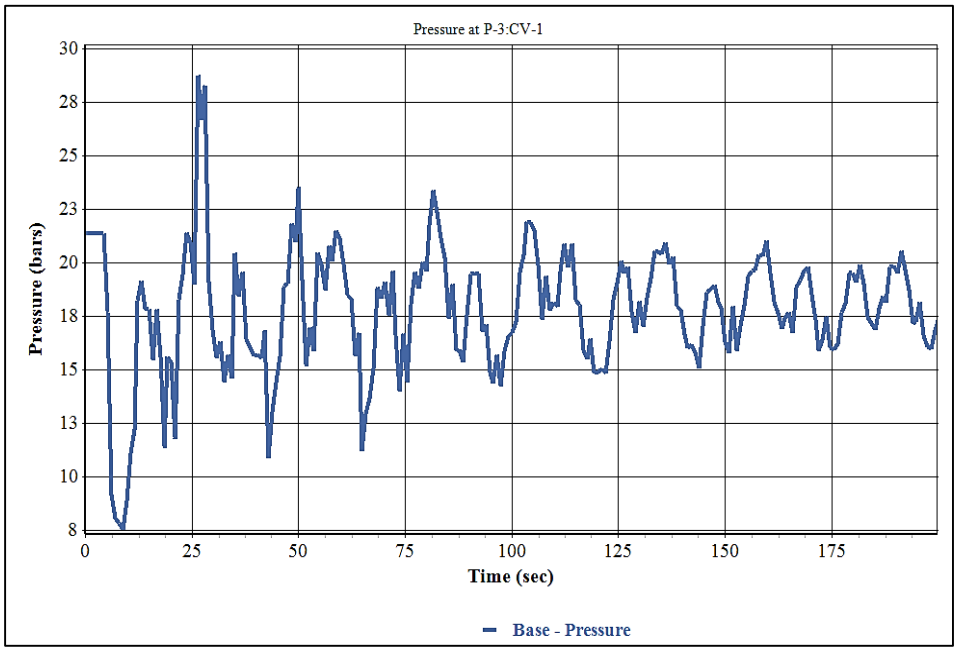


الشكل (5) يبين ادخال عناصر خط الضخ في برنامج التحليل الهيدروليكي للصدمة المائية



الشكل (6) يبين الضغط الأعظمي والأصغري خلال حالة الصدمة المائية (بدون حماية)

نلاحظ ارتفاع الضغط إلى ما يقارب 29 بار نتيجة المطرقة المائية.



الشكل (7) يبين قيم الضغط خلال حالة الصدمة المائية (السيناريو الأساس بدون حماية

من خلال المنحني نلاحظ بعد حوالي 25 ثانية وصل الضغط إلى حوالي 29 بار ولا يوجد ضغط سالب .حيث الأنبوب من نوع Iron (C25) وبالتالي لا يتحمل ضغط أكثر من 25 بار.

وبالتالي لدينا مشكلتين في هذا الخط :

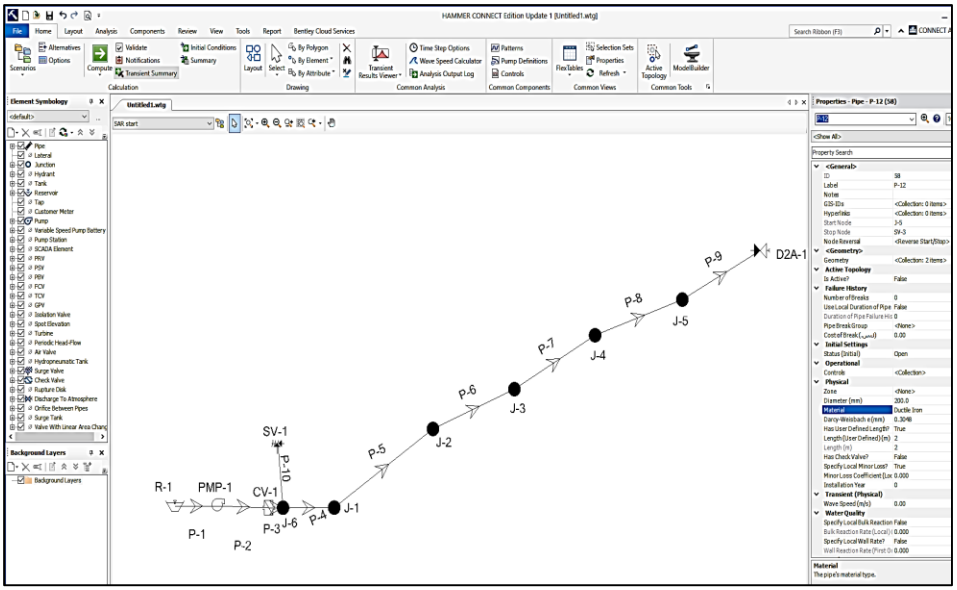
1- ضغط عال لا يتحمله الأنبوب.

2- ضغط منخفض يصل إلى حد التكهف خلال مسافة ممتدة من 1800م إلى 4500 م.

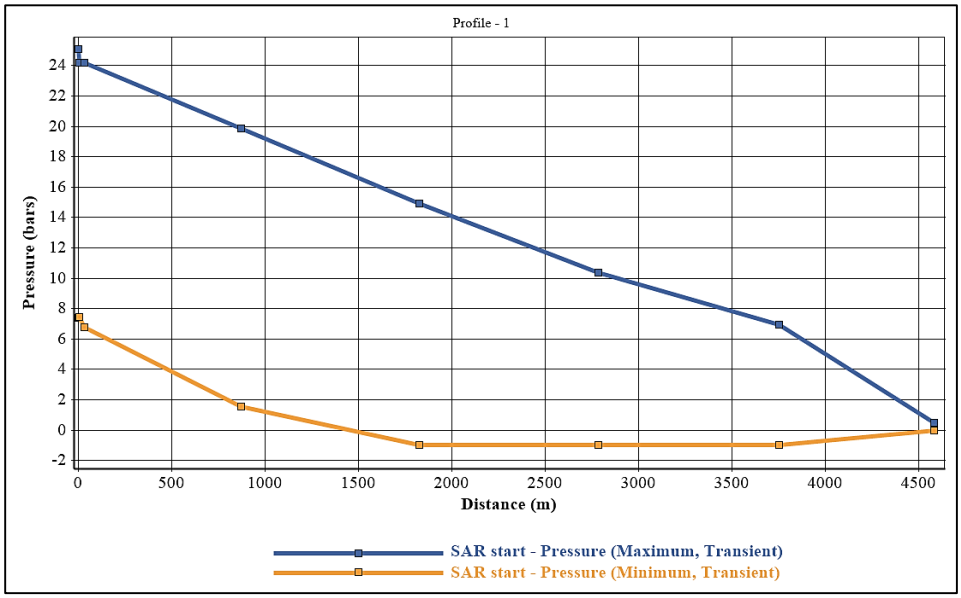
المناقشة والتحليل :

للتخلص من هاتين المشكلتين لدينا مجموعة من الحلول تتمثل بالسيناريوهات التالية :

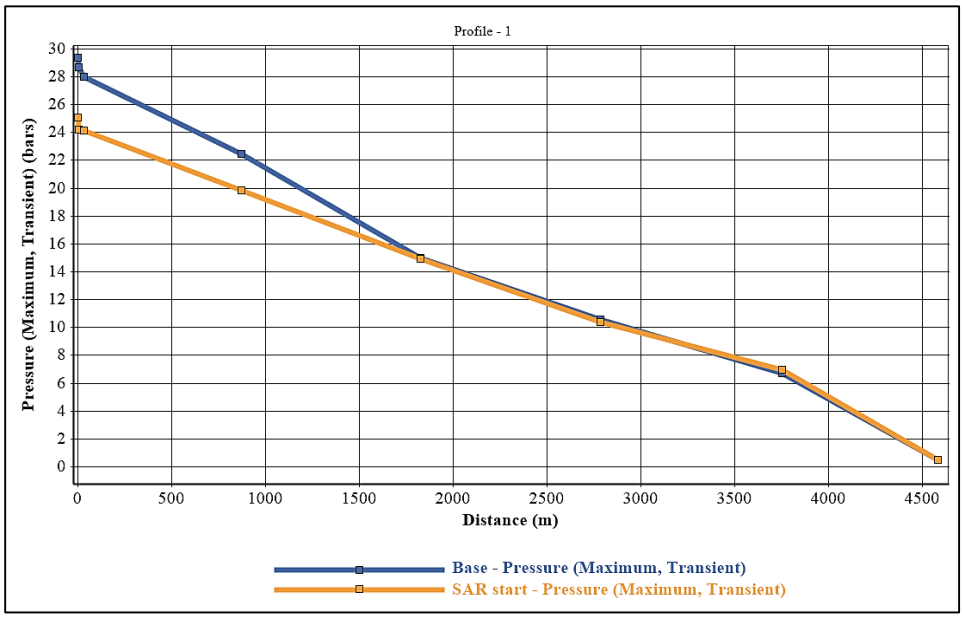
السيناريو الأول : إضافة صمام أمان من ارتفاع الضغط في بداية خط الضخ بعد صمام عدم الرجوع مباشرة



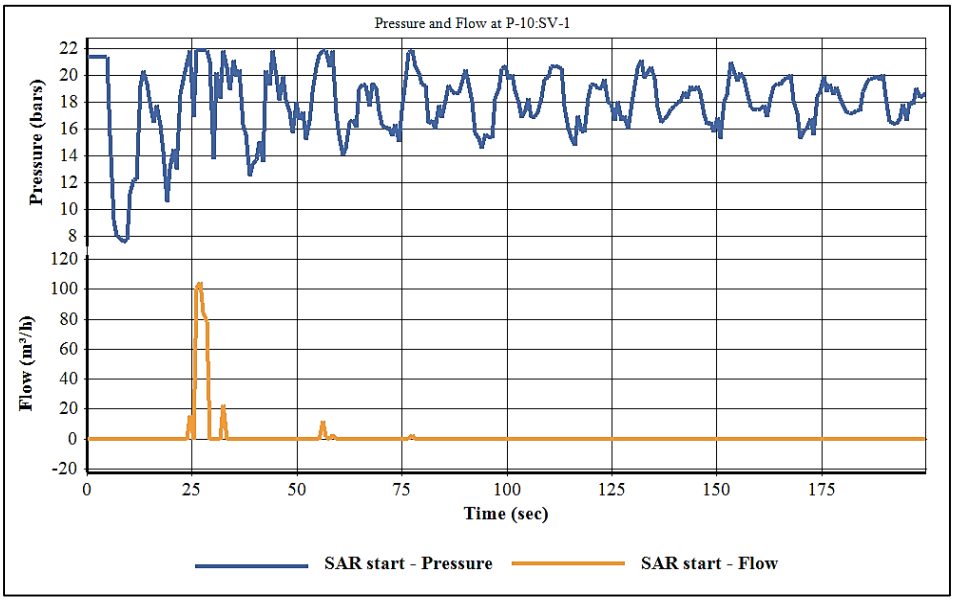
الشكل (8) يبين ادخال بيانات السيناريو الأول (جهاز حماية من ارتفاع الضغط في بداية خط الضخ بعد صمام عدم الرجوع)



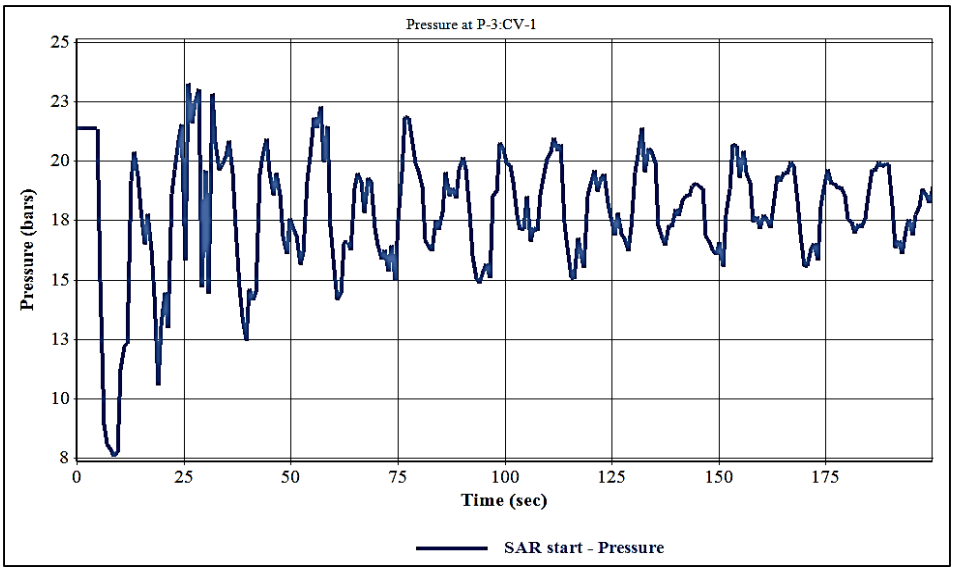
الشكل (9) يبين الضغط الأعظمي والأصغري خلال حالة الصدمة المائية (مع صمام امان في بداية خط الضخ) – السيناريو الأول–



