مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية والمعمارية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 6

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

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

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

أ- قياس الورق 17.5×25 B5.

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

ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8

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

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

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

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

9- تقديم أي بحث للنشـر في المجلة يدل ضـمناً على عدم نشـره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة 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 (600) ل.س ستمئة ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.**
2. **دفع رسم نشر (2000) ل.س الفا ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .**
3. **دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .**
4. **دفع مبلغ (150) ل.س مئة وخمسون ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.**

المحتوى

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
دراسة سلوك الصفائح الفولاذية ومادة الإيبوكسي باستخدام تقنية ارتباط الصور الرقمية	الياس طعمه د.غصون دنهش	32-11
إدراج صنف الموقع في توابع الهشاشة الزلزالية: منهجية قائمة على استخدام المتغيرات الوهمية	د. حنان حسين	54-33
التحليل الزلزالي الستاتيكي اللّاخطي للأنظمة الإنشائية الإطارية ذات بلاطات الجيزان المتصالبة والمدعّمة بعناصر تربيط مركزية ضخمة	د. ريم خرتش	76-55
استخدام مواد مالئة محلية معاد تدويرها لرفع كفاءة المعالجة في الأراضي الرطبة الصنعية	شادي تقلا د. غادة بلال	117-77

Investigation of Tensile Behavior of Steel Plates and Epoxy Material Using Digital Image Correlation

Elias Toumeh [1], Ghoson Danhash[2]

1 Master student at structural civil engineering college /Homs University.

2 Head of structural engineering department at civil engineering college /Homs University.

Abstract:

This study aims to investigate the tensile behavior of steel plates and Epoxy material by employing both conventional and advanced deformation measurement techniques. Tensile deformations were monitored using the traditional linear variable differential transformer (LVDT) alongside the optical, non-contact digital image correlation (DIC) technique. The DIC method operates by capturing high-resolution images before and after deformation, allowing full-field measurement of displacements and strains without physically contacting or damaging the specimen.

Specimens were prepared by applying a high-contrast speckle pattern on the surface to facilitate accurate image tracking. Video recordings of the tensile tests were processed to extract displacement and strain data, which were then compared against the results obtained from LVDT. This comparison aimed to evaluate the accuracy, advantages, and limitations of each measurement technique, especially focusing on the effectiveness of DIC in complex hybrid steel-epoxy interfaces.

The results demonstrated strong correlation and agreement between the DIC and conventional methods, confirming DIC as a reliable tool for capturing detailed strain distributions over time. The optical technique also overcame common issues observed with contact sensors, such as slip and localized measurement errors.

This research contributes valuable insight into the application of DIC for hybrid joint testing, supporting its use in structural engineering design and numerical modeling validation, and enhancing understanding of tensile mechanics in composite materials.

Keywords:

Steel, epoxy, Digital Image Correlation DIC, tensile behavior.

دراسة سلوك الصفائح الفولاذية ومادة الإيبوكسي باستخدام تقنية ارتباط الصور الرقمية

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى التحقق في سلوك مادتي الفولاذ والإيبوكسي على الشد باستخدام كل من تقنيات قياس التشوه التقليدية والمتطورة. تم رصد تشوهات المواد على الشد باستخدام محول الإزاحة التفاضلي المتغير الخطي (LVDT) التقليدي إلى جانب تقنية ارتباط الصور الرقمية (DIC) البصرية عن بعد. تعمل طريقة DIC من خلال التقاط صور عالية الدقة قبل التشوه وبعده، مما يسمح بالقياس الكامل للإزاحات والانفعالات دون التلامس الفيزيائي مع العينة أو إتلافها.

تم تحضير العينات من صفائح فولاذية بحسب {(ISO6892-1:2019) المواد المعدنية – اختبار الشد – الجزء طريقة الاختبار في درجة حرارة الغرفة}.

بأبعاد مقطع (73 mm x 6.4 mm) وبطول حر بين الفكين (Lo = 122 mm) في جهاز الشد في مخبر البيتون في كلية الهندسة المدنية في جامعة حمص.

حيث أن Lo: عادةً ($5.65\sqrt{S_0}$ or $4\sqrt{S_0}$)،

S_0: هي مساحة المقطع العرضي الأصلي

بتطبيق نمط تنقيط عالي التباين على السطح لتسهيل التتبع الدقيق للصورة. تم معالجة التسجيلات المصورة لاختبارات الشد لاستخراج بيانات الإزاحة والانفعال، والتي تمت مقارنتها بعد ذلك بالنتائج المستخلصة منLVDT ، هدفت هذه المقارنة إلى تقييم دقة ومزايا وقيود كل تقنية قياس، مع التركيز بشكل خاص على فعالية DIC على سطوح الفولاذ–الإيبوكسي الهجينة المعقدة.

أظهرت النتائج وجود توافق قوي بين طريقة DIC والطرق التقليدية، مما يؤكد أن DIC أداة موثوقة لالتقاط توزيعات الانفعال التفصيلية عبر الزمن. كما أن التقنية البصرية تجاوزت المشكلات الشائعة الملاحظة مع أجهزة الاستشعار التلامسية، مثل الانزلاق وأخطاء القياس الموضعية.

يساهم هذا البحث في تقديم رؤى قيمة حول تطبيق DIC لاختبار الوصلات الهجينة، مما يدعم استخدامه في تصميم الهندسة الإنشائية والتحقق من النمذجة العددية، ويعزز فهم ميكانيكا الشد في المواد المركبة.

الكلمات المفتاحية:
فولاذ، الإيبوكسي، ارتباط الصور الرقمية DIC، السلوك الشدّي

Introduction

Determining the stress–strain curve in material testing is a critical factor for ensuring safe structural design due to its fundamental role in characterizing material behavior under various loading conditions and identifying critical load thresholds and appropriate safety factors [Danhash et al., 2012→2024]. The

stress–strain curve is widely used in tensile testing of steel to determine essential mechanical properties such as ultimate tensile strength, yield stress, modulus of elasticity, and strain at failure. These parameters are indispensable for selecting appropriate cross-sectional dimensions and evaluating the integrated performance of structural elements. Accurate stress–strain characterization of steel is particularly vital when incorporating the data into finite element modeling programs, such as ABAQUS, to verify the reliability and predictive capability of numerical simulations [Abdulahad & Danhash, 2025], [Danhash, 2025].

Various deformation measurement techniques exist, classified based on their working mechanisms, the equipment used, and installation methods. These include electrical conversion–based devices such as linear variable differential transformers (LVDT), resistance change–based sensors like strain gauges, and advanced optical methods relying on image processing algorithms, such as digital image correlation (DIC).

Digital Image Correlation (DIC) technique

DIC is a non-contact optical method for studying surface deformations without damaging or physically interacting with the specimen. It operates by comparing digital images taken before and after the deformation of the specimen surface, allowing monitoring of displacements, strains, velocities, and accelerations in all directions over the entire surface [Gdoutos, 2022]. Initially, the specimen surface is cleaned and painted white, followed by applying a speckle pattern with approximately 50% black spray over the white background. During tensile loading, video is captured under steady lighting

conditions, with the camera positioned perpendicular to the surface and set to high resolution [Rossman et al., 2017].

The recorded video undergoes several processing steps using specialized software: excess frames are removed to include only the loading phase until failure and images are converted to grayscale. The grayscale images are then imported into software such as GOM, where numerical algorithms calculate displacements of reference points (see Figure 1) using virtual extensometers placed in areas of interest. To ensure accurate measurements, a random speckle pattern is essential on the specimen surface as a reference for the correlation algorithm. In some materials, like cement, the naturally rough surface provides an inherent speckle pattern.

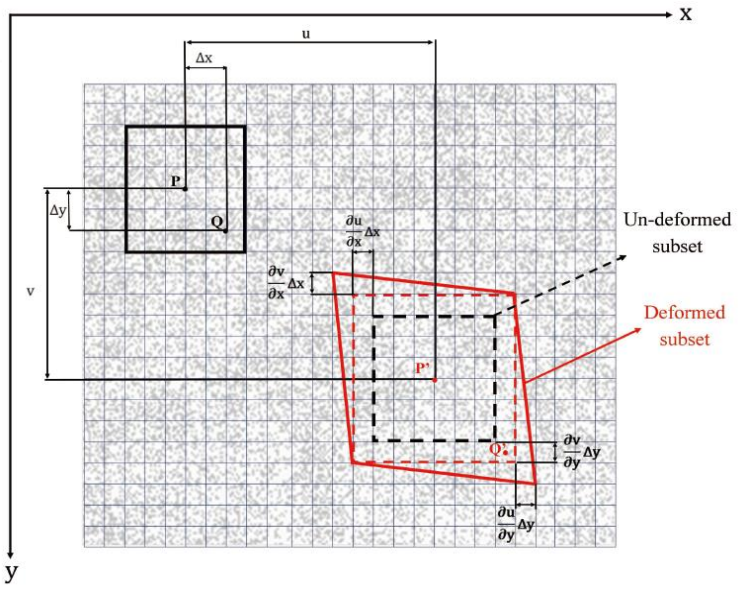


Figure 1. Principle of operation of the Digital Image Correlation (DIC) technique

Digital Image Correlation (DIC) has emerged as a reliable technique for studying the bond behavior between steel and recycled aggregate concrete, as well as for measuring strain in various materials. Research indicates that DIC-derived displacement-time curves align closely with those obtained from traditional methods like LVDT, confirming its effectiveness in experimental deformation tracking. DIC was employed to analyze bond-slip behavior in steel-recycled aggregate concrete, revealing that bond strength decreases with higher replacement ratios of recycled aggregates (Danhash et al., 2023). The study demonstrated that DIC results were comparable to LVDT measurements, validating its use in assessing bond behavior in concrete mixes with varying recycled content (Danhash et al., 2023). DIC has been validated for obtaining strain-time curves in tensile tests of steel, showing strong correlation with strain gauge measurements (Mousa et al., 2023). The technique's non-invasive nature and ability to provide full-field measurements enhance its applicability in structural testing, making it a preferred choice over traditional methods (Mousa et al., 2023).

Research Problem:

Tensile testing of steel plates aims to acquire the stress-strain curve, from which modulus of elasticity and yield stress are determined properties fundamental to steel design. However, challenges arise due to measurement inaccuracies, mostly caused by slipping of the steel plate within the grips of the tensile machine despite surface roughening and tack welding, resulting in erroneous displacement and strain data when using LVDT sensors attached to the grip jaws. Such issues prevent capturing precise strain-time and strain-stress relationships.

For validating the accuracy of DIC, the present study used two methods, the first involves securely welding attachment plates to the specimen surface to firmly fix the LVDT sensor, minimizing slip and measurement error; the second solution is to apply the DIC technique, which inherently eliminates slip measurement errors due to its non-contact nature.

The aim of the present study

The primary objective of this study is to validate the feasibility and accuracy of using the Digital Image Correlation (DIC) technique for strain measurement in tensile tests of steel plates, by comparing its results with those obtained from a welded-fixed LVDT sensor securely attached to the specimen surface. Additionally, the study aims to assess the effectiveness of DIC in measuring tensile elongation in two types of epoxy materials and to compare these measurements with elongation data provided by the tensile testing machine's computer software. The previous experimental curves are required in simulating the hybrid joints (steel-epoxy-CFRP) for obtaining the real behavior of the joint.

Experimental Procedure

Tensile Testing of Steel Specimens

Three steel specimens were tested with cross-sectional dimensions of 73×6.4 mm, Lo = 122 mm as shown in Figure 2. Tests were conducted using a universal tensile testing machine at the Concrete Laboratory, Faculty of Civil Engineering, University of Homs. Tensile deformations were recorded using an LVDT sensor initially mounted between the machine jaws (Figure 3).



Figure 2. The tensile experimental process of the steel plate

Initial results obtained via the LVDT, due to grip slippage during testing, produced unrealistic modulus of elasticity values (65.4 MPa).