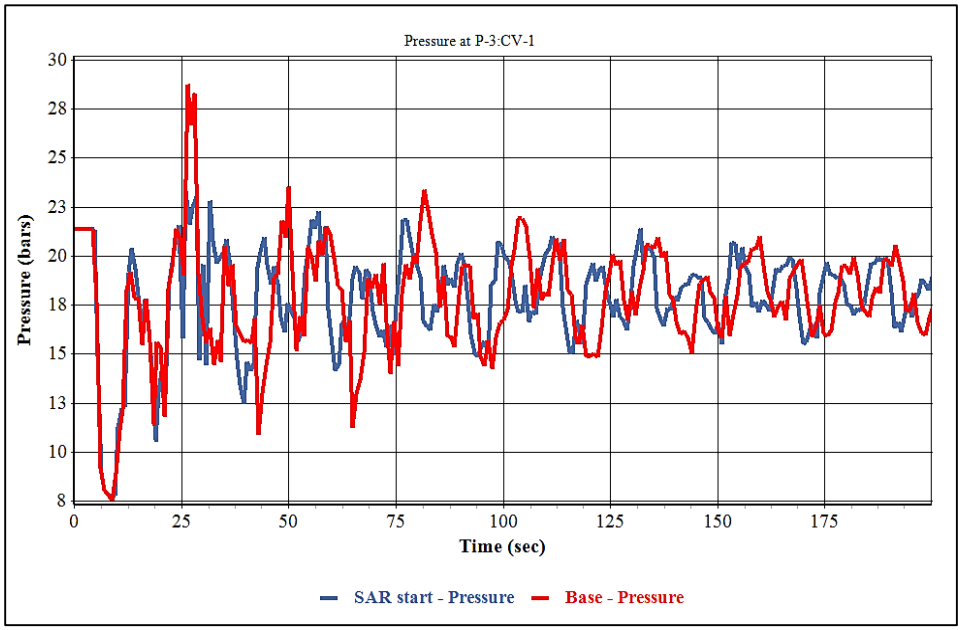
الشكل (10) يبين مقارنة بين قيم الضغط على طول خط الضخ بحال عدم وجود حماية وبحال إضافة صمام امان من ارتفاع الضغط في بداية خط الضخ بعد صمام عدم الرجوع مباشرة.



الشكل (11) يبين الضغط عند صمام الأمان وتدفق الماء الخارج منه (السيناريو الأول)



الشكل (12) يبين الضغط عند الحوز السفلي لصمام عدم الرجوع بعد إضافة صمام امان من ارتفاع الضغط في بداية خط الضخ

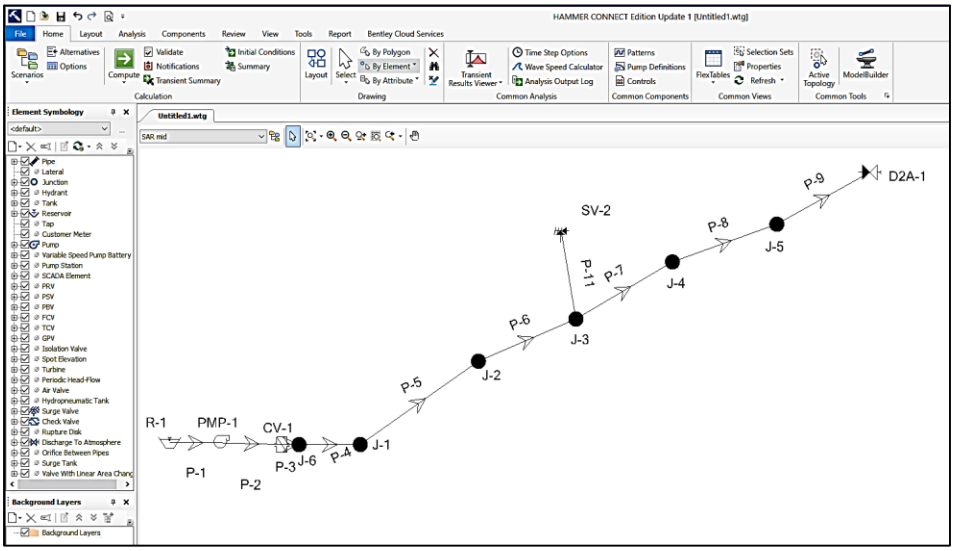


الشكل (13) يبين مقارنة بين الضغط عند الحوز السفلي لصمام عدم الرجوع (السيناريو الأساس والسيناريو الأول مع حماية بصمام امان في بداية خط الضخ)

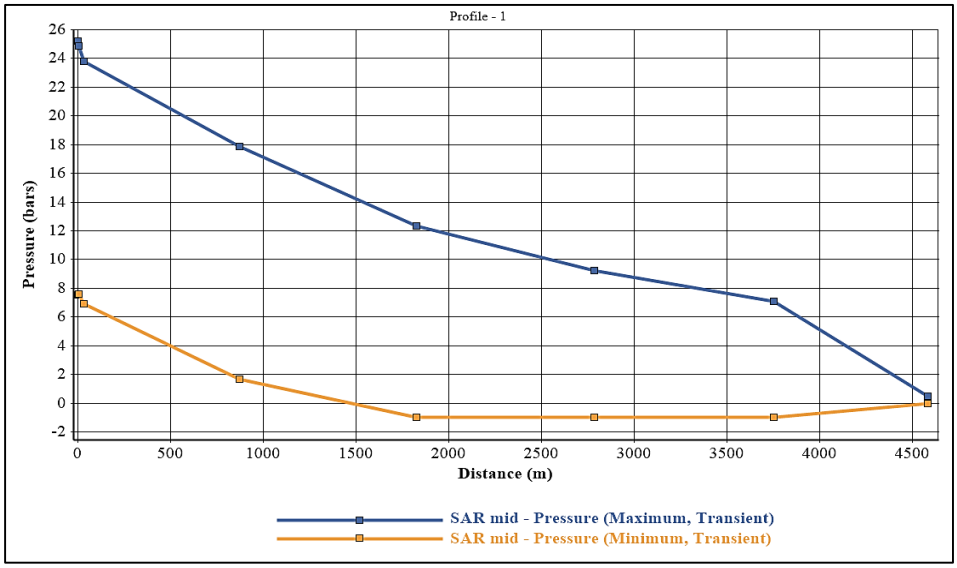
- **نتائج السيناريو الأول:**

نلاحظ من الشكل (9)أن الصمام استطاع تخفيض الضغط الأعظمي بشكل واضح إلى ما يقارب 24 بار بينما الضغط الأصغري بقي على حاله لم يتغير .من خلال الشكل(10) نلاحظ أن تأثير صمام الأمان امتد على مسافة حوالي 1800 م ويتغير هذا التأثير وقيمته وطوله حسب خط الضخ فكلما كان خط الضخ أفقي أكثر كان التأثير أكبر. تمت معايرة صمام الأمان بضغط فتح 22 بار ،أي أنه عند الضغط 22 بار يخرج حجم من الماء كما في الشكل(11).بينما عند صمام عدم الرجوع تكون قيمة الضغط تقريبا" 23.5 بار كما في الشكل(12).

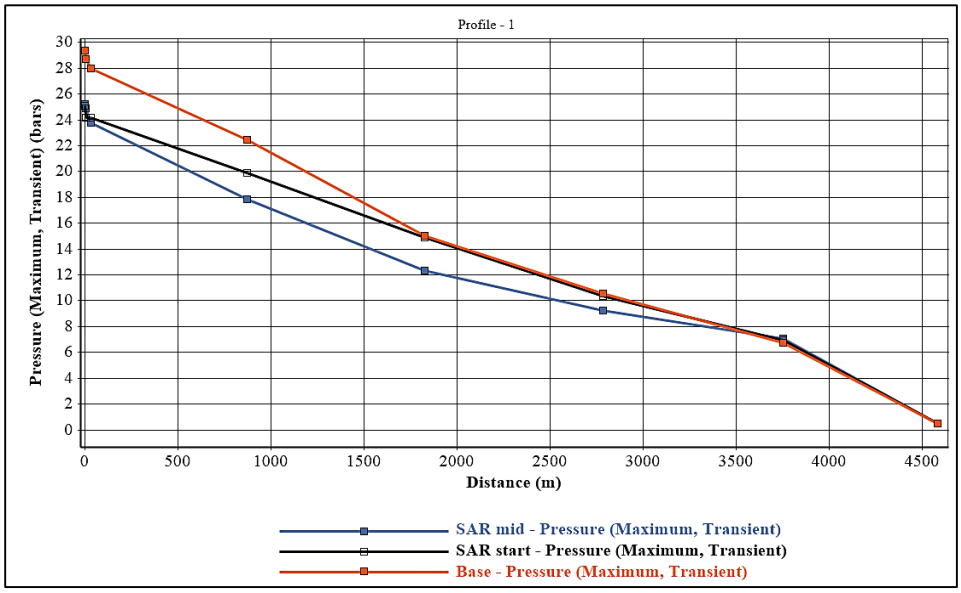
السيناريو الثاني: إضافة صمام أمان من ارتفاع الضغط في منتصف خط الضخ



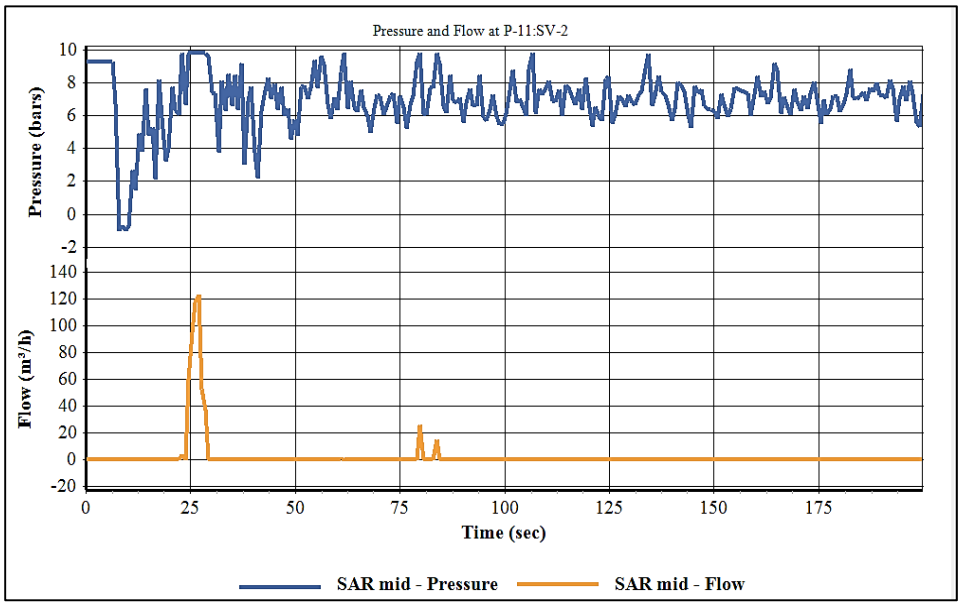
الشكل (14) يبين ادخال بيانات السيناريو الثاني (جهاز حماية من ارتفاع الضغط في منتصف خط الضخ)