The test was repeated with two types of measurements, where the LVDT was re-mounted directly onto the first face of the specimen (Figure 3) using welded steel attachment plates, ensuring stability and minimizing sensor drift during loading. This method, although effective, introduced localized weaknesses in thinner specimens.



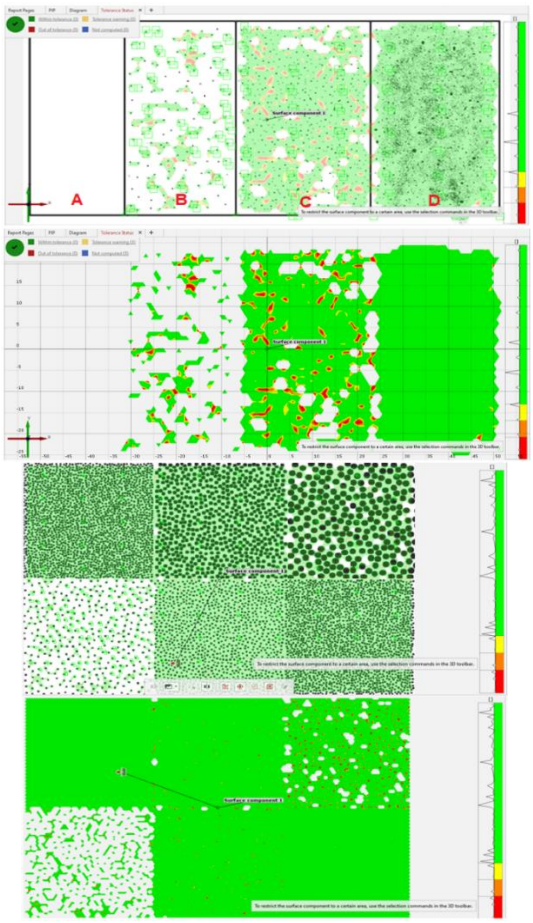
Figure 3. LVDT fixed on the steel plate

To facilitate DIC analysis, the second face of the specimen was first coated with white paint, followed by application of a black speckle pattern, and video recording was performed during loading. This two-faces measuring procedure was suggested for obtaining the elongation-time curve for the same specimen at the same time for validation DIC's measurements.

Multiple speckle pattern designs were evaluated in GOM (Figure 4) before the test, revealing that increased speckle density improved tracking quality. Pattern D was ultimately selected due to its high correlation quality, full tracking coverage, and ease of application with a brush. Sensor placement in GOM (Extensometer) is illustrated in Figure 5.

Displacement–time data were extracted from the LVDT via Excel (Figure 6) and from DIC-processed GOM data (Figure 7). The results showed strong agreement between LVDT and DIC measurements. Stress–strain curves

generated from both methods yielded modulus of elasticity $E = 200.4 \times 10^3 [MPa]$ and yield stress $Fy = 343\ [MPa]$, see (Figure 8).



(a) (b)

Figure 4. Speckle patterns density investigated in GOM

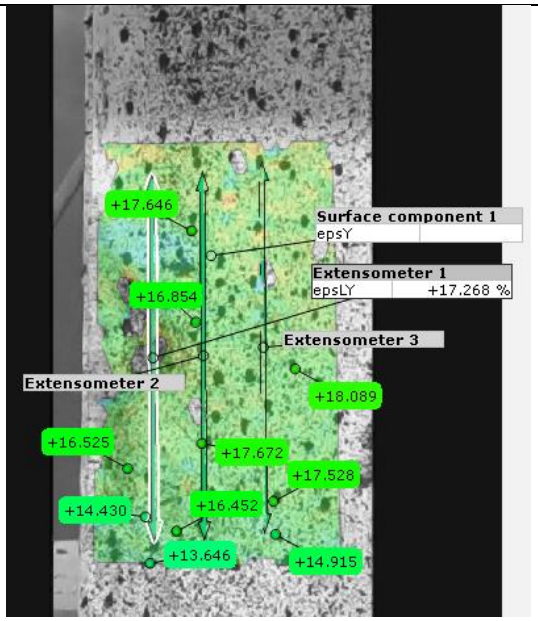


Figure 5. Sensors placement in GOM (Extensometers)

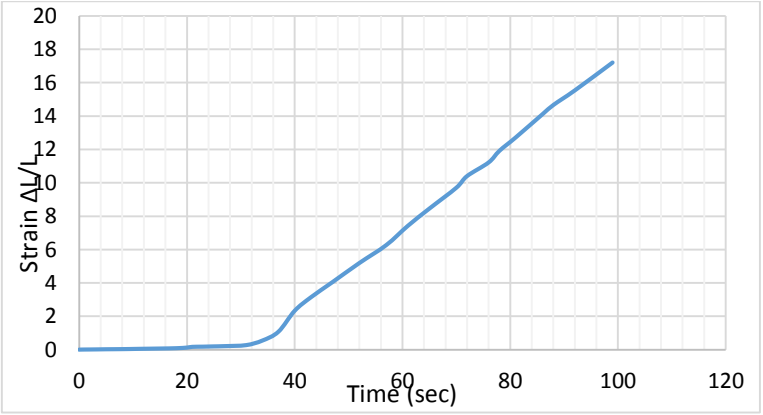


Figure 6. Stress–Time curve obtained from LVDT

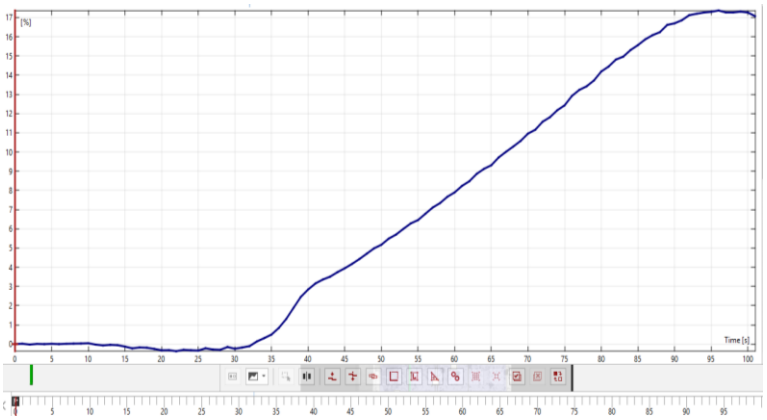


Figure 7. Stress–Time curve obtained from DIC

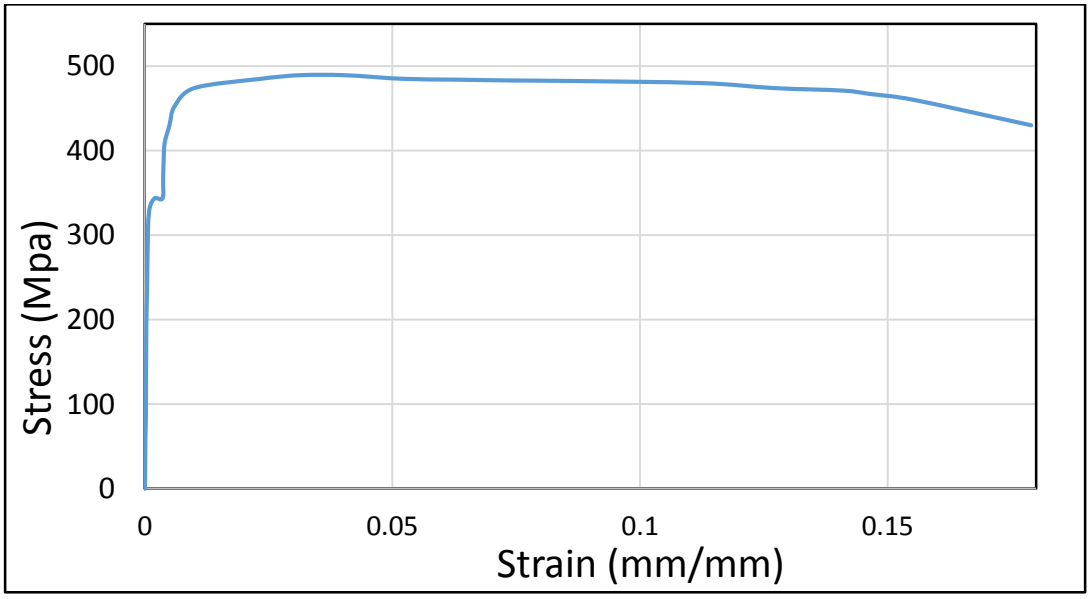


Figure 8. Stress–strain curve for steel plate

Tensile Testing of Epoxy Specimens

Sikadur–31 Epoxy

Three specimens (dog–bone) shape of Sikadur–31 epoxy were tested, conforming to ASTM C 881–78 Type 1, Grade 3, Class B + C specifications

with thickness of 4 mm and , Overall length: 165 mm (6.5 inches) Length of measurement: 50 mm (2 inches) , Width at the narrow section: 13 mm (0.5 inches) a mixing ratio of 2:1. as shown in Figure 10. Speckle patterns were applied, allowing GOM software to easily register reference points for vertical displacement tracking. Displacement–time curves obtained from the tensile machine (Figure 11), calculated from machine-connected computer software, closely matched those derived from DIC analysis, as shown in Figure 10.

Stress-strain curve then was obtained (Figure 12) enabling the calculating the tensile strength and fracture energy (required for finite element method), which is the area under the stress–strain curve, approximated by the triangle formed from maximum stress before failure and corresponding elongation. The average measured tensile strength was 8.39 [MPa].