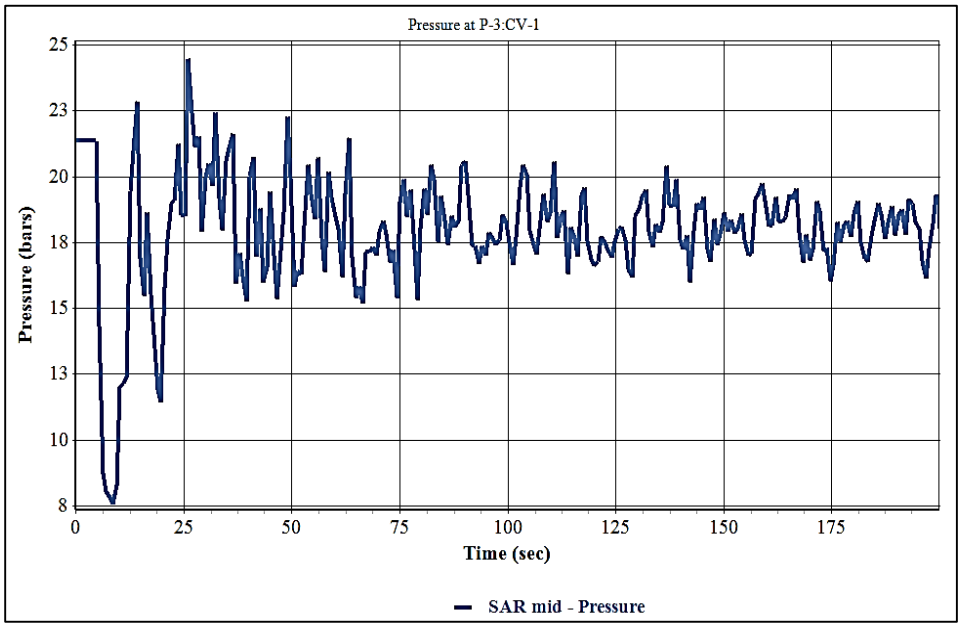
الشكل (15) يبين الضغط الأعظمي والأصغري خلال حالة الصدمة المائية (مع صمام أمان في منتصف خط الضخ) –السيناريو الثاني–



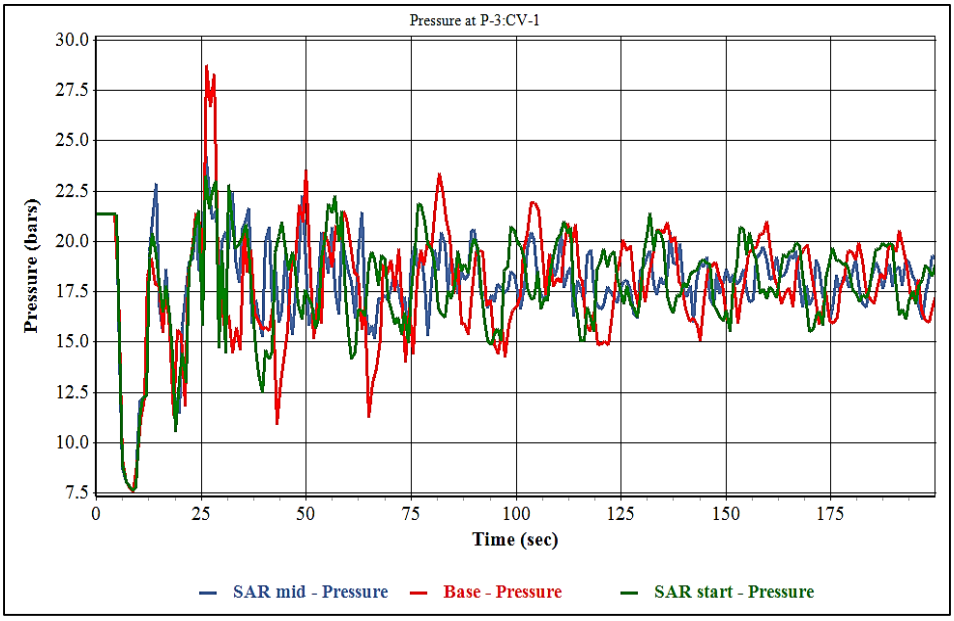
الشكل (16) يبين مقارنة بين قيم الضغط على طول خط الضخ بحال عدم وجود حماية وبحال إضافة صمام امان من ارتفاع الضغط في بداية وفي منتصف خط الضخ.



الشكل (17) يبين الضغط عند صمام الأمان وتدفق الماء الخارج منه (السيناريو الثاني)



الشكل (18) يبين الضغط عند الحوز السفلي لصمام عدم الرجوع بعد إضافة صمام أمان من ارتفاع الضغط في منتصف خط الضخ.

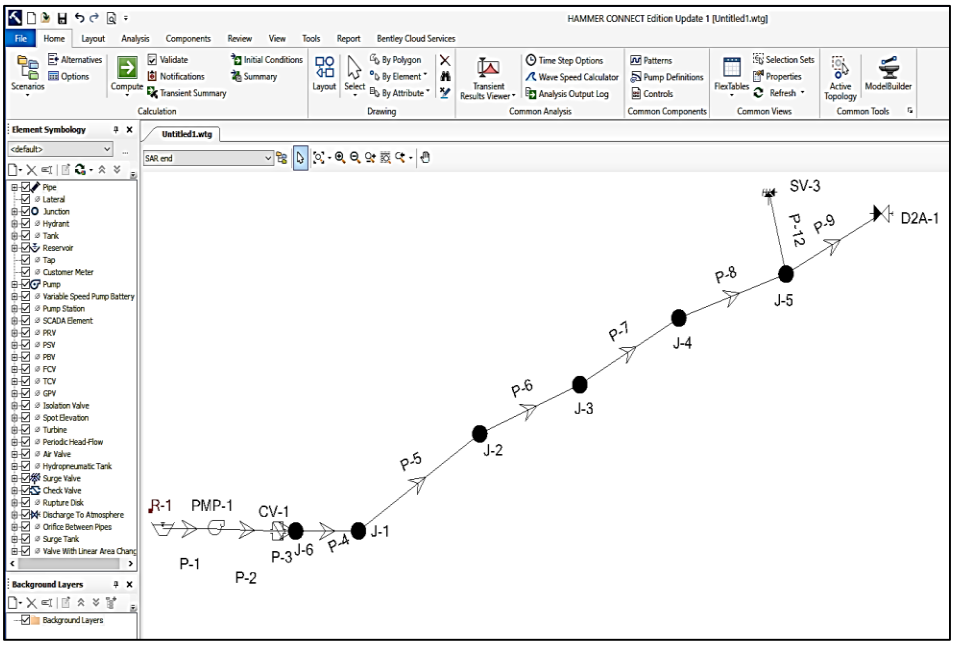


الشكل (19) يبين مقارنة بين الضغط عند الحوز السفلي لصمام عدم الرجوع (السيناريو الأساس والسيناريو الأول مع حماية بصمام امان في بداية خط الضخ والسيناريو الثاني صمام امام في منتصف خط الضخ).

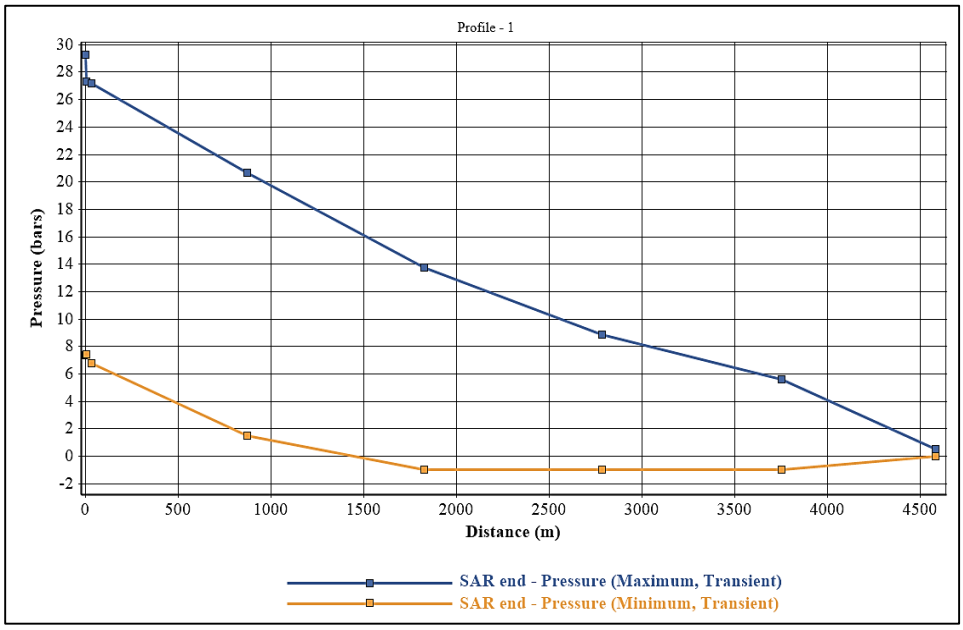
- **نتائج السيناريو الثاني:**

من الشكل(15) نلاحظ أن وجود صمام الأمان في منتصف خط الضخ أدى إلى تخفيض الضغوط بشكل عام بينما الضغوط السالبة بقيت على حالها ولم تتغير. الشكل (16) يوضح لنا أن تأثير وجود صمام الامان في منتصف خط الضخ أعطى تأثير ممتد على مسافة أكبر مما هي عليه في السيناريو الأول (تقريبا" على مسافة 3.5 كم) . تمت معايرة صمام الأمان في منتصف خط الضخ على ضغط فتح 10 بار لأن الضغط الذي يصل إليه 93م (9.3 بار) بينما قيمة الضغط عند صمام عدم الرجوع وصلت إلى قيمة أقل من 25 بار كما في الشكلين (17) و(18).

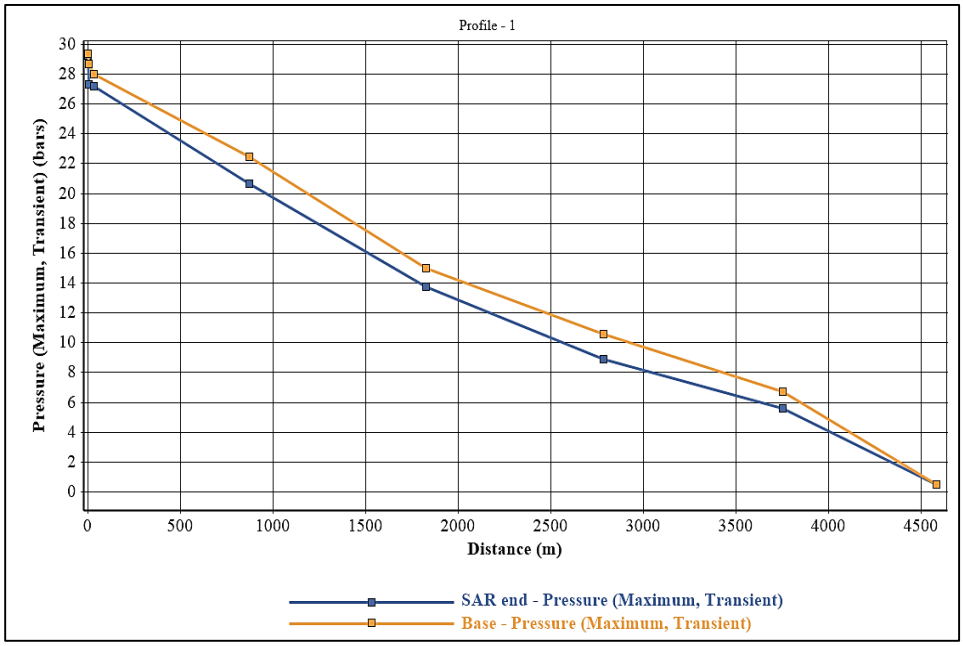
السيناريو الثالث : إضافة صمام أمان من ارتفاع الضغط في نهاية خط الضخ



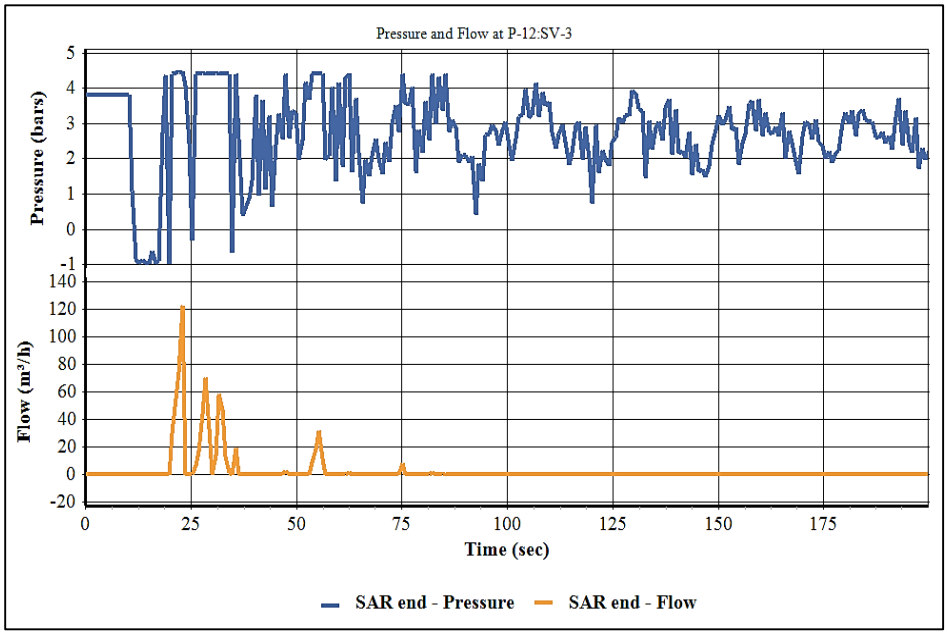
الشكل (20) يبين إدخال بيانات السيناريو الثالث (جهاز حماية من ارتفاع الضغط في نهاية خط الضخ)