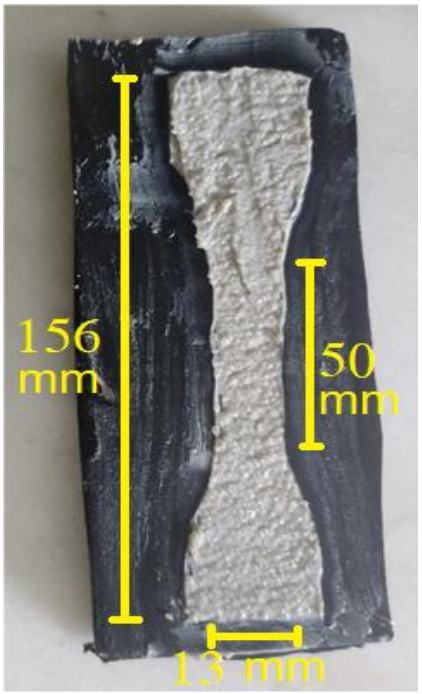


Figure 9: Epoxy sample dimensions

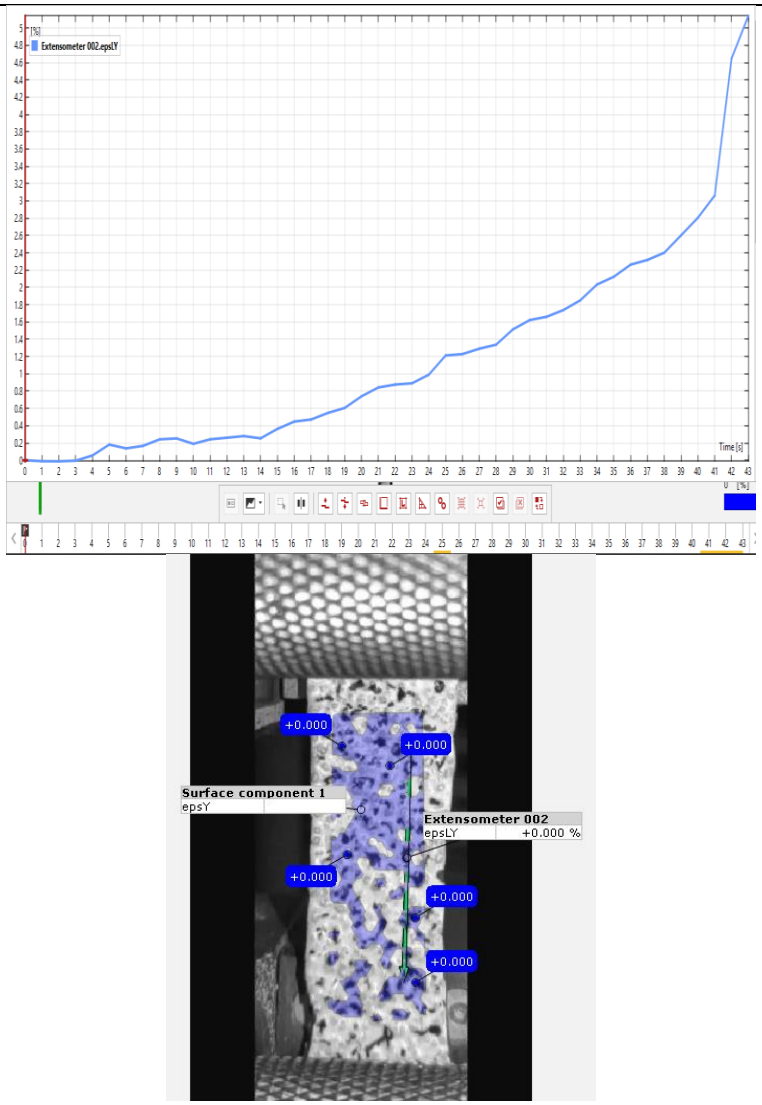
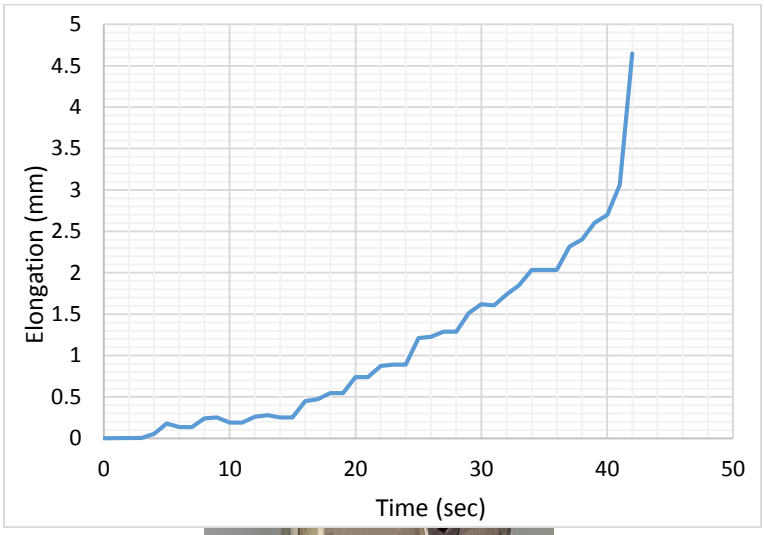


Figure 10. Elongation–time curve obtained from DIC for Sikadur–31 Epoxy



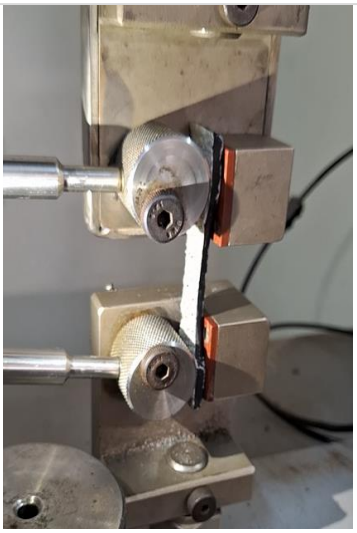


Figure 11. Elongation–time curve for Sikadur–31 Epoxy from tension machine

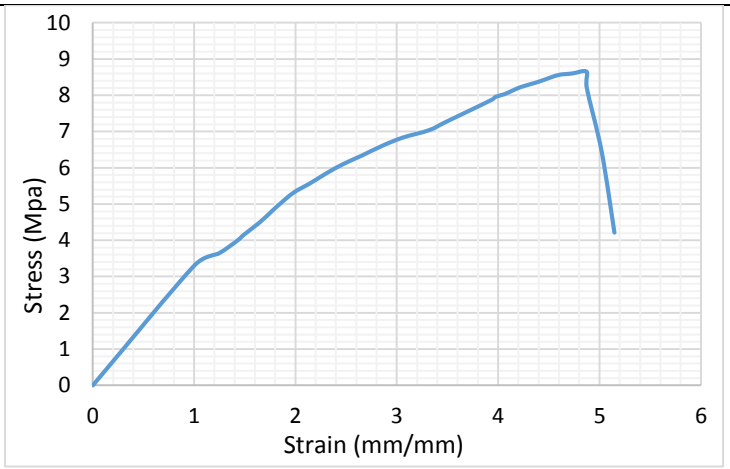


Figure 12. Stress–strain curve for Sikadur–31 Epoxy from tension machine

Ekostik Epoxy

Three specimens of fast–curing Ekostik epoxy were tested, with a 1:1 mixing ratio and thickness of 4 mm, to evaluate tensile strength and mechanical performance. Displacement–time curves obtained via DIC processing (Figure **13**) were in excellent agreement with curve recorded by the tensile machine (Figure 14). Stress–strain curves produced for these specimens confirmed the accuracy of DIC measurements. The average measured tensile strength was 6.82 [MPa], see (Figure 15).

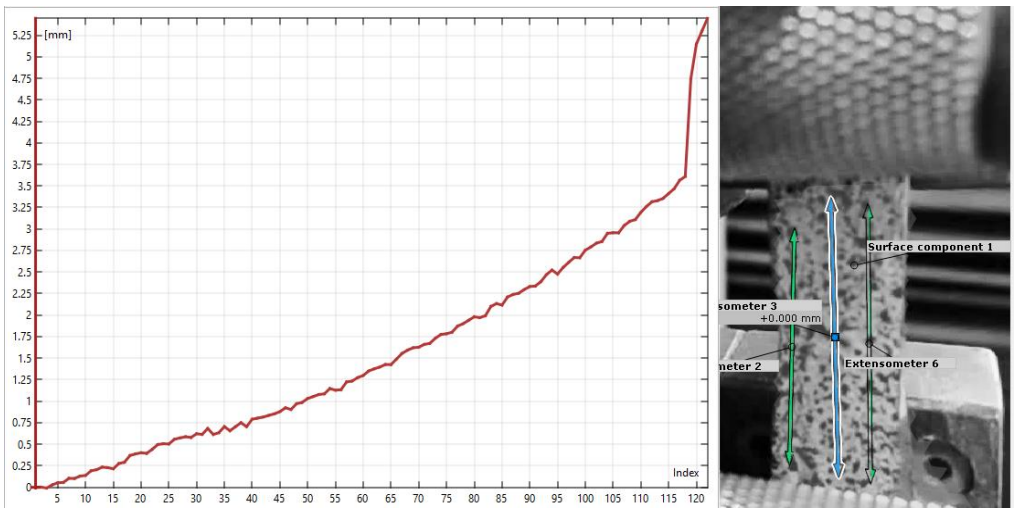


Figure 13. Stress–elongation curve for Ekostik Epoxy from DIC

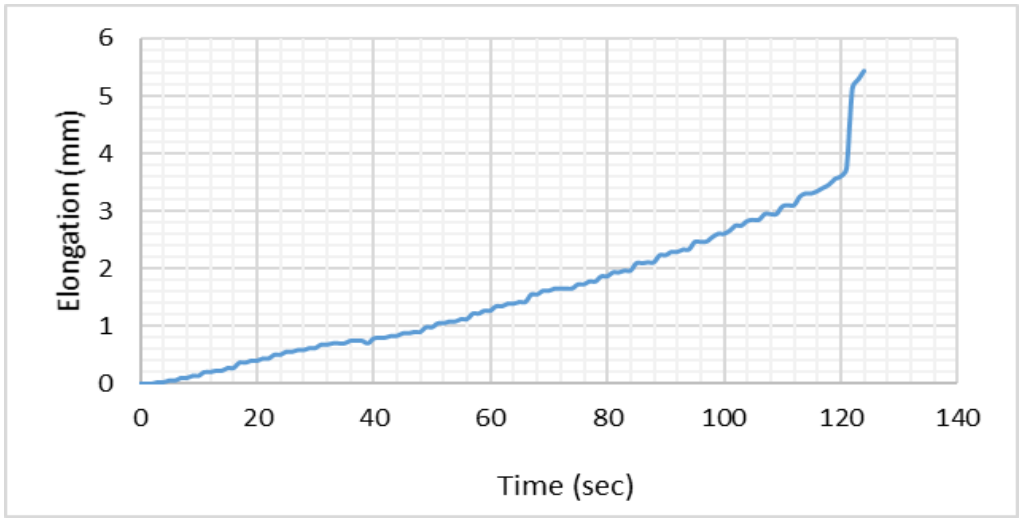


Figure 14. Stress–elongation curve for Ekostik Epoxy from tension machine

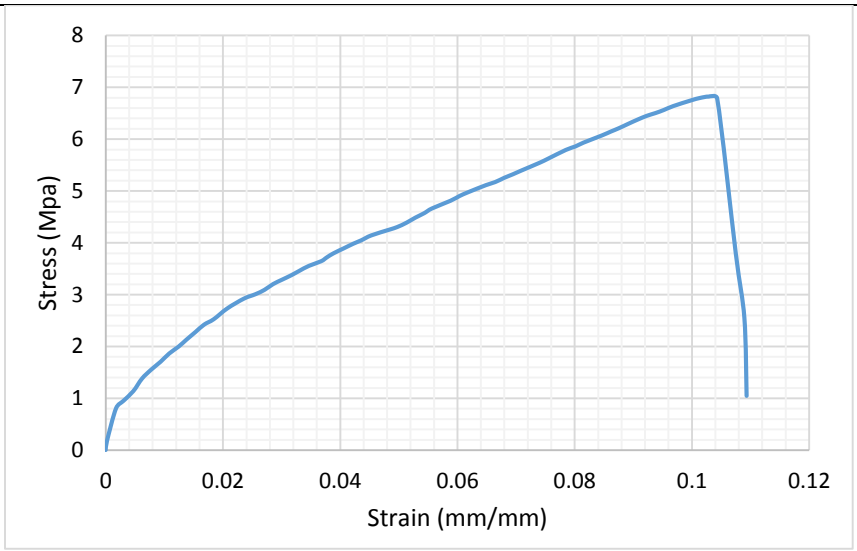


Figure 15. Stress–stress curve for Ekostik Epoxy from tension machine

Conclusion

The experimental program yielded a comprehensive comparison between the digital image correlation (DIC) technique and the conventional linear variable differential transformer (LVDT) method for tensile deformation measurement in steel and epoxy specimens. Data analysis confirmed that the DIC method is capable of producing highly accurate strain and displacement measurements, closely matching results from LVDT recordings under controlled conditions.

For steel specimens, tensile deformations recorded by DIC demonstrated strong numerical agreement with those obtained from LVDT sensors. The displacement–time and stress–strain curves generated from both methods exhibited nearly identical slopes in the elastic region, leading to consistent

modulus of elasticity values $E = 200.4 \times 10^3$ and yield stresses $F_y = 343\ [MPa]$. This correlation validates the reliability of DIC for steel testing and indicates that, when properly configured, DIC provides comparable precision to well-secured contact sensors, even under conditions where specimen grip slippage may compromise LVDT accuracy.

Similarly, a stress–strain diagram for the epoxy material was obtained, and a strong agreement was observed between the time-based deformations monitored using the DIC technique and the time-based deformation values obtained from the tensile testing machine.

The intrinsic advantage of DIC in such cases stems from its non-contact nature, which eliminates mechanical interference and measurement error caused by relative movement between the sensing device and specimen.
The accuracy of DIC was found to be highly dependent on optimal speckle pattern application and calibration through GOM software's correlation quality metrics. Tests revealed that low-density or unevenly distributed speckles reduced the number of reliable reference points, resulting in incomplete strain maps and localized tracking errors. Improving speckle uniformity.
DIC testing provided operational advantages over LVDT measurements when applied to steel specimens. The procedure required only the stable mounting of a video camera and appropriate lighting, as opposed to the more labor-intensive LVDT setup, which demanded welding of steel attachment plates to ensure sensor stability during loading. This welding not only consumed additional preparation time but also introduced potential structural

discontinuities in thin specimens, thereby risking premature failure or altered mechanical behavior.

In contrast, DIC's optical setup involved no direct contact with the specimen, minimizing risk of physical interference and preserving material integrity. These practical benefits underscore DIC's suitability for testing materials where sensor attachment is challenging, specimen geometry is irregular, or contact measurement could induce unwanted mechanical effects.

References

1. Abdulahad, E. Danhash, G. "Simulating the Non-linear Bond Behaviour of Plain Rebar-Recycled Aggregate Concrete" DCB 2024, Bulgaria 12-13 September.
2. Danhash, G. (2025) "Studying the effect of tensile softening curve of concrete on the Seismic Behavior of Gravity Dam. Journal of Hama University, Volume 8 issue 1.
3. Danhash, G., Oudeh, Y., Diab, W., & Wardeh, G. (2023). Studying steel-recycled aggregate concrete bond–slip behavior using digital image correlation. (International Journal of Civil Engineering and Environmental Engineering), 26,(2).
4. Danhash, G. Kousa, M. Wardeh, G. (2024) "A New Analytical Model for Crack Propagation in a Concrete Beam" Passer Journal of Basic and Applied Sciences, 6.
5. Danhash, G. Kousa, M. Wardeh, G. (2014), "Comparison Between Bilinear and Power Law Softening Curve of Concrete Using Inverse Analysis". ACEE, 4.
6. Danhash, G. Kousa, M. Wardeh, G. (2013) "Size Independent Fracture Parameters Using Inverse Analysis and Power Law Softening Curve". Al-Baath University Journal.

7. Danhash, G. Kousa, M. Wardeh, G. (2014), "The Effect of Paste Volume and Concrete Properties on Size Independent Fracture Energy". Journal of Materials and Engineering Structures JMES 1, 58-72.
8. Danhash, G. Kousa, M. Wardeh, G. (2014), "The Effect of Material Properties of Concrete on Size Independent Fracture Energy Calculated From Bilinear Softening" Research of Aleppo University, Volume 8.
9. Danhash, G. Kousa, M. Wardeh, G. (2013) "Investigating the Size Independent Fracture Energy of Concrete Using Inverse Analysis. Damascus University Journal, Volume2.
10. Danhash, G. Kousa, M. Wardeh. G. (2014), "Comparison Between Bilinear and Power Law Softening Curve of Concrete Using Inverse Analysis". 8th International Conference Analytical models in Concrete and Masonry Structures in Poland 16-18 June.
11. Danhash, G. Kousa, M. Wardeh, G. (2012), "Size Independent Fracture Properties of Concrete Obtained from Three Points Bending Test". The 8th Central European Congress on Concrete Engineering, Plitvice lakes – Croatia, 4-6 October.
12. Gdoutos, E. E. (2022). Digital Image Correlation (DIC). 251–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89466-5_12

13. Mousa, M. A., Yussof, M. M., Hussein, T. S., Assi, L. N., & Ghahari, S. (2023). plateDigital image correlation technique for laboratory structural tests and applications: A systematic literature review. Preprint. https://doi.org/10.20944/preprints202309.1590.v1
14. Oudeh, Y., Diab, W., & Danhash, G. (2023). Using digital image correlation for bond-slip curve registration in pull out test for steel recycled aggregate concrete. ‘‘Damascus University Journal, 39, (2).
15. Rossman, T., Uthamaraj, S., Rezaei, A., McEligot, S., Giambini, H., Jasiuk, I., Yaszemski, M. J., Lu, L., & Dragomir-Daescu, D. (2017). A Method to Estimate Cadaveric Femur Cortical Strains During Fracture Testing Using Digital Image Correlation. Journal of Visualized Experiments, 2017(127). https://doi.org/10.3791/54942

إدراج صنف الموقع في توابع الهشاشة الزلزالية: منهجية قائمة على استخدام المتغيرات الوهمية

الدكتورة حنان حسين*

ملخص

في هذه الورقة البحثية نخطو خطوة نحو الأمام في تطوير منحنيات الهشاشة الزلزالية بحيث تأخذ هذه المنحنيات بعين الاعتبار الصنف الزلزالي للموقع مما يسهم في رفع كفاءة هذه الأدوات التقييمية. تعتمد المنهجية التي اتبعناها على إدراج صنف الموقع كمتغير مستقل في تابع احتمالية الضرر الزلزالي لجسور بيتونية من خلال استخدام المتغيرات الوهمية. لتحقيق ذلك قمنا باعتماد نموذج احتمالي مناسب قادر على التعامل مع البيانات الثنائية للضرر الزلزالي (تضرر، عدم تضرر)، ويقبل بنفس الوقت متغيرات فئوية (أصناف الموقع) وهو نموذج الانحدار اللوجستي الثنائي، وقد تم استخدام قاعدة بيانات ضرر ناتجة عن تحليل ستاتيكي لاخطي لعدد كبير من العينات التي تمثل نوع الجسر المدروس والمعرَّضة لشدات زلزالية متنوعة مع الأخذ في الاعتبار أربعة أصناف رئيسية للموقع. أظهرت النتائج أن النموذج المقترح لتابع الضرر مقبول من الناحية الإحصائية إذ تميز بقدرة تنبؤية جيدة جداً تراوحت بين 73.8% و96.7% (حسب حالة الضرر)، مع زيادة في موثوقية التقديرات الاحتمالية من خلال تفسير التباين الكبير في الاستجابة الزلزالية حسب صنف الموقع والتمييز بين هذه الأصناف بشكل مباشر.

كلمات مفتاحية: منحنيات الهشاشة الزلزالية، المتغيرات الوهمية، الانحدار اللوجستي، صنف الموقع.

* مدير أعمال - قسم الهندسة الإنشائية – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
hanan.hussein@latakia-univ.edu.sy

Incorporating the Site Class into the Seismic Fragility Functions: A Methodology Based on the Use of Dummy Variables

Dr. Hanan Hussein*

ABSTRACT

In this research, we take a step forward in developing seismic fragility curves that take into account the seismic site class, which contributes to enhancing the efficiency of these assessment tools. The adopted methodology based on incorporating the site class as an independent variable into the probability seismic damage function of concrete bridges using dummy variables. To achieve this, we employed a suitable probabilistic model capable of handling binary seismic damage data (damaged, undamaged) while also accepting categorical variables (site classes)—namely, the binary logistic regression model. We adopted a damage database resulting from nonlinear static analysis of a large number of samples representing the studied bridge type, subjected to various seismic intensities, while considering four main site classes. The results showed that the proposed damage function model is statistically acceptable, as it demonstrated a very good predictive capability ranged between 73.8% and 96.7% (depending on the damage state), along with increased reliability in probability estimates by explaining

* Work Manager - Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria.
hanan.hussein@latakia-univ.edu.sy

the significant variation in seismic response according to site class and directly distinguishing between these classes.

Keywords: seismic fragility curves, dummy variables, logistic regression, site class.

1- مقدمة

تمثل توابع الهشاشة الزلزالية (Seismic Fragility Functions) حجر الزاوية في التقييم الاحتمالي للمخاطر الزلزالية، إذ تعبر عن العلاقة بين شدة الهزة الأرضية واحتمال وصول المنشأ إلى حالة ضرر محددة يمكن أن تمثل انهياراً كلياً أو جزئياً أو أضراراً طفيفة. ازداد الاهتمام بهذه التوابع في السنوات الأخيرة فلم تعد نماذج إحصائية مجردة تهم الأكاديميين فقط، بل تحولت إلى أدوات تخطيط استراتيجية تدعم عمليات اتخاذ القرار، خصوصاً مع التحول الجذري في فلسفة التصميم من مجرد تجنب الانهيار إلى ضمان مستويات معينة للأداء تضمن الحفاظ على الخدمات الحيوية بعد الكارثة الزلزالية، وتخفض زمن التعطيل الاقتصادي والاجتماعي خصوصاً في المنشآت الحيوية والبنى التحتية الأساسية، وهنا تقدم توابع أو منحنيات الهشاشة الأداة الكمية المناسبة لتحديد مستوى الأداء المتوقع لأي منشأ عند أي مستوى من مستويات الشدة الزلزالية.

على مدى العقود السابقة ظهرت دراسات كثيرة وفي مناطق مختلفة من العالم اهتمت بمنحنيات الهشاشة سواء للمباني أو الجسور أو حتى لنماذج إنشائية خاصة، ففي اليابان أجرى Karim & Yamazaki أكثر من بحث من أجل تطوير منحنيات هشاشة تحليلية لمنشآت الطرق السريعة في اليابان من أهمها دراسة قدموا فيها طريقة تحليلية مبسطة مع افتراض توزيع لوغاريتمي طبيعي لمنحنيات الهشاشة واستخدموا هذه المنحنيات التحليلية في المقارنة بين جسور ذات بارامترات إنشائية مختلفة، وبين جسور مع وبدون أنظمة عزل زلزالي [1]. هذا واستفادت أبحاث كثيرة في اليابان في إنشاء منحنيات الهشاشة من بيانات ضرر حقيقية بعد الأحداث الزلزالية المتكررة، فقد قام .Ioannou et al [2] بإنشاء منحنيات هشاشة تجريبية للمباني بالاعتماد على الأضرار المسجلة في آلاف المباني بعد زلزال توهوكو عام 2011. قامت D'Ayala بالمشاركة مع باحثين مختلفين على مدى سنوات وحتى الوقت الحاضر بسلسلة من الأبحاث ركزت فيها على تطوير منحنيات هشاشة للمباني وبشكل خاص

الحجرية والأثرية منها، وذلك في أكثر من مكان من أوروبا مثل المملكة المتحدة وإيطاليا، وفي واحد من أحدث أبحاثها تم تطوير منهجية لاشتقاق منحنيات هشاشة للمباني غير المسلحة اعتماداً على بيانات واقعية وتم تطبيقها على حالة دراسة في تشيلي [3]. أما الولايات المتحدة الأمريكية فقد شهدت اهتماماً كبيراً بمنحنيات الهشاشة ويظهر هذا الاهتمام جلياً من خلال أبحاث ودراسات مدعومة من جهات علمية ورسمية، ومن أبرزها برنامج HAZUS التابع لوكالة إدارة الطوارئ الفيدرالية (FEMA) الذي يقدم منحنيات هشاشة للمباني والجسور الأمريكية تم تطويرها باعتماد بيانات حقيقية وتحليلية [4]. مع تطور الأبحاث بدا أن النماذج العامة لمنحنيات الهشاشة لم تعد كافية، لذا بدأ التوجه إلى نماذج تراعي الاختلافات التي يمكن أن تؤثر على الاستجابة الزلزالية.

تؤثر خصائص الموقع بشكل كبير على تضخيم أو تخميد الموجات الزلزالية، وبالتالي على استجابة المنشآت الواقعة عليها، ولتكون توابع الهشاشة فعالة يجب أن تعكس هذا التغير في الخصائص. في توابع الهشاشة التقليدية يهمل هذا التأثير لعجز الطرق التقليدية عن دمجه بشكل فعال في صياغة التابع وهذا ما يحد من قدرتها التنبؤية ويقلل من موثوقيتها. يمكن تجاوز هذه المشكلة من خلال صياغة توابع مخصصة لصنف محدد من أصناف الموقع، لكنها تبقى قاصرة وغير قابلة للاستخدام من أجل الأصناف الأخرى. من هنا سعينا في هذه البحث إلى تقديم إطار منهجي يتم فيه دمج صنف الموقع كمتغير أساسي في توابع الهشاشة بحيث نتجاوز النقص الموجود في التوابع التي تهمل هذا التأثير، وفي الوقت نفسه تغني عن إيجاد توابع مخصصة لكل صنف، وسنطبق هذه المنهجية على منشآت الجسور باعتبارها واحدة من أهم البنى التحتية التي تؤدي دوراً أساسياً في تأمين استمرار الحركة والنقل والتواصل.