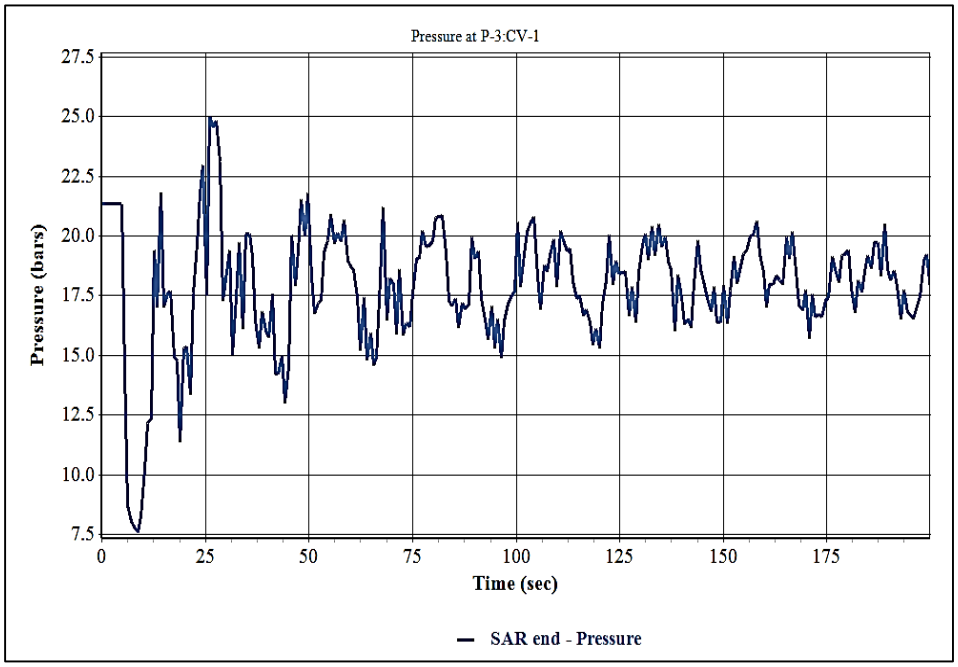
الشكل (21) يبين الضغط الأعظمي والأصغري خلال حالة الصدمة المائية (مع صمام أمان في نهاية خط الضخ) – السيناريو الثالث–



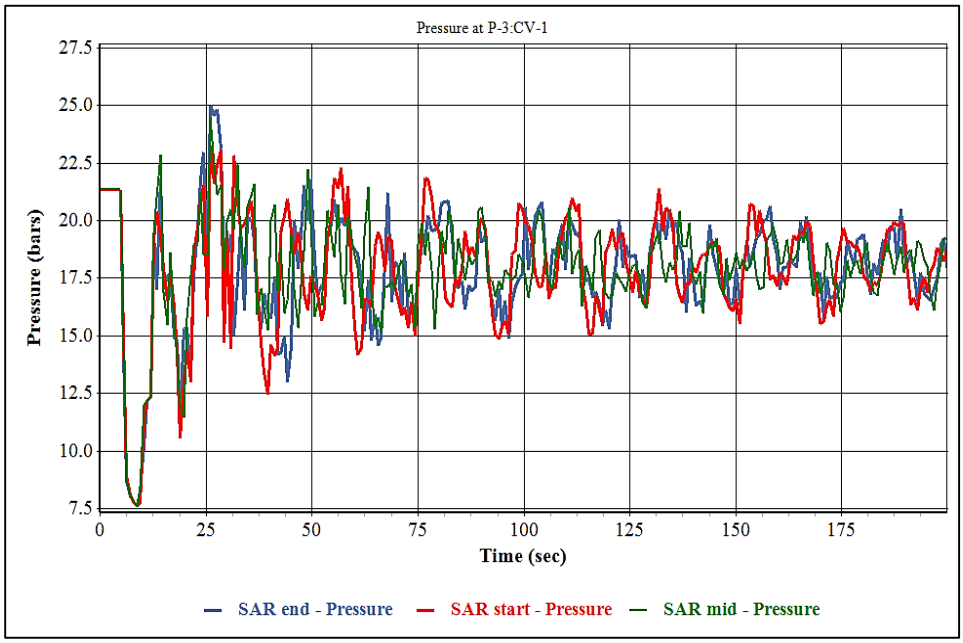
الشكل (22) يبين مقارنة بين قيم الضغط على طول خط الضخ بحال عدم وجود حماية وبحال إضافة صمام امان من ارتفاع الضغط في نهاية خط الضخ.



الشكل (23) يبين الضغط عند صمام الأمان وتدفق الماء الخارج منه (السيناريو الثالث)



الشكل (24) يبين الضغط عند الحوز السفلي لصمام عدم الرجوع بعد إضافة صمام امان من ارتفاع الضغط في نهاية خط الضخ (السناريو الثالث)



الشكل (25) يبين مقارنة بين الضغط عند الحوز السفلي لصمام عدم الرجوع (السيناريو الأول مع حماية بصمام امان في بداية خط الضخ والسيناريو الثاني صمام امام في منتصف خط الضخ والسيناريو الثالث مع صمام امان في نهاية خط الضخ)

- **نتائج السيناريو الثالث:**

يبين الشكل(21) عدم تأثير الصمام في بداية خط الضخ في قيم الضغط ولكن يؤثر بشكل بسيط في انخفاض الضغط على باقي طول خط الضخ. نلاحظ من خلال المقارنة بين قيم الضغط على طول خط الضخ بحال عدم وجود حماية وبحال إضافة صمام امان من ارتفاع الضغط في نهاية خط الضخ الشكل(22) أن انتشار تأثير هذا الصمام استمر على طول خط الضخ بالنسبة للضغط الأعظمي بينما الضغط الأصغري لم يتغير .معايرة صمام الأمان تمت على ضغط فتح 4.5 بار حيث تخرج كمية من الماء تمنع ارتفاع الضغط إلى قيمة أعلى من النقطة المدروسة كما في الشكل (23).

الاستنتاجات :

1- استخدام صمام أمان في بداية خط الضخ أدى إلى تخفيض الضغط الأعظمي وعلى مسافة جيدة تقترب من 2 كم إلى ما دون الضغط الاسمي للحديد الزهر أو الفونت المرن.

2- إن صمام الأمان لا يؤدي إلى حماية خط الضخ على طوله خاصة" خطوط الضخ الطويلة فتأثيره محدود ب 1-2 كم .

3- إن صمام الأمان لا يؤثر ولا يحسن من الضغوط الدنيا السالبة ، ففي حال حدوث ضغط سالب أو تكهف لا يكون له تأثير إيجابي عليه .

التوصيات :

1- نوصي باستخدام صمام الأمان على طول خط الضخ ليس فقط في بداية أو منتصف أو نهاية خط الضخ .
2- نوصي باستخدام أنابيب البولي إيتيلين على كامل خط الضخ إن أمكن ذلك لما ينتج عنه من سرعة جريان منخفضة التي تؤدي إلى ضغوط صدمة مائية أقل وبالتالي تجهيزات الحماية أقل و بأحجام أصغر وبالتالي كلفة اقتصادية أقل .
3- نوصي بتركيب صمامات الأمان مع صمامات الهواء(مثلا") لتعمل عملا" مشتركا" للحماية من الضغوط المرتفعة (صمامات الأمان) وللحماية من الضغوط المنخفضة (صمامات هواء).

المراجع :

[1]- جرجي، عادل ، ابراهيم ،غسان 2010، **محطات الضخ** ، كتاب جامعي ،جامعة حمص ،ص111-123.

[2] - معلا، وائل،1993، **الجريان غير المستقر في الأنابيب** ، كتاب جامعي، جامعة دمشق،ص89-93

[3] -عبد الجليل ، ابراهيم 2016، **دراسة موقع الصمامات ونوعها المؤثرة في قيم الضغط الناتج عن الصدمة المائية** ، رسالة ماجستير، ص64-67.

[4]- Ahmed A Abdel-Naby,Mostafa A Abdel-Moaty,Eslam R Lotfy,2025-**Optimal Water Hammer Protection Strategies for Low-head Hydraulic System**.

[5]-Stevan,Taggat,2021- **Improving the design of the safety valve to meet performance requirements**,P146-150

[6]-Jana & Pawla, 2019- **Improving the quality of the safety valve using numerical and experimental studies** .2019.Krakowf university of technology. Polanda,P103-109.

[7] –B C R Ewan,C Weil,M Scanlon, 2023- **A Study of Pressure Safety Valve Response Times under Transient Overpressure**,P99-105.

دراسة تجريبية لتأثير إضافة المطاط على خواص الرص للتربة الناعمة

إعداد

المهندس واصف هيثم كوسى

إشراف

د. محمد تقلا (مشرف أساسي) د.لينا كراكيت (مشرف مشارك)

أستاذ في قسم الهندسة الجيوتكنية أستاذ مساعد في قسم الهندسة الجيوتكنيكية

كلية الهندسة المدنية ـ جامعة حمص كلية الهندسة المد نية – جامعة حمص

ملخص البحث :

يتضمن هذا البحث إجراء دراسة تجريبية لتأثير إضافة المطاط على خواص الرص لتربتين الأولى غضار عالية اللدونة والثانية سيلت عالي اللدونة ، ومن أجل ذلك تم خلط الترب الناعمة المدروسة مع المطاط بالنسب %(5،10،15) من الوزن الجاف للتربة وقد استخدم المطاط وفق طريقتين الطريقة الأولى قطع بطول cm(1–1.5) ، والطريقة الثانية حبيبات mm(3–4) حيث تم إجراء تجارب بروكتور النظامية والمعدلة وتجارب CBR ومن ثم تم إجراء تحليل رياضي للنتائج التجريبية والتوصل إلى أنه بإضافة المطاط بنسب معينة للتربة الناعمة يوجد تحسين في قيمة CBR ، كذلك تم التوصل لعدة نتائج هامة ، وتوصيات للأبحاث المستقبلية.

الكلمات المفتاحية : التربة الناعمة ، خواص الرص ، مطاط القطع ، مطاط الحبيبات غضار عالي اللدونة .

Experimental Study of Effect Adding Rubber on the Compaction Properties of Soft Soil

Abstract :

This research includes an experimental study of the effect of adding rubber on the compaction properties of two soils, one clay with high plasticity and the other silt with high plasticity. To do this, the soft soils studied were mixed with rubber at ratios of 5, 10, and 15% of the dry weight of the soil. The rubber was used in two ways: the first was shred scraps rubber (1-1.5)cm long, and the second was crumb granules rubber (3-4)mm. Standard and modified Proctor experiments and CBR experiments were conducted, followed by a mathematical analysis of the experimental results. It was concluded that adding rubber in specific ratio to the soft soil improved the CBR value. Several important results and recommendations for future research were also reached.

Keywords: soft soil, compaction properties, shred scraps rubber, crumb granules rubber, clay with high plasticity.