مفهوم المتغيرات الوهمية

في عالم الهندسة غالباً ما نواجه بيانات لا يمكن قياسها رقمياً بشكل مباشر وإنما يمكن توزيعها في فئات، وهنا يأتي دور المتغيرات الوهمية (Dummy Variables) التي تشكل واحدة من الأدوات الأساسية في النمذجة الإحصائية القياسية [5]. تستخدم هذه المتغيرات لتمثيل البيانات الفئوية (Categorical Data) في النماذج الرياضية التي تتطلب في جوهرها متغيرات كمية. يمكن أن نعرف المتغير الوهمي بأنه متغير رقمي ثنائي القيمة، يأخذ القيمة (1) إذا كانت الملاحظة تنتمي إلى فئة معينة (التي يمثلها هذا المتغير)، والقيمة (0) إذا لم تكن كذلك [6]. يسمح هذا التحويل البسيط بدمج المعلومات النوعية أو الفئوية في النماذج الكمية مما يسهل فهمها وتحليلها، ويوسع نطاق التحليل

الإحصائي ويزيد من دقة النتائج. تكمن أهمية المتغيرات الوهمية في قدرتها على تمييز التأثيرات المختلفة للفئات المتنوعة على المتغير التابع، فبدلاً من افتراض أن لجميع الفئات التأثير نفسه، تسمح المتغيرات الوهمية للنموذج بتقدير تأثير منفصل لكل فئة، مما يؤدي إلى فهم أعمق للعلاقات المعقدة في البيانات[7] .

من الناحية الرياضية، إذا كان لدينا متغير فئوي يحتوي على k فئة، فإننا نحتاج إلى (k−1) متغير وهمي لتمثيله بالكامل. تُعرف الفئة المتبقية بالفئة المرجعية(Reference Category) أو فئة الأساس (Base Category) [8]. يُعد اختيار الفئة المرجعية قراراً مهماً، فهو وإن كان لا يؤثر على النتائج بحد ذاتها، إلا أنه يؤثر على تفسير هذه النتائج. عادة ما يتم اختيار الفئة الأكثر شيوعاً أو الفئة التي تمثل الحالة الطبيعية أو المعيارية كفئة مرجعية. يمكن استخدام المتغيرات الوهمية في العديد من النماذج الإحصائية مثل الانحدار الخطي المتعدد والانحدار اللوجستي سواء المتعدد أو الثنائي الذي تم اعتماده في هذا البحث.

الانحدار اللوجستي الثنائي

الانحدار اللوجستي الثنائي هو أسلوب إحصائي يسمح بنمذجة متغير ثنائي الحد (تحقق حدث /عدم تحققه) بدلالة مجموعة من المتغيرات العشوائية التي قد تكون رقمية أو فئوية [9]، فيكون Y=1 عند تحقق الحدث، و Y=0 في حال عدم تحققه.

يمكن أن تأخذ المدخلات (المتغيرات المستقلة) في علاقة الانحدار اللوجستي أي قيمة من ∞− إلى ∞+، لكن المخرجات تكون دائماً ضمن المجال [1 → 0]، لأن الانحدار اللوجستي لا يعطي قيمة للتابع ثنائي الحد، وإنما احتمال تحقق الحدث الذي يمثله هذا التابع، ويعبر عنه رياضياً بالشكل [10]:

$$f(Z) = P = \frac{e^Z}{1+e^Z} = \frac{1}{1+e^{-Z}}$$

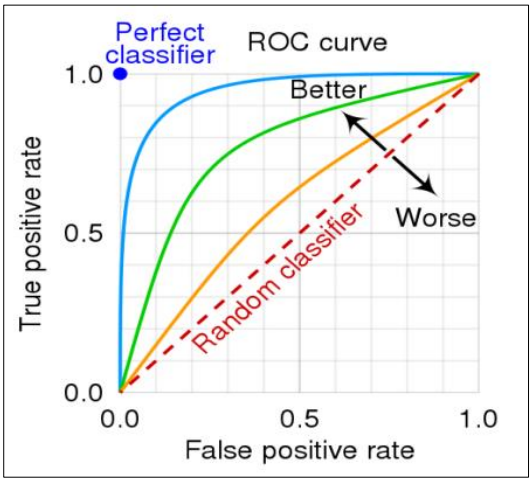
$$Z = logit(P) = \beta_0 + \sum \beta_i X_i$$

حيث P هي احتمالية حدوث الحدث $P = P(Y = 1)$، X_iهي المتغيرات المستقلة، β_0, β_i هي المعاملات المراد تقديرها.

بعد تقدير معلمات النموذج اللوجستي يجري التحقق من جودة هذا النموذج ومدى قدرته على التنبؤ بالمتغير التابع من خلال عدد من الاختبارات أهمها مصفوفة التشويش والمنحني المميز لأداء المستقبل.

مصفوفة التشويش (Confusion Matrix): مصفوفة التشويش هي أداة أساسية لفهم وتقييم النماذج في مسائل التصنيف المعلّم [11]، تبين هذه المصفوفة عدد الحالات التي تمكن النموذج من التنبؤ بقيمتها الصحيحة وعدد الحالات التي لم يتمكن من التنبؤ بقيمتها الصحيحة من أجل كل الحالات الفعلية التي أخذت القيمة 1 أو القيمة 0، وذلك باعتماد عتبة (cut value) تفصل بين الحالتين، وعادة ما تكون قيمة هذه العتبة 0.5.

المنحني المميز لأداء للمستقبل (Receiver Operating Characteristic): ويسمى اختصاراً منحني (ROC) وهو رسم بياني يعتمد على النتائج التي نعطيها مصفوفة التشويش من أجل قيم مختلفة مفترضة للعتبة الفاصلة (وليس فقط القيمة 0.5)، يمثل هذا المنحني العلاقة بين الحساسية sensitivity ومتمم النوعية specificity، حيث تمثل الحساسية النسبة الصحيحة للقيم التي أخذت القيمة 1، بينما تمثل النوعية النسبة الصحيحة للقيم التي أخذت القيمة 0 وبالتالي متممها هو النسبة الخاطئة للقيم التي أخذت القيمة 1 [12]. يتم تقييم كفاءة النموذج بحساب المساحة تحت هذا المنحني (AUR)، كلما كانت هذه المساحة أكبر كان النموذج أفضل كما هو مبين في الشكل 1، ويمكن اعتماد القيم المبينة في الجدول 1 لتقييم النموذج.



الشكل (1) منحني ROC [12]

الجدول (1) تقييم النموذج بالاعتماد على قيمة AUR [8]

AUR	= 0.5	0.5 →0.7	0.7→0.8	0.8→0.9	> 0.9
التقييم	فشل النموذج	ضعيف	مقبول	ممتاز	متميز

2- أهمية البحث وأهدافه

إن للتباين المكاني لخصائص الموقع تأثيراً جوهرياً على الاستجابة الزلزالية، لذلك فإن إهمال هذا التأثير في نماذج الهشاشة سيؤدي إلى تقديرات غير دقيقة للمخاطر الزلزالية مما قد ينعكس سلبًا على قرارات التصميم وإدارة الكوارث. يهدف هذا البحث إلى معالجة هذه الفجوة من خلال دمج تأثير صنف الموقع مباشرة في تطوير منحنيات الهشاشة للجسور، وذلك عن طريق إدخاله كمتغير وهمي (Dummy Variable) في نموذج الانحدار اللوجستي الثنائي (Binary logistic regression)، مما يسمح بتقييم كمي لتأثير الموقع على احتمالية الضرر، وعزل تأثيره الإحصائي المستقل وتحديد الفروقات في مستويات الضرر بين مختلف أصناف الموقع دون الحاجة إلى إيجاد توابع هشاشة خاصة بكل موقع على حدا.

3- مواد وطرائق البحث

تم في هذا البحث اعتماد منهجية تحليلية لإنشاء منحنيات الهشاشة الزلزالية للجسور مع الأخذ في الاعتبار تأثيرات الموقع والتربة، وذلك بالاعتماد على بيانات ضرر ناتجة عن إجراء تحليل ستاتيكي لاخطي لعدد كبير من الجسور تحت تأثير مجموعة واسعة من الشدات الزلزالية من أجل أربعة أصناف للموقع. تم إنشاء النموذج الاحتمالي للهشاشة باستخدام الانحدار اللوجستي الثنائي حيث تمت المعالجة من أجل كل حالة من حالات الضرر الزلزالي الأربع (خفيف، متوسط، شديد، تام)، فكان لكل حالة ضرر تابع احتمالي خاص فيها، وفي كل مرة كان المتغير التابع هو الوصول إلى حالة الضرر الزلزالي قيد الاهتمام، أما المتغيرات المستقلة التي سيعطى احتمال تحقق المتغير التابع بدلالتها هي:

1- الشدة الزلزالية: وهي تمثل متغير كمي يأخذ قيم متدرجة، وتم التعبير عنه باللوغاريتم الطبيعي للتسارع الطيفي عند الدور 1sec ((ln(S1)).

2- صنف الموقع: وهو متغير فئوي (أربع فئات تمثل أصناف الموقع المدروسة) وسيتم إدراجه في التابع كمتغير وهمي.

وجرت المعالجة الإحصائية بالاعتماد على برنامج SPSS.

قاعدة البيانات

بغياب بيانات حقلية حقيقية للضرر الزلزالي يتم اللجوء عادة إلى تحصيل هذه البيانات تحليلياً بالاعتماد على المحاكاة من خلال إنشاء نماذج حاسوبية للمنشآت وتحديد استجابتها عند سيناريوهات زلزالية مختلفة. عندما تكون الغاية هي وضع منحنيات هشاشة لصنف معين من المنشآت، يجب أن يتم إنشاء عدد كاف من النماذج الحاسوبية لتمثيل التباين الطبيعي في الخصائص المادية والهندسية الذي يمكن أن نصادفه في المنشآت الواقعية، وهذا ما يتطلب جهداً حسابياً كبيراً، لكنه بالمقابل يقود إلى نتائج أكثر موثوقية.

نركز في هذا البحث على منشآت الجسور البيتونية وتحديداً على صنف واحد وهو جسر بيتوني ذو أربع فتحات بسيطة الاستناد، بنيته العلوية عبارة عن جوائز بيتونية مسبقة الإجهاد، أما البنية السفلية فهي ركائز متعددة الأعمدة في كل منها ثلاثة أعمدة. استفدنا من قاعدة بيانات تضرر تم تحصيلها من تحليل حاسوبي لـ 149 عينة عشوائية لهذا النموذج من الجسور [13] بحيث عكست هذه العينات تنوعاً في الخصائص الهندسية وخصوصاً تلك التي تؤثر على الاستجابة الزلزالية للجسر كطول الجسر وعرضه وارتفاع الركائز ومواصفات الأعمدة من حيث مساحة المقطع ونسب التسليح الطولي والعرضي ومقاومة البيتون بالإضافة لمواصفات المساند التي تصل البنية العلوية للجسر ببنيته السفلية. تضمنت قاعدة البيانات هذه بيانات تضرر لأعمدة الجسر وأجهزة استناد جسم الجسر على الركائز والمحصلة بالاعتماد على التحليل الستاتيكي اللاخطي في الاتجاهين الطولي والعرضي للجسر من أجل 50 طيف استجابة متدرج الشدة الزلزالية باستخدام برنامج csibridge، وقد عرفت هذه الأطياف وفق AASHTO [14]، حيث تحسب معاملات التسارع لطيف الاستجابة التصميمي بالاعتماد على عوامل الموقع (حسب صنف التربة) منسوبة إلى التسارعات من أجل صخر من الصنف B، وتم التحليل من أجل أربعة أصناف للموقع (B, C, D, E) مواصفاتها مبينة في الجدول 2.

للوصول إلى قاعدة البيانات النهائية التي استخدمت في هذه الورقة البحثية اعتمدنا نظام العمل المشترك الذي يفترض أن الأحداث التي تمثل فشل أو تضرر مكونات الجسر ليست أحداث مستقلة احتمالياً وإنما هناك شيء من الترابط بينها. وفق هذا الافتراض يصل الجسر إلى مستوى معين من الضرر أو

الأذى الزلزالي بوصول أي من مكوناته إلى هذا المستوى، وعلى هذا الأساس قمنا بوضع قاعدة بيانات الضرر التي تمت معالجتها في هذه الورقة وتألفت من 119200 قيمة (عدد العينات الإنشائية x عدد الشدات الزلزالية x عدد أصناف الموقع المدروسة x عدد حالات الضرر).

الجدول (2) تعريف صنف الموقع [14]

صنف الموقع	صنف التربة
B	صخر، $762\ \text{m/sec} < \overline{v_s} < 1524\ \text{m/sec}$
C	تربة ذات كثافة عالية وصخر طري، $365m/\text{sec} < \overline{v_s} < 762\ \text{ft/sec}$ أو $\overline{N} > 50\ \text{blows/ft}$ و $\overline{s_u} > 100\ \text{kPa}$
D	تربة صلبة، $182\ \text{m/sec} < \overline{v_s} < 365\ \text{m/sec}$ أو $15\ \text{blows/ft} < \overline{N} < 50\ \text{blows/ft}$ أو $50\ \text{kPa} < \overline{s_u} < 100\ \text{kPa}$
E	قطاع تربة بـ $\overline{v_s} < 182\ \text{m/sec}$ أو $\overline{N} < 15\ \text{blows/ft}$ أو $\overline{s_u} < 50\ \text{kPa}$ أو أي قطاع بسماكة أكبر من 10m من الغضار الطري المعرف كتربة بـ $PI > 20$ ، $w > 40\%$ و $\overline{s_u} < 25\ \text{kPa}$
$\overline{v_s}$ متوسط سرعة أمواج القص من أجل أعلى 30.48m من قطاع التربة $\overline{N}$ متوسط ضربات تجربة الاختراق القياسية مقاسة بـ ضربة /قدم من أجل أعلى 30.48m من قطاع التربة $\overline{s_u}$ مقاومة القص غير الصرفة من أجل أعلى 30.48m من قطاع التربة *PI* مؤشر اللدونة *w* محتوى الرطوبة	

التحليل الإحصائي للبيانات:

بيانات الضرر التي حصلنا عليها هي بيانات ثنائية تأخذ إما القيمة 1 في حال وصل الجسر إلى حالة الضرر قيد الاهتمام أو القيمة 0 في حال لم يصل إليها، وكوننا نهدف بشكل رئيسي إلى تضمين صنف الموقع وهو متغير فئوي في تابع الهشاشة إضافة إلى الشدة الزلزالية، وجدنا أن الانحدار

اللوجستي الثنائي هو أسلوب إحصائي مناسب في مثل هذه الحالة، إذ يتميز بقدرته على التعامل مع المتغيرات الفئوية ودمجها في التابع من خلال استبدالها بمتغيرات وهمية. في سياق هذا البحث، وحيث أنه لدينا متغير فئوي هو صنف الموقع والذي تضمن أربعة فئات (B, C, D, E)، إذاً سيكون لدينا ثلاثة متغيرات وهمية، ومن المنطقي اختيار صنف الموقع ذي التربة الأكثر صلابة كفئة مرجعية لأنها تمثل الظروف الأكثر استقراراً. باختيار الصنف B كفئة مرجعية، نعرف المتغيرات الوهمية الثلاثة Site(1), Site(2), Site(3)كما يلي:

Site(1)=1 إذا كان صنف الموقع هو C، و0 خلاف ذلك.

Site(2)=1 إذا كان صنف الموقع هو D، و0 خلاف ذلك.

Site(3)=1 إذا كان صنف الموقع هو E، و0 خلاف ذلك.

فتصبح الصيغة العامة في الانحدار اللوجستي (مع وجود متغير كمي وحيد في هذا البحث) كما يلي:

$$logit(P) = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Site(1) + \beta_3 Site(2) + \beta_4 Site(3)$$

حيث:

P هو احتمال الوصول إلى حالة الضرر المعتبرة

X هو الشدة الزلزالية (المتغير المستقل الكمي).

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ معاملات النموذج، حيث يمثل المعامل β_0 التأثير الأساسي للفئة المرجعية، بينما تمثل$\beta_2, \beta_3, \beta_4$ التأثيرات الإضافية لكل من الفئات C, D, E على التوالي مقارنة بالفئة المرجعية B.

ويعطى الاحتمال من أجل كل حالة ضرر بالعلاقة:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 ln(S1) + \beta_2 Site(1) + \beta_3 Site(2) + \beta_4 Site(3))}}$$

قمنا بإجراء تحليل الانحدار باستخدام برنامج SPSS وذلك من أجل كل حالة ضرر على حدا (تضمنت قاعدة بيانات كل حالة 28900 قيمة). يبين الجدول 3 توزيع الفئات (وهو نفسه من أجل كل حالات الضرر). نلحظ من الجدول أن الفئة B هي الفئة المرجعية (وفق اختيارنا) وتم إعطاء ترميز تلقائي من قبل البرنامج للمتغيرات الوهمية ((3) ,(2) ,(1)) التي تمثل الفئات (C, D, E) على الترتيب.

الجدول (3) ترميز المتغيرات الفئوية

		Frequency	Parameter coding		
			(1)	(2)	(3)
Site	B	7450	.000	.000	.000
	C	7450	1.000	.000	.000
	D	7450	.000	1.000	.000
	E	7450	.000	.000	1.000

4- النتائج والمناقشة

من تحليل الانحدار حصلنا على قيم المعاملات المطلوبة لكل حالة ضرر. يبين الجدول 4 أهم النتائج الخاصة بحالة الضرر الخفيف، حيث يعطي العمود B قيم المعاملات β للمتغيرات، تشير هذه الأرقام إلى مقدار التغير في لوغاريتم الاحتمال مع كل زيادة بمقدار وحدة واحدة للمتغير. من الملاحظ أن قيم β للمتغيرات الوهمية كلها موجبة وتزداد باتجاه الصنف E، وهذا يعني أن احتمال الضرر أقل في حالة صنف الموقع B ويزداد باتجاه الصنف E، وهذا يتماشى مع الفهم الهندسي بتضخيم الحركة الأرضية كلما كانت التربة أكثر رخاوة، الأمر الذي يؤدي إلى استجابة ديناميكية أكبر. يبين العمود Sig. الأهمية الموافقة للفرضية الصفرية ونلحظ أنها أقل من 0.001 (أقل بكثير من 0.05) لكل المتغيرات، مما يعني أن هذه المتغيرات (الشدة الزلزالية وصنف الموقع) ذات دلالة إحصائية عالية جداً، أي أنها عامل هام في تحديد احتمالية الضرر، أما العمود $Exp(B)=e^{\beta}$ فيمثل نسبة الأرجحية (odd ratio)، يسهل هذا العمود المقارنة بين الفئات، فمن أجل Site(1) مثلاً نلحظ أن Exp(B)=5.473 أي أن احتمال الضرر الخفيف يزداد بمقدار 5.473 مرة في حال كان الجسر مشيد في موقع من الصنف C عما إذا كان في موقع من الصنف B، وبشكل مشابه نجد أن هذا الاحتمال يزداد بمقدار 16.989 مرة من أجل الصنف D، و 58.243 مرة من أجل الصنف E، (وننوه هنا أن هذه الزيادة هي في الجزء من قيمة الاحتمال المتعلق بصنف الموقع وليس في قيمة الاحتمال النهائي إذ أن هناك جزء من قيمة الاحتمال ناتج عن تأثير الشدة الزلزالية). لا يختلف تفسير نتائج بقية الحالات وإنما القيم فقط. قيم β ونسبة الأرجحية لكل حالات الضرر مبينة في الجدول 5. أما الشكل 2 فيوضح التغيرات في نسبة الأرجحية لأصناف الموقع (نسبة للصنف B) من أجل مستويات الضرر المختلفة، حيث نلحظ

انخفاض هذه النسبة كلما اتجهنا نحو مستويات أعلى للضرر، فتقل الفروقات في احتمال الضرر بين أصناف المواقع المختلفة، ويعود ذلك إلى أن مستويات الضرر العالية تنتج عن شدات زلزالية كبيرة، مما يجعل الشدة الزلزالية في تابع الاحتمال هي المتغير المسيطر وبالتالي الأكثر تأثيراً في قيمة الاحتمال، ويرافق ذلك تراجع في تأثير المتغير الآخر (صنف الموقع)، وهذا يتفق مع انخفاض عوامل الموقع المستخدمة لإنشاء أطياف الاستجابة التصميمية كلما كانت الشدة الزلزالية أعلى [14].

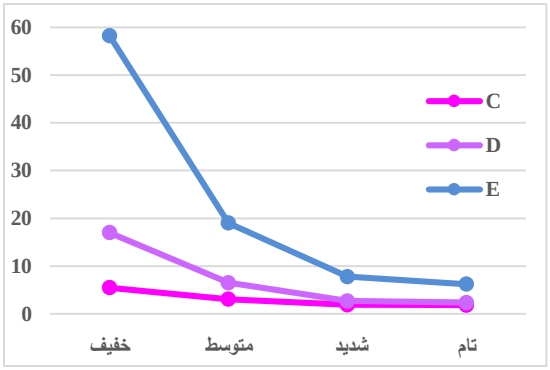
الجدول (4) نتائج تحليل الانحدار لحالة الضرر الخفيف

	B	Sig.	Exp(B)
ln(S1)	3.920	0.000	50.382
Site		0.000	
Site(1)	1.700	0.000	5.473
Site(2)	2.833	0.000	16.989
Site(3)	4.065	0.000	58.243
Constant	7.476	0.000	1765.940

الجدول (5) قيم معاملات نموذج الانحدار نسبة الأرجحية لحالات الضرر المختلفة

	خفيف		متوسط		شديد		تام	
	B	Exp(B)	B	Exp(B)	B	Exp(B)	B	Exp(B)
ln(S1) (β1)	3.920	50.382	2.868	17.596	2.104	8.198	1.772	5.882
Site								
Site(1) (β2)	1.700	5.473	1.124	3.078	0.645	1.906	0.610	1.840
Site(2) (β3)	2.833	16.989	1.877	6.531	0.988	2.685	0.865	2.375

Site(3) ($\beta 4$)	4.065	58.243	2.945	19.012	2.055	7.804	1.828	6.223
Constant (β_0)	7.476	1765.940	3.064	21.412	0.559	1.749	−0.153	0.858



الشكل (2) نسبة الأرجحية لأصناف الموقع بالنسبة للصنف B

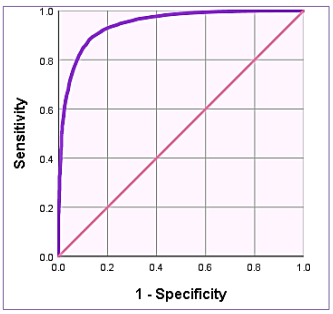
للتحقق من كفاءة النماذج التي توصلنا إليها ومقبولية تطبيقها سنعتمد الإجراءات التي سبق ذكرها. يبين الجدول 6 مصفوفات التشويش التي تعطي النسب التي تنبأ بها النموذج.