دراسة تجريبية لتأثير إضافة المطاط على خواص الرص للترب الناعمة

1- مقدمة :

تتألف الترب الناعمة من السيلت والغضار ، وتتمز بقدرة تحمل ضعيفة وهبوطات عالية خاصة في ظروف الإشباع ، والترب الناعمة بشكل عام ذات قيم منخفضة لنسبة تحمل كاليفورنيا CBR وتسبب تشققات في الطرق مما يتطلب عندالإنشاء سماكات كبيرة في طبقات البحص الأساس وطبقات البحص ماتحت الأساس وأحيانا بلوكاج لعزل الترب الغضارية عن القميص الإسفلتي وبالتالي كلفة عالية جداً ، إضافة إلى تكاليف صيانة متكررة وتقليل العمر الاستثماري للطريق، وغالباً يتطلب الإنشاء الآمن للمشاريع الهندسية استبدال التربة الناعمة أو إضافة مواد لها لتحسين سلوكها ، وفي هذا البحث سوف نسلط الضوء على أحد الطرق المقترحة حديثاً لتحسين مواصفات التربة الناعمة عن طريق خلطها بالمطاط ، حيث إن المطاط المستخدم حالياً في الصناعات نوعان طبيعي وصناعي والمطاط الطبيعي هو مادة بوليميرية تستخرج من عصارة أشجار المطاط Hevae Brasiliensis ويتكون كيميائياً من عنصري الكربون والهيدروجين فقط C_5H_8 أما المطاط الصناعي مثل مطاط ستايرين Styrene وبوتادين Butadiene ينتج ببلمرة مشتقات البترول ، يستخدم المطاط في إطارات السيارات والجرارات والقفازات الطبية والأحذية وعوازل الأسلاك الكهربائية وغيرها من الأغراض **[1]**.

يتميز المطاط بالمرونة والمقاومة للظروف القاسية مثل درجات الحرارة العالية أو المنخفضة والزيوت والمواد الكيميائية ويحوي مواد خام عالية المقاومة مضادة للتأكسد والإهتراء وغير قابلة للتحلل بيولوجيا ومقاومة التآكل ، وكذلك يتميز المطاط بخصائص عزل جيدة وهو مادة عديمة الامتصاص للرطوبة وخفيف الوزن ، وعندما يخلط المطاط مع التربة يعطي مادة إنشاء خفيفة الوزن ويؤدي إلى تحسن في الخصائص الهندسية كالمتانة بالمقارنة مع التربة الطبيعية ، حيث تم توظيف قطع المطاط بنجاح في تطبيقات الهندسة المدنية بما في ذلك البنية التحتية للطرق وفي الردم خلف الجدران الاستنادية

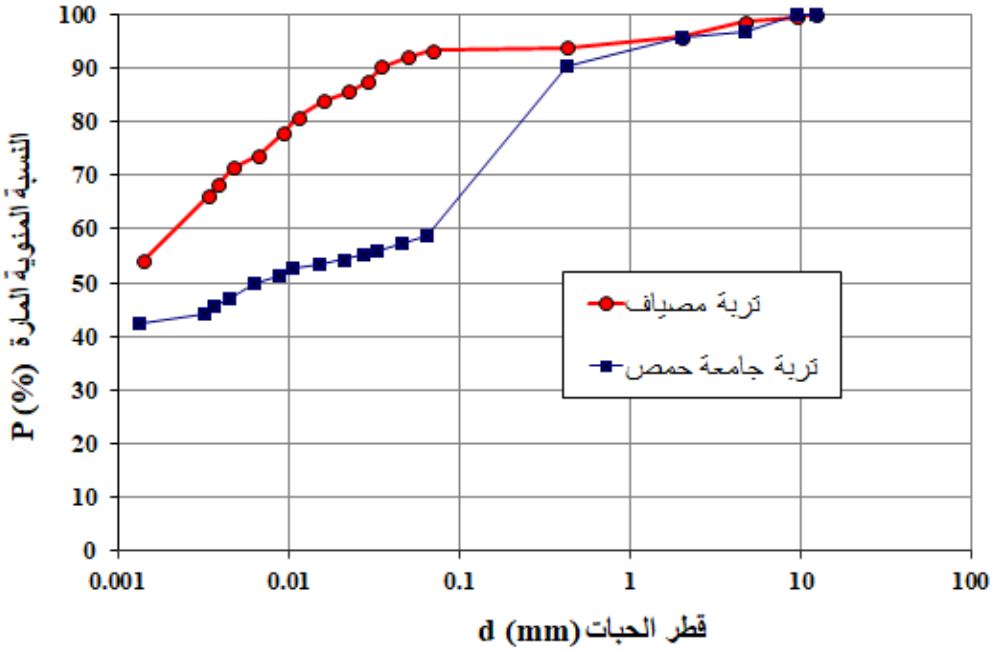
وفي السدود الركامية وكمواد ماصة للصدمات في الجسور ، ويشكل خليط التربة المنتفخة والمطاط تقنية مطورة حديثا والتي تستخدم لتحسين مواصفات التربة المنتفخة**[2]**.

حسب الباحثون Ravichandran and Shiva (2016) [3] أدى خلط تربة غضارية عالية اللدونة مع نسبة مطاط 10% إلى زيادة قيمة CBR بنسبة 161% ونتج عن ذلك تقليل السماكة الكلية للرصف بشكل كبير والكلفة الإجمالية للمشروع ، وحسب دراسة Vasavi and Prasad (2016) [3] نتج زيادة في قيمة CBR لتربة عالية اللدونة من 2.6 إلى 7.5 عند خلطها مع نسبة 9% من المطاط طول 1.18mm، استخدم الباحثون Agawane and Pachpute (2019) [4] قطع مطاط بطول 10-20mm ونتجت أكبر قيمة CBR من أجل نسبة المطاط المضافة 10% بزيادة حوالي10% عن قيمتها الأولية وعند زيادة نسبة المطاط المضافة عن 10% بدأت قيمة CBR بالانخفاض ، أوصى الباحثون Juliana and Rozaini (2020) [5] باستخدام المطاط بأبعاد مختلفة (12-50)mm, (50-305)mm وخلط المطاط مع مثبتات أخرى للتربة مثل الإسمنت ليحسن من مقاومة التربة خاصة في ظروف الإشباع ، ودرس الباحث Dumlupinar (2022) [6] نتائج خلط المطاط بأبعاد 4mm مع تربة غضارية منخفضة اللدونة CL بنسب مختلفة فوجد انخفاض الرطوبة المثالية مع زيادة نسب المطاط المضافة وكذلك انخفاض الوزن الحجمي الجاف الأعظمي ، ومن أجل مطاط بنسبة 5% حصل الباحث على أعلى زيادة في CBR بحدود 25% عن القيمة الأولية إن فكرة إضافة المطاط لتحسين مواصفات التربة الناعمة من الأبحاث المطروقة حديثاً

والقليلة جداً ولاتزال تحتاج إلى الكثير من الأبحاث ، وفي هذا البحث سوف ندرس تغير خواص الرص وقيم CBR للتربة الناعمة بعد خلطها مع نسب المطاط

2-هدف البحث : دراسة تجريبية لتأثير إضافة المطاط على الرطوبة المثالية للتربة الناعمة والوزن الحجمي الجاف الأعظمي ونسبة تحمل كاليفورنيا (CBR)

3-مواد وطرق البحث : تم اختيار تربتين ناعمتين الأولى من منطقة مصياف و الثانية من موقع جامعة حمص ، ويبين الشكل رقم (1) نتائج تجربة التحليل الحبي للترب الناعمة المدروسة والجدول رقم (1) بعضاً من خواص هذه الترب .



الشكل رقم (1) : نتائج تجربة التحليل الحبي للترب الناعمة المدروسة

الجدول رقم (1) : خواص الترب الناعمة المدروسة

خواص التربة	تربة مصياف	تربة جامعة حمص
نسبة النواعم %	94	55.2

نسبة الغضار %	58.9	43.2
حد السيولة %	81.7	60.4
دليل اللدونة %	47.9	26.5
فعالية الغضار	0.8**عادي النشاط**	0.6**غير نشط**
الوزن النوعي	2.76	2.68
الرطوبة المثالية % (بروكتور نظامية)	24.5	19.5
γd max gr /cm^3 (بروكتور نظامية)	1.58	1.67
الرطوبة المثالية % (بروكتور معدلة)	22	17.2
γd max gr /cm^3(بروكتور معدلة)	1.7	1.78
%CBR	3	4.1

تصنيف الترب المدروسة حسب النظام الموحد USCS تربة مصياف تربة غضارية عالية اللدونة CH ، وتربة جامعة حمص سيلت عالي اللدونة MH ، وبهدف تحسين خصائص الرص للترب المدروسة تم خلطها مع المطاط بالنسب %(5,10,15) حيث تم استخدام المطاط وفق طريقتين قطع مطاطية وحبيبات مطاطية ، في الطريقة الأولى تم استخدام قطع مطاطية عن طريق قص بقايا الإطارات المطاطية التالفة بشكل يدوي بطول حوالي cm(1-1.5) كما في الشكل رقم (2).

حيث إن المادة الأولية المستخدمة وهي القطع المطاطية مأخوذة من إطارات تالفة لسيارات وهي بالأصل تتكون بشكل أساسي من%(05-40) مطاط طبيعي وصناعي يمنح الإطار المرونة ،%(35-30) حشوات سيليكا وكربون أسود تعطي الإطار اللون

الشكل رقم (2) القطع المطاطية المستخدمة في هذا البحث

الأسود وتزيد المتانة ومقاومة الشد وتعطي مقاومة جيدة ضد التآكل ، 15% مواد هيكلية للتقوية وإعطاء الهيكل كالنسيج والفولاذ ، كميات أقل من الملينات زيوت وراتنجات ، نسبة من الكبريت تعطي الصلابة والقوة للخليط ، ويبلغ متوسط الوزن النوعي للمطاط المركب في الإطارات (1.1–1.25) مما يجعله مادة حشو خفيفة الوزن

أما الطريقة الثانية الحبيبات المطاطية تم الحصول عليها من مدينة بانياس وهي معدة ومجهزة للاستخدام كطبقة حشو لأرضية الملاعب ، قطرها الوسطي mm (3-4) نوع

SBR:(Styrene-Butadiene Rubber) ، ويبين الشكل رقم (3) صورة للحبيبات المطاطية المستخدمة في هذا البحث

الشكل رقم (3) الحبيبات المطاطية المستخدمة في هذا البحث

حيث إن المادة الأولية المستخدمة وهي الحبيبات المطاطية تستخدم بالأصل لتحسين أرضيات الملاعب كحشوة مع العشب الصناعي حيث توفر الحبيبات المطاطية مرونة عالية وامتصاص للصدمات مما يقلل من خطر الإصابة لدى الرياضيين ، وتعطي مقاومة للظروف الجوية المتغيرة مثل الأمطار والحرارة العالية ، وزنها النوعي بحدود (1.1-1.2)

4-الدراسة التجريبية ومناقشة النتائج :

تحضير العينات :

تم استخدام المطاط بنوعيه قطع وحبيبات وفق حالته الطبيعية بعد أخذه من المصدر دون إجراء أي عمليات غسيل أومعالجة ، حيث استخدمت نسب المطاط %(15,10,5) مأخوذة من الوزن الحجمي الجاف للتربة ، وتم تشكيل العينات للترب المدروسة بالخلط اليدوي حتى الحصول على خليط متجانس كمافي الشكل رقم (4) وتم تغليفه لمدة 24 ساعة قبل بدء التجارب ، ثم دراسة تغير بعض الخصائص الميكانيكية للعينات المشكلة من خلال إجراء تجارب بروكتور النظامية والمعدلة ونسبة تحمل كاليفورنياCBR

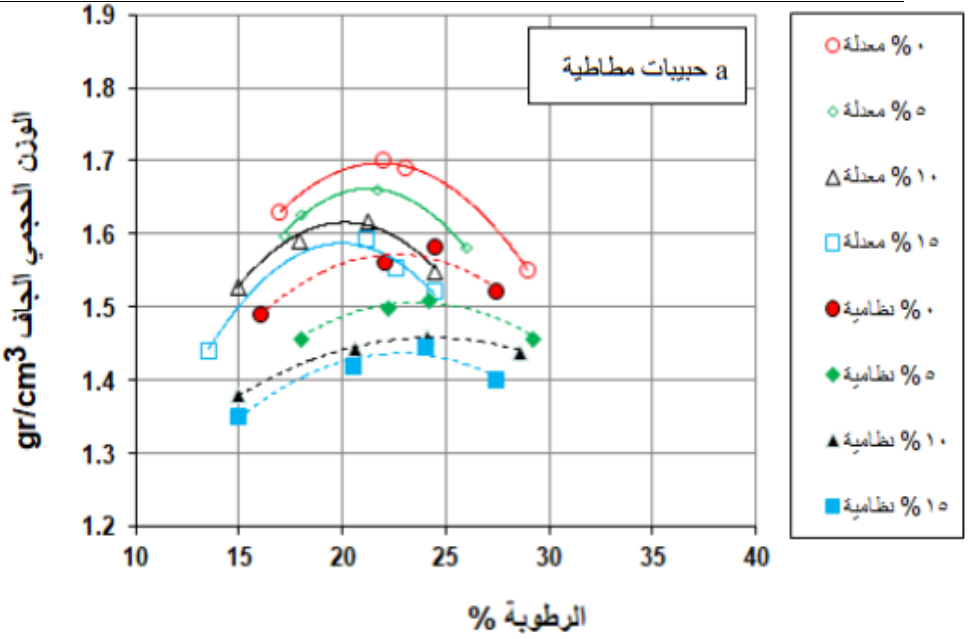
خلط التربة مع مطاط حبيبات خلط التربة مع مطاط قطع