الجدول (6) مصفوفات التشويش

	Predicted		
	خفيف		Percentage Correct
	0	1	
0	1030	670	60.6
1	311	27789	98.9
Overall Percentage			96.7
	متوسط		

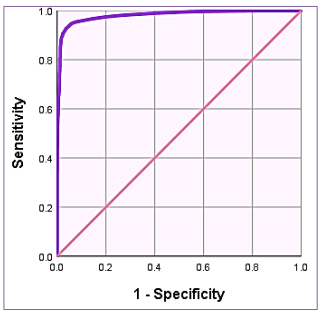
	0	1	Percentage Correct
0	3511	1730	67.0
1	810	23749	96.7
Overall Percentage			91.5
	شديد		Percentage Correct
	0	1	
0	8037	4600	63.6
1	1946	15217	88.7
Overall Percentage			78.0
	تام		Percentage Correct
	0	1	
0	11449	4512	71.7
1	3302	10537	76.1
Overall Percentage			73.8

نلحظ أن هذه النسب تراوحت بين 96.7% وهي نسبة ممتازة جداً حتى النسبة 73.8% وهي أكثر من جيدة. كما يبين الشكل 3 منحنيات ROC مع قيمة المساحة تحت المنحني AUR لكافة الحالات. بالاستناد إلى الجدول 1 نجد أن النماذج كلها مقبولة وهي متميزة من أجل حالتي الضرر الخفيف والمتوسط، وممتازة من أجل حالتي الضرر الشديد والتام، وهي متوافقة مع نتائج مصفوفة التشويش من حيث أن الجودة كانت أفضل في حالة الضرر الخفيف متناقصة باتجاه الضرر التام. من خلال هذه النتائج نجد أن النماذج التي توصلنا إليها مناسبة ويمكن اعتمادها لتوقع مستوى الأذى الزلزالي في مثل هذه الجسور.



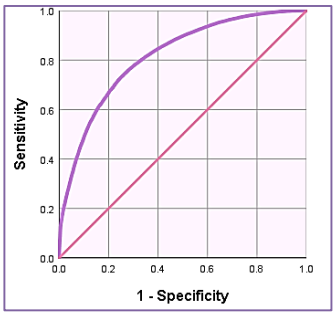
AUR=0.945

متوسط



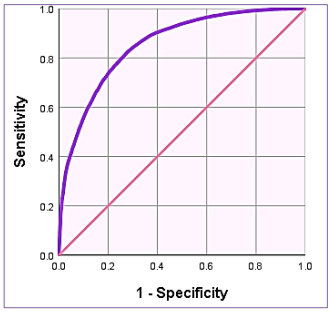
AUR=0.981

خفيف



AUR=0.815

تام

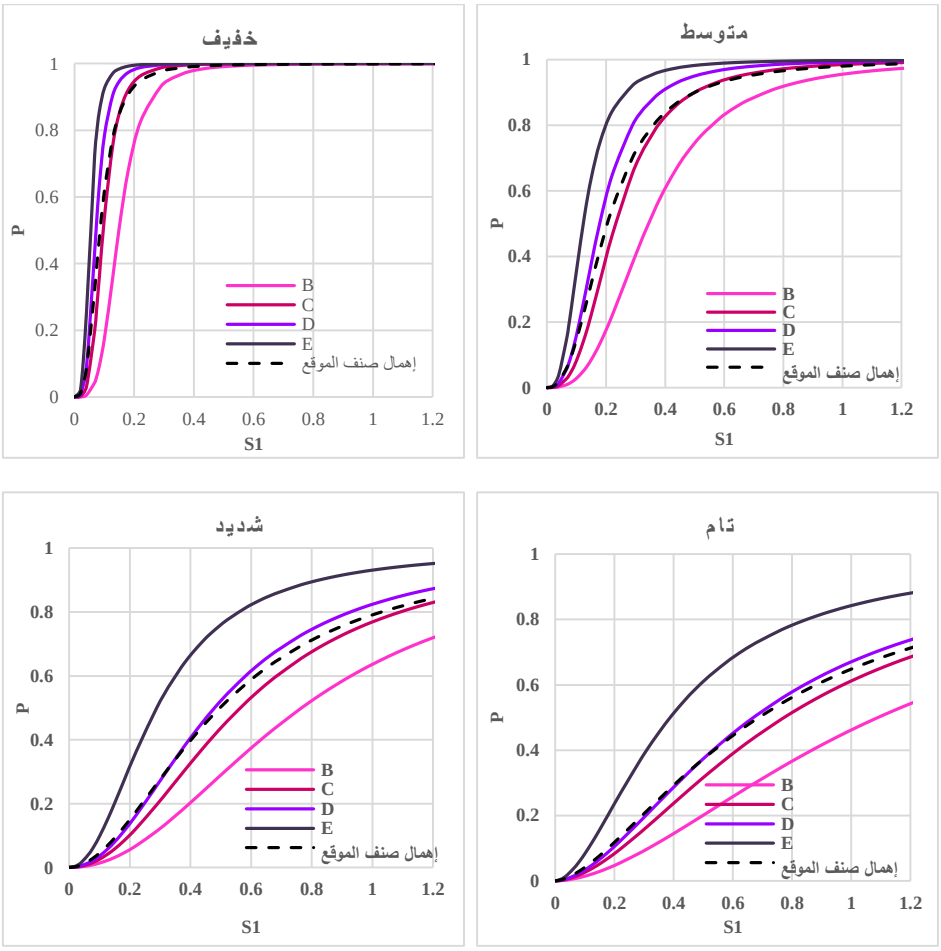


AUR=0.854

شديد

الشكل (3) منحنيات ROC لكافة حالات الضرر

بتعويض قيم المعاملات β االوافقة لكل حالة حصلنا على توابع الهشاشة المطلوبة، ومن خلال هذه التوابع رسمنا منحنيات الهشاشة الزلزالية التي أخذت بالاعتبار صنف تربة الموقع. بهدف المقارنة أوجدنا أيضاً توابع الهشاشة مع إهمال صنف الموقع، يبين الشكل 4 كل هذه المنحنيات حيث نلحظ أن إهمال صنف الموقع أعطى منحنيات وسطية، وهي وإن بدت مقبولة من أجل الصنفين C, D، لكنها تعطي نتائج مغلوطة فيما يخص الصنفين B, E، فعلى سبيل المثال إذا أخذنا حالة الضرر الشديد وعند القيمة S1=0.4، نحصل على احتمال أكبر بـ 95% من الاحتمال الحقيقي للصنف B وأقل بـ 40% من الاحتمال الحقيقي للصنف E، هذا وتختلف قيمة الفروقات من شدة زلزالية لأخرى لكنها تبقى بعيدة عن القيم الحقيقية.



الشكل (4) منحنيات الهشاشة مع وبدون أخذ تأثير الموقع

ولزيادة الموثوقية في توابع الهشاشة التي حصلنا عليها قمنا بإيجاد توابع الهشاشة لكل صنف موقع على حدا حيث أصبح المتغير الوحيد في التوابع هو الشدة الزلزالية

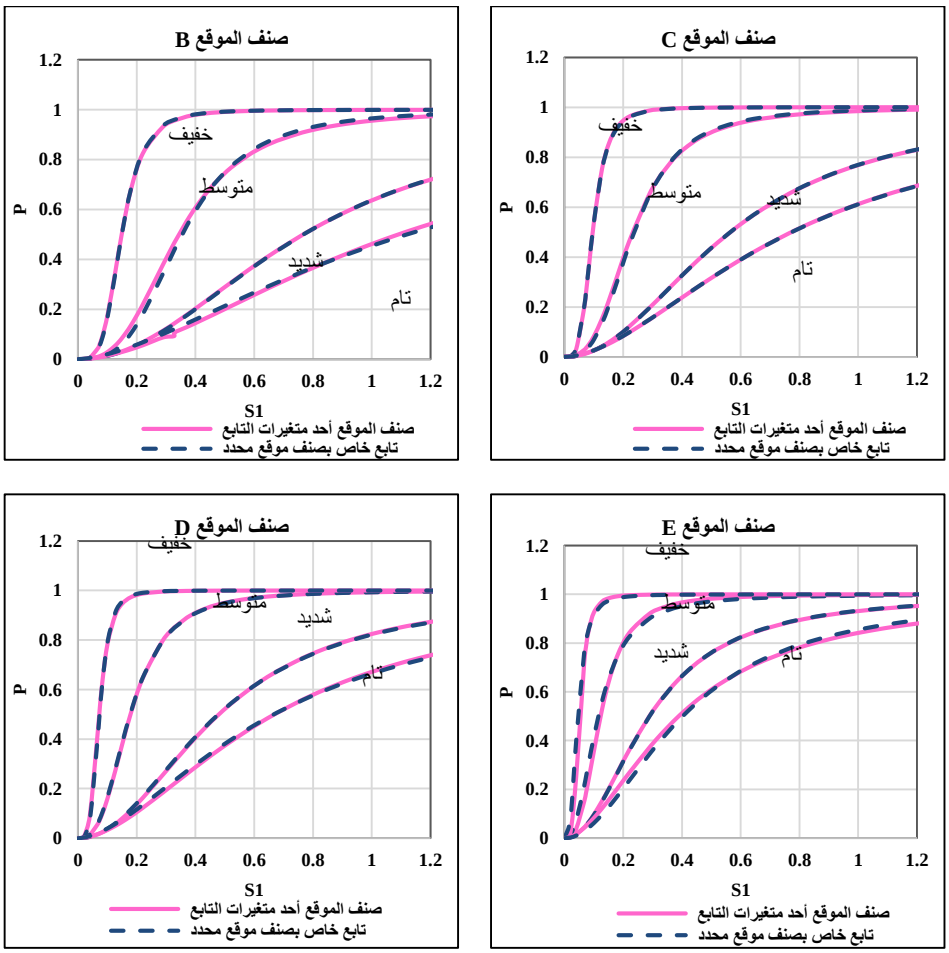
$$logit(P) = \beta_0 + \beta_1 X$$

تم تحليل الانحدار من أجل كل حالة ضرر وكل صنف موقع على حدا، وقيم المعاملات التي حصلنا عليها مبينة في الجدول 7. يوضح الشكل 5 منحنيات الهشاشة التي حصلنا عليها في الحالتين: حالة إدراج صنف الموقع في تابع الهشاشة، وحالة إيجاد توابع مخصصة لكل صنف على حدا. تبين هذه

المخططات التقارب الكبير لحد التطابق تقريباً بين الحالتين. يعكس هذا التقارب قدرة النموذج المقترح على إعطاء احتمال الضرر لمختلف أصناف الموقع بكفاءة عالية، أما فيما يخص القدرة التنبؤية للنماذج المخصصة فهي مبينة في الجدول 8، بالمقارنة مع النموذج المقترح نلحظ أن هذه النماذج لا تتفوق بشكل واضح على النموذج المقترح، بل على العكس تفوق هذا النموذج في معظم الحالات، وإذا ما أخذنا بعين الاعتبار الميزة التي يقدمها هذا النموذج في تخفيض التعقيد المرتبط باستخدام نماذج مختلفة نرى أنه يحقق توازن فعال بين الدقة والشمولية ضمن إطار واحد.