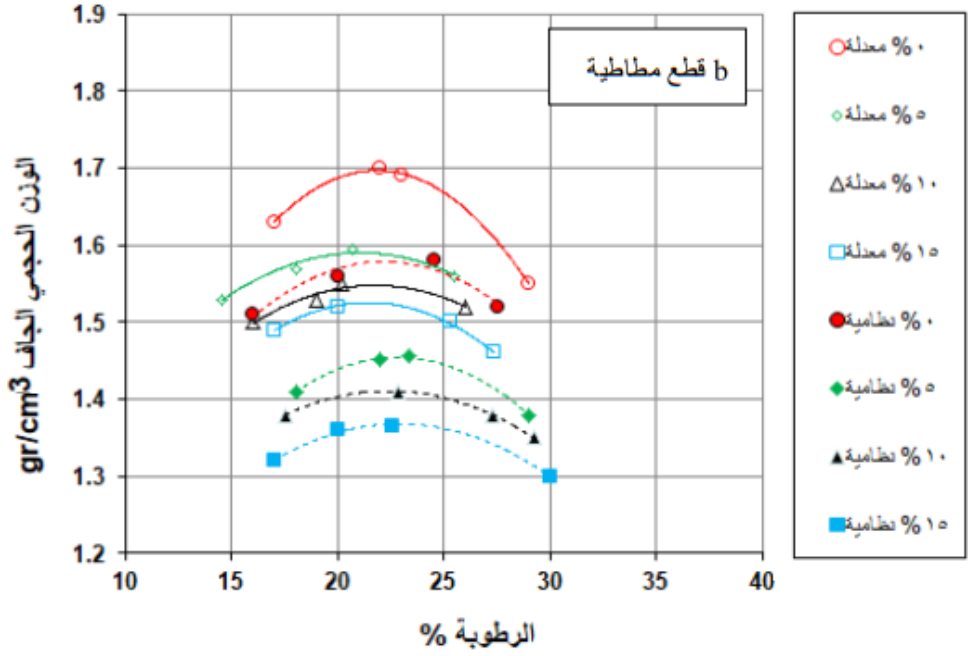
الشكل رقم (4) تحضير العينات مع المطاط الحبيبات والقطع

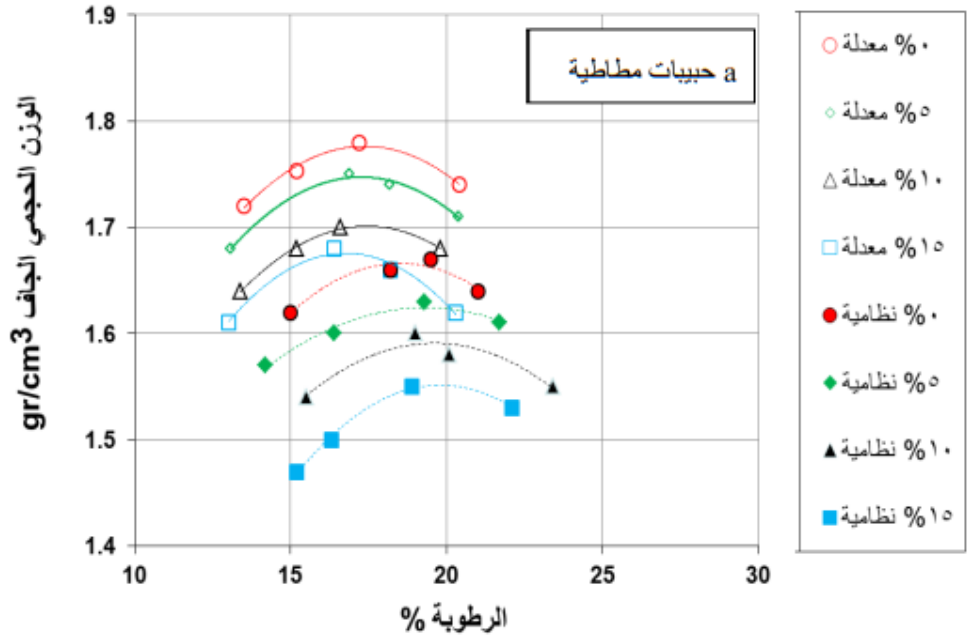
<u>أولا :</u> تجارب بروكتور:

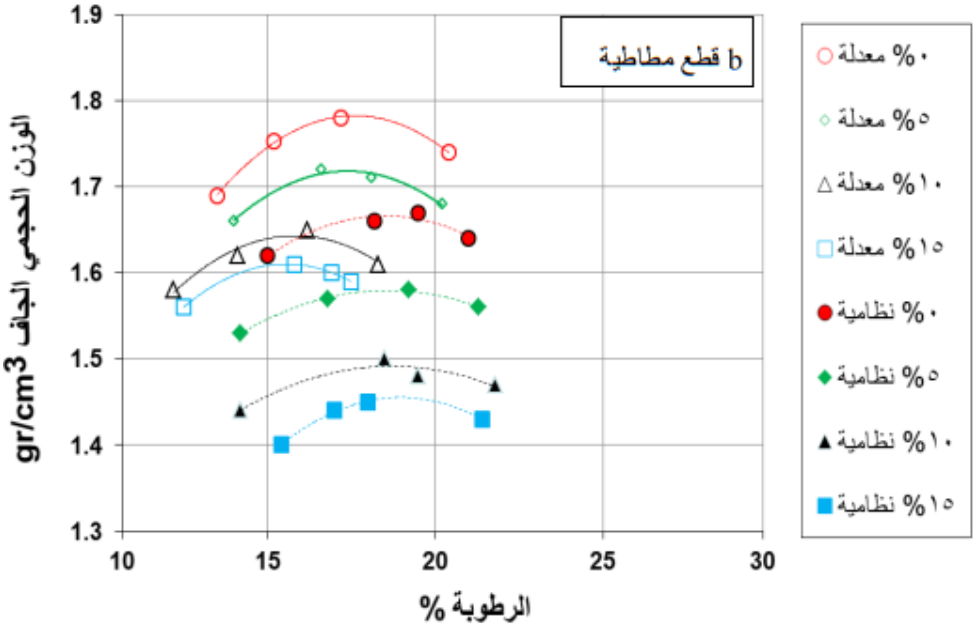
تم دراسة تغير خصائص الرص للعينات المشكلة الرطوبة المثالية والوزن الحجمي الجاف الأعظمي من أجل تجربة بروكتور وفق كل من الشروط النظامية والمعدلة ، ويبين الشكل رقم (5) والشكل رقم (6) نتائج تجارب بروكتور النظامية والمعدلة مع نسب الحبيبات و القطع المطاطية من أجل تربة مصياف وتربة جامعة حمص على التوالي .

يبين الجدول رقم (2) والجدول رقم (3) قيم الرطوبة المثالية والوزن الحجمي الجاف الأعظمي المستخرجة من تجارب بروكتور النظامية والمعدلة مع نسب المطاط المضافة من أجل كل من الحبيبات والقطع المطاطية من أجل تربة مصياف وتربة جامعة حمص على التوالي


a حبيبات مطاطية
الوزن الحجمي الجاف gr/cm3
الرطوبة %
1.9
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
10
15
20
25
30
35
40
٠ % معدلة
٥ % معدلة
١٠ % معدلة
١٥ % معدلة
٠ % نظامية
٥ % نظامية
١٠ % نظامية
١٥ % نظامية


b قطع مطاطية
الوزن الحجمي الجاف gr/cm3
الرطوبة %
1.9
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
10
15
20
25
30
35
40
٠ % معدلة
٥ % معدلة
١٠ % معدلة
١٥ % معدلة
٠ % نظامية
٥ % نظامية
١٠ % نظامية
١٥ % نظامية


a حبيبات مطاطية
الوزن الحجمي الجاف gr/cm3
الرطوبة %
1.9
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
10
15
20
25
30
٠% معدلة
٥% معدلة
١٠% معدلة
١٥% معدلة
٠% نظامية
٥% نظامية
١٠% نظامية
١٥% نظامية


b قطع مطاطية
الوزن الحجمي الجاف gr/cm3
الرطوبة %
1.9
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
1.3
10
15
20
25
30
٠% معدلة
٥% معدلة
١٠% معدلة
١٥% معدلة
٠% نظامية
٥% نظامية
١٠% نظامية
١٥% نظامية

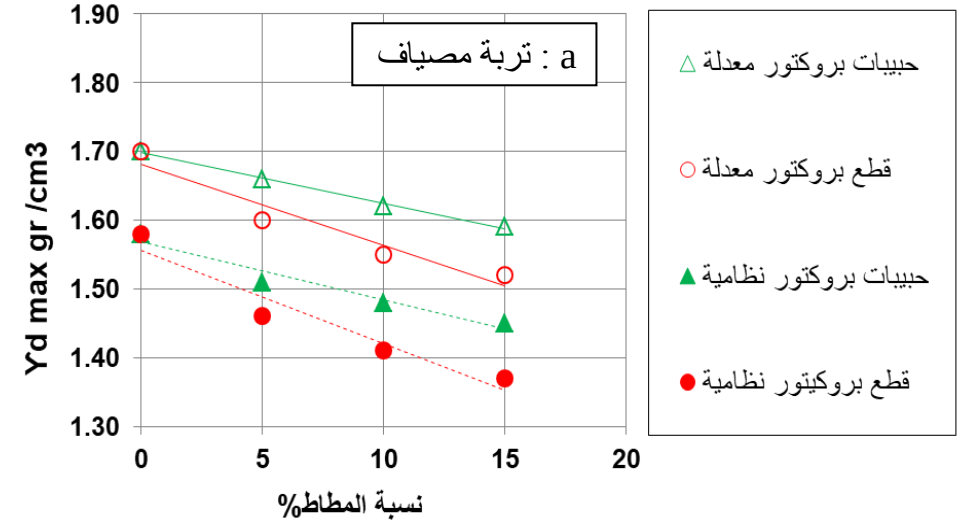
الجدول رقم (2) : قيم خواص الرص لتجارب بروكتور في تربة مصياف

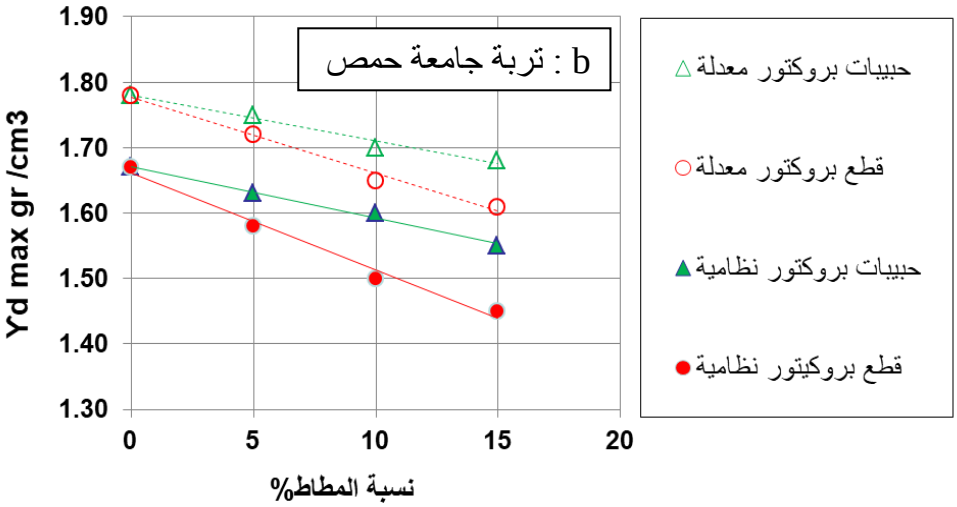
نسبة المطاط%		بروكتورنظامية		بروكتورمعدلة	
		γd_{max} gr /cm^3	W% opt	γd_{max} gr /cm^3	W% opt
0		1.58	24.5	1.70	22.0
5	**حبيبات**	1.51	24.2	1.66	21.7
10		1.48	24.1	1.62	21.3
15		1.45	24.0	1.59	21.1
5	**قطع**	1.46	23.3	1.60	20.7
10		1.41	22.8	1.55	20.2
15		1.37	22.6	1.52	20.0

الجدول رقم (3) : قيم خواص الرص لتجارب بروكتور في تربة جامعة حمص

نسبة المطاط%		بروكتورنظامية		بروكتورمعدلة	
		γd_{max} gr /cm^3	W% opt	γd_{max} gr /cm^3	W% opt
0		1.67	19.5	1.78	17.2
5	**حبيبات**	1.63	19.3	1.75	16.9
10		1.6	19	1.71	16.6
15		1.55	18.9	1.68	16.4
5	**قطع**	1.58	19.2	1.72	16.6
10		1.5	18.5	1.65	16.2
15		1.45	18	1.61	15.8

وبرسم تغير العلاقة بين نسبة المطاط المضافة (قطع ، حبيبات) والوزن الحجمي الجاف الأعظمي الناتج من تجربتي بروكتور النظامية والمعدلة من أجل تربة مصياف و تربة جامعة حمص تنتج العلاقات الخطية كما في الشكل رقم(7)





الشكل رقم (7) : العلاقة بين نسبة المطاط المضافة والوزن الحجمي الجاف الأعظمي

من الشكل السابق رقم (7) يمكن التوصل لعلاقات خطية بدقة مقبولة لمعامل الارتباط (R^2=(0.93−0.99) فمن أجل تربة مصياف نتجت العلاقات التالية :

-حبيبات مطاطبية مع بركتور معدلة: $y = -0.0074x + 1.698$: $R^2 = 0.996$

-قطع مطاطبية مع بركتور معدلة: $y = -0.0118x + 1.681$: $R^2 = 0.932$

-حبيبات مطاطبية مع بركتور نظامية: $y = -0.0084x + 1.568$: $R^2 = 0.948$

-قطع مطاطبية مع بركتور نظامية: $y = -0.0136x + 1.557$: $R^2 = 0.929$

ومن أجل تربة جامعة حمص نتجت العلاقات التالية :

-حبيبات مطاطبية مع بركتور معدلة: $y = -0.007x + 1.78$: $R^2 = 0.976$

-قطع مطاطبية مع بركتور معدلة: $y = -0.0116x + 1.777$: $R^2 = 0.989$

-حبيبات مطاطبية مع بركتور نظامية: $y = -0.0078x + 1.671$: $R^2 = 0.991$

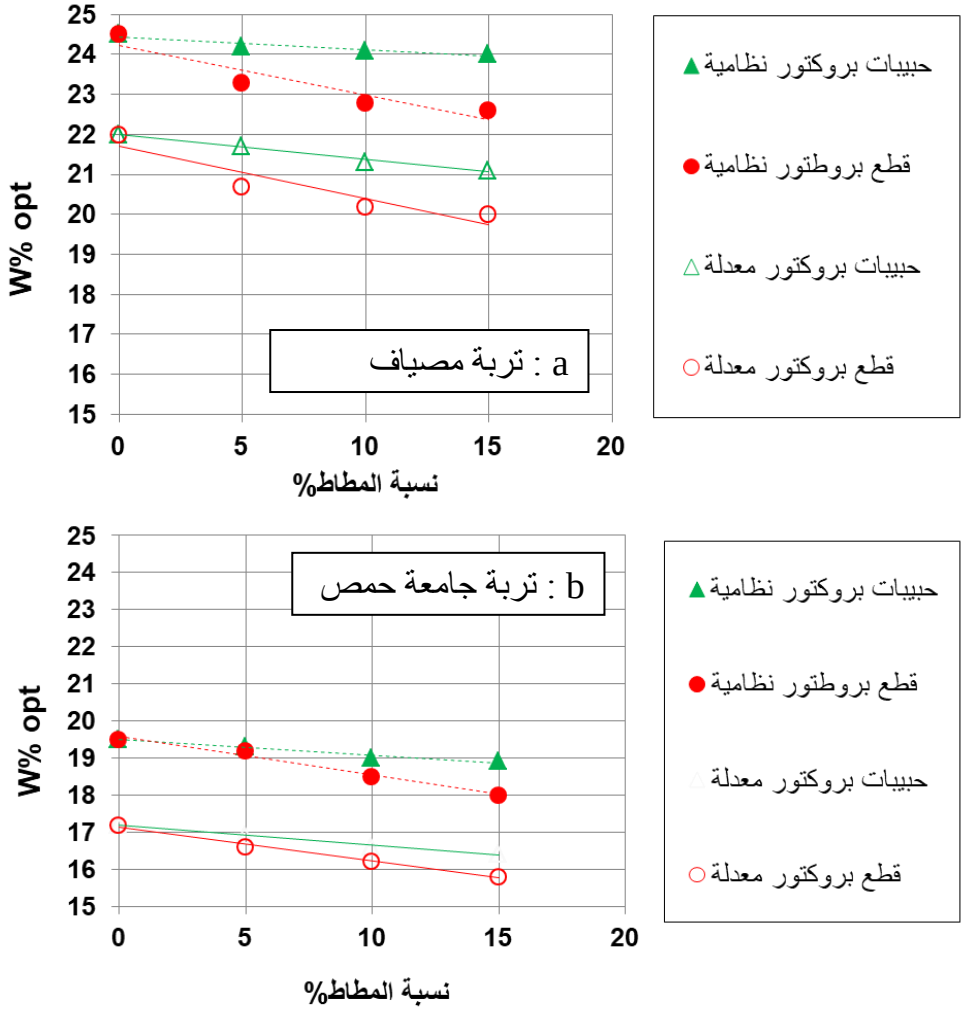
-قطع مطاطبية مع بركتور نظامية: $y = -0.0148x + 1.661$: $R^2 = 0.985$

يمكن تلخيص العلاقات السابقة والتوصل لعلاقات خطية وسطية تعطي الوزن الحجمي الجاف الأعظمي حسب نسبة المطاط S ونوعه قطع أو حبيبات :

- من أجل مطاط حبيبات : $\gamma_{d\max} = -8^{-3} * S + 1.67$
- من أجل مطاط قطع : $\gamma_{d\max} = -0.013 * S + 1.67$

مما سبق نجد انخفاض الوزن الحجمي الجاف الأعظمي كلما زادت نسبة المطاط وفق علاقات خطية ويفسر ذلك بسبب أن المطاط ذو وزن حجمي أقل من التربة الأصلية ، ويكون الانخفاض من أجل المطاط القطع بميل أكبر من المطاط الحبيبات سواء كانت شروط التجربة نظامية أو معدلة ، ويكون مقدار الانخفاض في الوزن الحجمي الجاف الأعظمي متقارب في نوعي التربة بشكل عام عند ثبات نوع المطاط وشروط التجربة .

وبرسم تغير العلاقة بين نسبة المطاط المضافة (قطع ، حبيبات) و الرطوبة المثالية الناتجة من تجربتي بروكتور النظامية والمعدلة من أجل تربة مصياف و تربة جامعة حمص تنتج العلاقات الخطية كما في الشكل رقم(8)



الشكل رقم (8) : العلاقة بين نسبة المطاط المضافة والرطوبة المثالية

من الشكل السابق رقم (8) يمكن التوصل لعلاقات خطية بدقة مقبولة لمعامل الارتباط (R^2=(0.88–0.99) فمن أجل تربة مصياف نتجت العلاقات التالية :

–حبيبات مطاطبية مع بركتور نظامية :$R^2 = 0.914$ $y = -0.032x + 24.44$

–قطع مطاطبية مع بركتور نظامية :$R^2 = 0.882$ $y = -0.124x + 24.23$

–حبيبات مطاطبية مع بركتور معدلة :$R^2 = 0.986$ $y = -0.062x + 21.99$

-قطع مطاطبية مع بركتور معدلة :$y = -0.13x + 21.7 : R^2 = 0.87$

ومن أجل تربة جامعة حمص نتجت العلاقات التالية :

-حبيبات مطاطبية مع بركتور نظامية :$y = -0.042x + 19.49 : R^2 = 0.97$

-قطع مطاطبية مع بركتور نظامية :$y = -0.104x + 19.58 : R^2 = 0.98$

-حبيبات مطاطبية مع بركتور معدلة :$y = -0.054x + 17.18 : R^2 = 0.992$

-قطع مطاطبية مع بركتور معدلة :$y = -0.092x + 17.14 : R^2 = 0.989$

يمكن تلخيص العلاقات السابقة والتوصل لعلاقات خطية وسطية تعطي الرطوبة المثالية حسب نسبة المطاط S ونوعه قطع أو حبيبات وحسب نوع التربة :

- من أجل مطاط حبيبات من أجل تربة مصياف وتربة جامعة حمص:

$\omega_{opt} = -0.05 * S + 23.22$:

- من أجل مطاط قطع :

- تربة مصياف : $\omega_{opt} = -0.13 * S + 22.97$

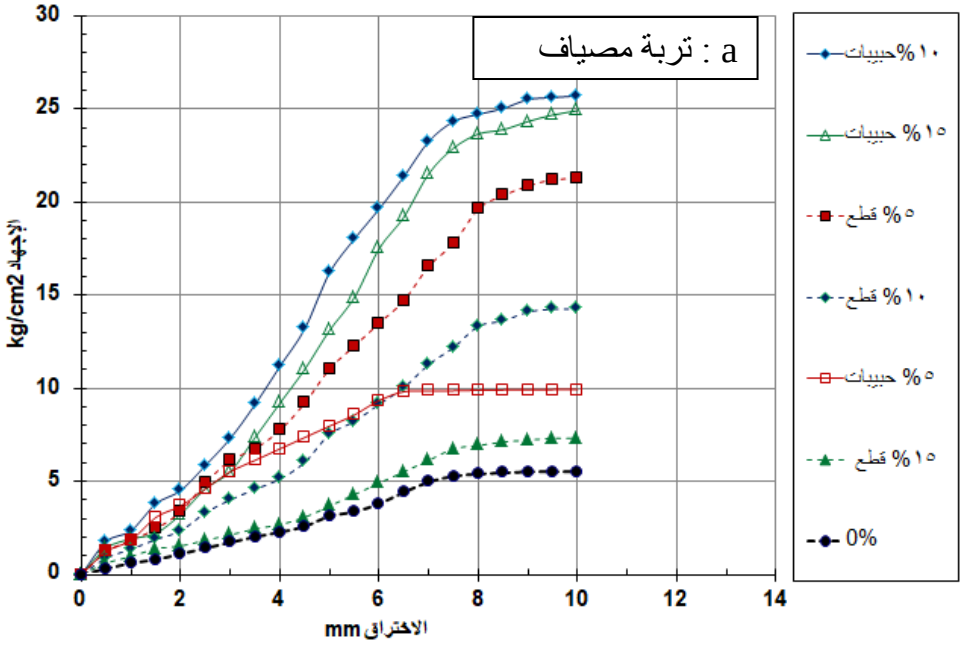
-تربة جامعة حمص : $\omega_{opt} = -0.05 * S + 23.22$

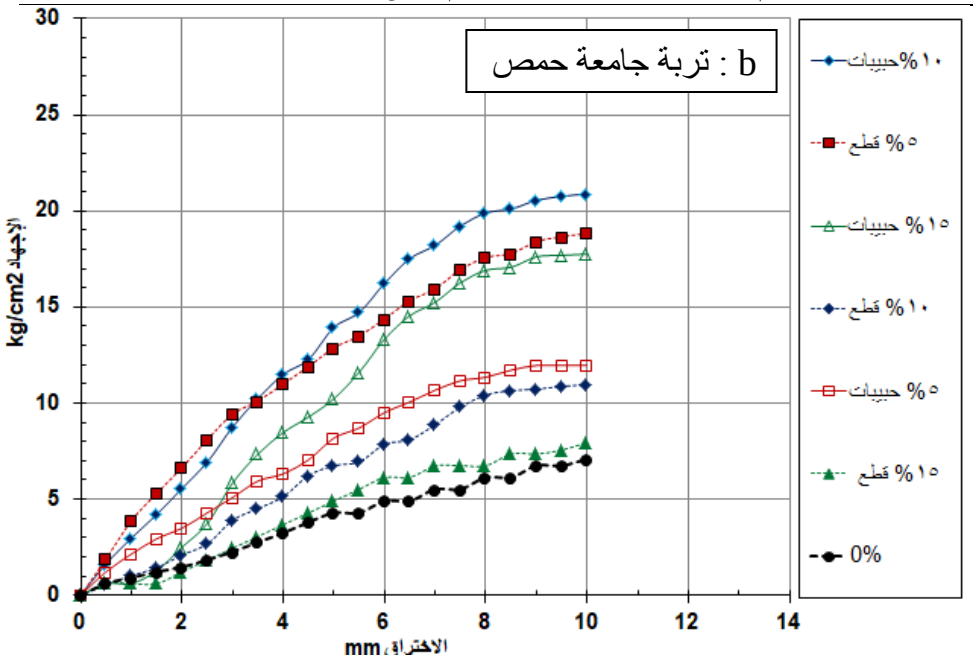
مما سبق نجد انخفاض الرطوبة المثالية كلما زادت نسبة المطاط وفق علاقات خطية ويفسر ذلك كون المطاط لايمتص رطوبة ، ويكون الانخفاض من أجل المطاط القطع بميل أكبر من المطاط الحبيبات سواء كانت شروط التجربة نظامية أو معدلة ، وكلما زادت نسبة المطاط بشكل عام يكون مقدار الانخفاض في الرطوبة المثالية أكبر في تربة مصياف غضار عالي اللدونة من تربة جامعة حمص سيلت عالي اللدونة عند ثبات نوع المطاط ونسبته وشروط التجربة نظامية أو معدلة.

ثانيا : نسبة تحمل كاليفورنيا CBR:

تم تشكيل العينات في قالب CBR وفق خصائص الرص لتجارب بروكتور المعدلة وتم غمر العينات المشكلة بالماء لمدة أربع أيام قبل التحميل ، حيث لوحظ انتفاخ العينات في تربة مصياف بتشوه نسبي قدره 12.5% تربة عالية الانتفاخ ، أما تربة جامعة حمص انتفخت بتشوه نسبي قدره 10.8% وتصنف أنها متوسطة الانتفاخ

ويبين الشكل رقم (9) نتائج تجاربCBR مع نسب المطاط المضافة (قطع وحبيبات) من أجل تربة مصياف و تربة جامعة حمص .





الشكل رقم (9) : نتائج تجاربCBR مع نسب المطاط المضافة قطع وحبيبات

ومن المنحنيات التجريبية السابقة الواردة في الشكل رقم(9) ومن أجل مقدار الاختراق 5mm تحسب قيم CBR للترب الناعمة المدروسة مع نسب المطاط المضافة قطع وحبيبات وترتب في الجدول رقم (4)

الجدول رقم (4) : تغير قيمCBR مع نسب المطاط المضافة قطع وحبيبات

CBR%		نسب المطاط%	
تربة جامعة حمص	تربة مصياف		
4.1	3.0	0	
7.8	7.6	5	**حبيبات**
13.3	15.4	10	
9.7	12.5	15	

قطع	5	10.5	12.3
	10	7.2	6.4
	15	3.5	4.7

وبرسم العلاقة بين نسب المطاط المضافة وقيم CBR للترب الناعمة المدروسة ينتج المخطط في الشكل رقم (10) يمكن التوصل لعلاقات منحنية من الدرجة الثالثة بمعامل ارتباط $R^2=1$

-حبيبات مع تربة مصياف: $y = -0.0185x^3 + 0.342x^2 - 0.3267x + 3$

-حبيبات مع تربة جامعة حمص: $y = -0.0145x^3 + 0.254x^2 - 0.1667x + 4.11$

-قطع مع تربة جامعة حمص: $y = 0.0244x^3 - 0.648x^2 + 4.27x + 4.1$

-قطع مع تربة مصياف : $y = 0.0139x^3 - 0.424x^2 + 3.2733x + 3$

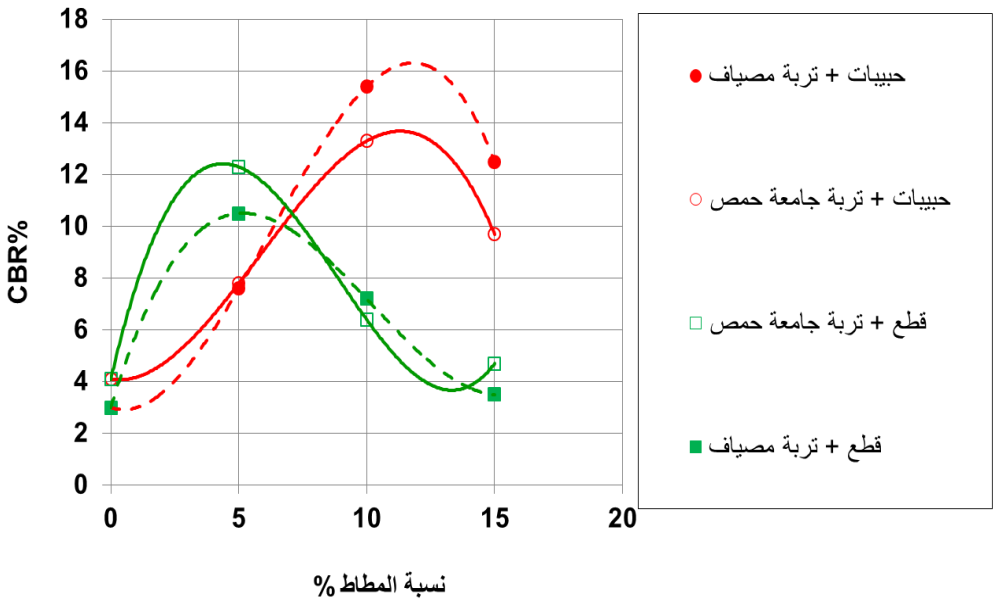
يمكن تلخيص العلاقات السابقة والتوصل لعلاقات منحنية من الدرجة الثالثة وسطية تعطي قيمCBR حسب نسبة المطاط S ونوعه قطع أو حبيبات بغض النظر عن نوع التربة وخواصها الانتفاخية :

- من أجل الحبيبات المطاطية:

$$CBR = -0.017 * S^3 + 0.3 * S^2 - 0.25 * S + 3.55$$

- من أجل القطع المطاطية :

$$CBR = 0.019 * S^3 - 0.54 * S^2 + 3.77 * S + 3.55$$



الشكل رقم (10) : العلاقة بين نسب المطاط وقيمCBR للترب الناعمة المدروسة

مما سبق نجد زيادة في قيمة CBR للتربة عند إضافة المطاط حتى نسبة معينة وبعد هذه النسبة انخفضت قيمة CBR ، ويفسر ذلك في البداية عمل المطاط على تشكيل مادة رابطة في التربة وزادت قيمة CBR ، لكن بزيادة نسبة المطاط عن حد معين بقي المطاط الفائض منعزل عن حبات التربة والمطاط بالأصل مادة ذات انضغاطية عالية وسبب ذلك تخفيض في قيمة CBR ، وإن خلط الحبيبات المطاطية مع الترب الناعمة أدى لزيادة قيمة CBR بفعالية أكبر من استخدام القطع المطاطية يفسر ذلك بسبب أن القطع المطاطية المستخدمة ناتجة من إطارات تالفة تعرضت مسبقاً للتشوهات ، بينما الحبيبات المطاطية المستخدمة أقل انضغاطاً وتشوهاً ، كذلك يمكن تفسير النتائج السابقة أن المطاط الفائض وخاصة في حالة القطع قد ساعد على دخول فقاعات هواء واحتجازها داخل العينة مما ساهم في إضعافها.

-النسبة الأفضل من المطاط الحبيبات هي 10 % ، وفي المطاط القطع هي 5%

-عند خلط الترب الناعمة مع الحبيبات المطاطية بنسبة 10% زادت قيمة CBR حوالي 5 أضعاف من أجل في تربة مصياف غضار عالية اللدونة ، كذلك زادت بمقدار 3 أضعاف من أجل تربة جامعة حمص سيلت عالي اللدونة ، وعند زيادة نسبة الحبيبات المطاطية عن 10% بدأت قيم CBR بالانخفاض.

-عند خلط الترب الناعمة مع القطع المطاطية بنسبة 5% زادت قيمةCBR حوالي 3.5 أضعاف في تربة مصياف غضار عالية اللدونة ، كذلك زادت بمقدار 3 أضعاف من أجل تربة جامعة حمص سيلت عالي اللدونة ، وعند زيادة نسبة القطع المطاطية عن 5% بدأت قيم CBR بالانخفاض .

5-الإستنتاجات والتوصيات :

تم التوصل إلى عدة استنتاجات فيما يخص تأثير خلط المطاط مع الترب الناعمة ويجب التنويه إلى أن هذه الاستنتاجات تتوافق مع الترب الناعمة والمطاط المستخدم في هذا البحث ونذكر فيما يلي أهم الاستنتاجات التي تم التوصل إليها :

1- عند إضافة المطاط للترب الناعمة ينخفض كلاً من الوزن الحجمي الجاف الأعظمي والرطوبة المثالية وفق علاقات خطية حسب نسبة المطاط ونوعه قطع أو حبيبات

2- عند زيادة نسبة المطاط يكون مقدار الانخفاض في الرطوبة المثالية أكبر في تربة مصياف غضار عالي اللدونة من تربة جامعة حمص سيلت عالي اللدونة ، أما مقدار الانخفاض في الوزن الحجمي الجاف الأعظمي متقارب في نوعي التربة بشكل عام.

3- عند إضافة المطاط القطع للتربة الناعمة يكون انخفاض الوزن الحجمي الجاف الأعظمي والرطوبة المثالية بشكل أكبر من المطاط الحبيبات عند ثبات الشروط الأخرى

4- تتغير قيم CBR مع زيادة نسب المطاط وفق علاقات منحنية من الدرجة الثالثة تم استنتاجها ، وبشكل عام تزداد قيمة CBR للتربة عند إضافة المطاط حتى نسبة معينة وبعد هذه النسبة تنخفض قيمة CBR ، وتكون النسبة الأفضل من المطاط القطع هي 5% ، أما في المطاط الحبيبات النسبة الأفضل هي 10%

5- فعالية الحبيبات المطاطية في تحسين قيمة CBR أفضل في غضار عالي اللدونة من السيلت العالي اللدونة فعند خلط تربة مصياف مع الحبيبات بنسبة 10%زادت قيمة CBR حوالي 5 أضعاف ، أما من أجل تربة جامعة حمص زادت قيمة CBR حوالي 3 أضعاف .

6- فعالية القطع المطاطية في تحسين قيمة CBR متقاربة في نوعي الترب الناعمة فعند خلط تربة مصياف مع القطع بنسبة 5% زادت قيمة CBR حوالي 3.5 أضعاف أما من أجل تربة جامعة حمص زادت قيمة CBR حوالي 3 أضعاف

7-نوصي بدراسة سلوك الترب الناعمة المخلوطة مع المطاط بشكل حقلي ودراسة تأثير عوامل الحت والانجراف على التربة المعالجة وإمكانية التنبؤ بمدى استدامتها.

8-نوصي بإجراء دراسة لتحسين التربة الغضارية باستخدام ألياف مطاطية و دراسة فعالية استخدام تثبيت التربة بالمطاط مع إضافات أخرى مثل الاسمنت والكلس

6-المراجع :

[1] - Heyer,L.C. (2012)."Swell, Stiffness and Strength of Expansive soil - Rubber (esr)Mixtures at various scales : effect of specimen and rubber particle sizes .".Colorado State University.

[2] - Scholar, M.E.(2017) ."Stabilization of Clay Soil Mixed With Rubber Tyre Chips For Design in Road Construction " India.

[3] - Ravichandran, P. T. and Shiva, A.P. (2016). "Effect of Addition of Waste Tyre Crumb Rubber on Weak Soil Stabilisation Indian". Journal of Science and Technology

[4] - Vasavi, and Prasad.(2016)." Stabilization Of Expansive Soil UsingCrumb Rubber Powder And Cement"State University.

[5] - Agawane, N.and Pachpute, S.(2019)." Soil Stabilization Using Waste Rubber"International Journal of Scientifi Engineering Research

[6] - Juliana, A. R. Fatin, R. Rozaini.(2020). "Effectiveness of crumb rubber for subgrade soil stabilization".Materials Science and Engineering

[7] - Dumlupinar, K.(2022)." Evaluation of Geotechnical Behavior of Clay Soil with Crumb rubber addition"