الجدول (7) معاملات الانحدار للنماذج المخصصة

	B	C	D	E
	ضرر خفيف			
β1	4.032	3.847	4.248	3.019
β0	7.678	9.014	11.107	9.32
	ضرر متوسط			
β1	3.19	3.024	2.82	2.398
β0	3.307	4.36	4.875	5.179
	ضرر شديد			
β1	2.123	2.108	2.071	2.117
β0	0.564	1.205	1.531	2.624
	ضرر تام			
β1	1.617	1.767	1.683	1.952
β0	−0.184	0.456	0.682	1.779



الشكل (5) منحنيات الهشاشة وفق تابع عام وتوابع مخصصة

الجدول (8) النسبة المئوية للقدرة التنبؤية للنماذج المخصصة والنموذج العام المقترح

		بسيط	متوسط	شديد	تام
النماذج الخاصة	B	95.8	87.6	73.5	72.5
	C	96.1	91.5	76.4	71.4
	D	96.6	92.8	78.5	72.5
	E	98.5	94	83.8	78.8
النموذج المقترح		96.7	91.5	78	73.8

5- الاستنتاجات والتوصيات

قمنا في هذا البحث بإيجاد منحنيات هشاشة تأخذ صنف الموقع مباشرة بالاعتبار من خلال استخدام المتغيرات الوهمية ضمن تحليل الانحدار اللوجستي الثنائي، وقد توصلنا نتيجة هذا البحث إلى أن

- المتغيرات الوهمية تمكننا من تحويل الخصائص النوعية إلى رؤى كمية قابلة للقياس، بحيث تسمح بمقارنات توضح الفروقات بين الفئات المختلفة بنسب رقمية وليس وصفية فقط
- إدراج المتغيرات الوهمية ساهم في تخفيض عدم اليقين في تقدير الهشاشة الزلزالية، وهذا من شأنه تحسين قرارات التقييم والتصميم.
- سمحت المنهجية المتبعة بالحصول على توابع هشاشة مخصصة ضمن نموذج إحصائي واحد، تقدم هذه التوابع بديلاً فعالاً عن التوابع المشتقة لكل صنف موقع لوحده، مما يسهم في تبسيط الإجراءات الحسابية مع الحفاظ على مستوى عالٍ من الدقة.
- توابع الهشاشة التي توصلنا إليها تقدم أداة مناسبة عند الحاجة لتقييم شبكة من الجسور المنتمية للصنف المدروس التي يمكن أن تكون موزعة على مواقع ذات تصنيفات زلزالية مختلفة.
- يمكن تطبيق هذه المنهجية على أنواع أخرى من المنشآت الهندسية، هذا ويمكن الاستفادة من مفهوم المتغيرات الوهمية واستخدامها في مسائل هندسية أخرى.

المراجع

[1] Karim, K. Yamazaki, F. 2003- A simplified method of constructing fragility curves for highway bridges. **Earthquake Engng Struct. Dyn.** Vol.32, pp.1603-1626.

[2] Ioannou, I. Bertelli1, S. Chandler, R.E. Ohno, S. Shibayama, A. Suppasri, A. Rossetto, T. 2025- The 2011 Great East Japan earthquake: fragility of Japanese buildings to ground shaking. **Bulletin of Earthquake Engineering.** Vol. 23, PP.3173-3201.

[3] Gálvez, J. D'Ayala, D. Palazzi1, N. Carlos de la Llera, J. 2025- A new procedure to derive typological fragility functions for unreinforced masonry

structures: an application to a Chilean case. **Bulletin of Earthquake Engineering.** Vol. 23, PP. 4119–4157.

[4] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY 2003 **Multi–Hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model. (HAZUSmr4)**. Washington, D.C.

[5] Hair, J. F, Black, W. C. Babin, B. J. Anderson, R. E. 2019–**Multivariate Data Analysis**. 7th ed. Cengage Learning.

[6] Fox, J. 2015–**Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models**. 3th ed. SAGE Publications, Inc.

[7] Wooldridge, J. M. 2018– **Introductory Econometrics: A Modern Approach**. 7th ed. Cengage Learning.

[8] Hosmer, D. Lemeshow, S. Sturdivant, R. 2013– **Applied Logistic Regression**. 3th ed. Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

[9] Hilbe, J. M. 2015– **Practical Guide to Logistic Regression**. Taylor & Francis Group, LLC.

[10] Field. A. 2009– **Discovering Statistics Using SPSS**. 3th ed. SAGE Publications.

[11] Erbani, J. Portier, P. Zsigmond,E. Nurbakova,D. 2024– Confusion Matrices: A Unified Theory, **IEEEAccess Journal**, vol. 12, pp. 181372 – 181419.

[12] Sathyanarayanan, S. Roopashri Tantri, B. 2024– Confusion Matrix–Based Performance Evaluation Metrics, **African Journal of Biomedical Research**, Vol. 27, pp. 4023–4031.

[13] Hussein, H. 2022- **Improving The Seismic Design of Some Types of Bridges Using the Probabilistic Damage Analysis**, Ph.D. dissertation, Department of Structural Engineering, the Faculty of Civil Engineering, Latakia university, Latakia, Syria.

[14] American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011- **AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design**. 2nd ed., Washington, DC.

التحليل الزلزالي الستاتيكي اللّاخطي للأنظمة الإنشائية الإطارية ذات بلاطات الجيزان المتصالبة والمدعّمة بعناصر تربيط مركزية ضخمة

د. ريم خرتش
أستاذ مساعد، قسم الهندسة الإنشائية– كلية الهندسة المدنية بالرقة– جامعة الفرات

الملخص

يتناول هذا البحث تطبيق نماذج مختلفة من عناصر التربيط القطرية الضخمة على محيط نموذج مبنى إطاري متوسط الارتفاع، مصمّم لتحمّل الأحمال الرأسية فقط، بحيث يتمكن هذا الهيكل من تحمل الأحمال الجانبية بكفاءة. يحتوي النموذج على بلاطة ذات جوائز متصالبة (متعامدة ومائلة)، لذا لا توجد أعمدة في المنتصف، مما يمنحه مرونة معمارية كبيرة.

تم في هذا البحث إضافة ستة أنواع مختلفة من أنظمة التربيط إلى نموذجي البلاطات المتصالبة (المتعامدة والمائلة) لتحمل الأحمال الجانبية، وهي: عناصر تربيط فولاذية ضخمة على شكلX، عناصر تربيط متداخلة على شكل X ، عناصر تربيط فولاذية ضخمة على شكل K، عناصر تربيط فولاذية سداسية الشكل، جدران قص خرسانية مسلحة، ونظام أعمدة خرسانية مسلحة مائلة. طُبّقت طريقة التحليل الستاتيكي اللّاخطي على النماذج الأربعة عشر باستخدام برنامج العناصر المحدودة ETABS، وحُددت نقاط الأداء بيانياً. تم الاعتماد على بيانات زلزال نورداغي في تركيا والذي حدث في 6 شباط 2023 كمنحنى طلب Demand.

أظهرت نتائج البحث أن نظام الإطار ذي عناصر التربيط الضخمة المتداخلة على شكل X أعطى سلوك جيد، حيث زادت صلابة المنشأ الجانبية عند نقطة الأداء بنسبة 331%. إضافةً إلى ذلك، أظهرت النتائج أن هذا النموذج يتمتع بأفضل أداء مع أقل عدد من المفاصل اللدن في الأعمدة مقارنةً مع النماذج الأخرى المدروسة.

الكلمات المفتاحية: عناصر التربيط المركزية الضخمة، التحليل الستاتيكي اللّاخطي، بلاطات الجيزان المتصالبة، الأحمال الزلزالية، زلزال 6 شباط 2023

Seismic Nonlinear Static Analysis of Concentric Mega Braced- Paneled Beams Frame Systems

Dr. Rim Khartash

Structural Engineering Department, Assistant Professor at Faculty of Civil Engineering in Raqqa– Al Furat University

Abstract

This paper discusses applying different configurations of mega bracings at the perimeter of a mid-height frame building model designed to sustain vertical loads merely. This will make the structure able to carry lateral loads effectively. The model has a paneled beams slab (grid and skew), so there are no columns at the middle. This will give higher architectural flexibility. In this research six different types of stiffening systems were added to the two slabs' models (grid and skew) to sustain lateral loads, i. e. mega X steel bracing, overlapping X steel bracing, mega K steel bracing, hexagon shape steel bracing, RC shear walls, and diagrid reinforced concrete system. Nonlinear static procedure was applied to the 14 models using ETABS program and the performance points were identified graphically. Where Nurdagi event - 6 February 2023 in Turkey was applied to the models as a demand curve.

The results demonstrated that Mega overlapping X braced frame system gave satisfying behavior with an increase in the structure's stiffness of 331%. Besides, the results showed that this model has the best performance with the least plastic hinges number in columns compared with the other models.

Keywords: Concentric Mega bracing, nonlinear static analysis, paneled beams slab, seismic load, 6 February 2023 Earthquakes

1. Introduction

For mid-height buildings there are four main structural systems. i.e. Frame system, Shear wall system, Dual system and interactive system. However, these systems are not capable enough to give a flexible architectural space such as galleries and shopping malls. In this research concentric mega braces are applied to a paneled beams structure with columns only on the perimeter of the building. The braces were added to the perimeter of the two

models only to sustain free space and fulfill architectural functionality. Aesthetic configurations were adopted through these six stiffening systems with glass curtain wall facades due to architectural purposes. Then a static nonlinear analysis was applied on each configuration to find out the configuration that gives the best performance under 6 February 2023 Earthquakes. Nurdagi event is scaled to zone 2B (near Aleppo) as per UBC97, [17]. Through this process several comparisons were made by different means to find an architecturally aesthetic structural solution that gives flexibility to the architect at the same time.

A lot of research were conducted about nonlinear static analysis (Pushover analysis). All of them have proved the effectiveness of this analysis procedure. (Ashwini et.al, 2024) [7], presented the origin, growth and development of pushover analysis, offering a deep insight into the attempts made by researchers in refining, redefining and enhancing pushover analysis and design of structure and its procedures. This was a detailed literature survey of nonlinear static pushover analysis from 1970 to 2023. Different researchers use pushover techniques to evaluate both existing and presumed structural behavior. The different formats of pushover analysis are also heighted along with its application on structural models to check for feasibility of various new progress in the analytical procedure. Conclusion would be in such a fashion that the Nonlinear Pushover analysis is found to be an extraordinary if it is carefully utilized by the users. Talking about capacity spectrum methods. Specifically, about determining performance points with reasonable accuracy. (Anjum et.al, 2026) [2], analyzes the behavior of a 10-story reinforced concrete (RC) building using pushover analysis (POA) and response spectrum analysis (RSA) in ETABS, following the Bangladesh National Building Code. Results indicate that while response spectrum analysis is effective for preliminary design, pushover analysis offers deeper insight into potential failure mechanisms. This study emphasizes the importance of integrating both static and dynamic approaches for a comprehensive seismic evaluation of high-rise buildings lateral load resisting system. (Guyaderand Iwan, 2004) [11], developed an improved capacity spectrum method employing statistically optimized linearization parameters. Capacity spectrum method, which is one of the three solution procedures presented in FEMA 440 as a tool of performance-based design. In this research, the researchers have developed a modified acceleration-displacement response spectrum (MADRS), which is

used in combination with the capacity spectrum designed to determine the Performance Point. Several (MADRS) are computed for several ductility values. The secant period lines are drawn for the same ductility values that is computed for the family of (MADRS). The Locus of Performance Points is created by connecting the points of intersection for each (MADRS) graph with its corresponding secant period line. The Performance Point is determined at the intersection of the Locus of Performance Points line and the capacity spectrum. Many researchers have inspected different structural systems under lateral load using static pushover analysis. (JKHSI and SABER, 2025) [15], used ASCE 7-10 and ACI 318-08 codes to design 24 buildings with different height by means of pushover analysis using ETABS software version 20.1.0. This study analyzed a dual system consisting of moment-resisting frames and shear walls. The highest stiffness factor found in low-rise buildings with smaller span lengths, higher shear wall thickness, and higher compressive strength. In comparison, the lowest stiffness factor appeared in high-rise buildings with longer span lengths, lower shear wall thickness, and lower compressive strength. However, (Mahmoud et. al, 2024) [17], used finite element models with different story numbers and seismic force resisting system configurations to find out the impact of vertically varying seismic load resisting systems through utilizing Performance-based seismic design. Two different reinforced concrete building groups that cover different heights and lateral system configurations were analyzed, group (1) includes 10 buildings with different numbers of stories (10,15,20) with both Moment-Resisting Frames at some floors and Shear Walls (at X global direction) at other ones, group (2) includes 10 buildings with different numbers of stories (10,15,20) with both Moment-Resisting Frames at some floors and Shear Walls (at both X global direction and Y global direction) at other ones. This study concluded that configuration of the lateral system in the vertical direction is sensitive and has a significant impact on the response reduction factor. When contemplating an earthquake-resistant system for a building of any height, it is preferable to use a moment-resisting floor system on the upper levels, which reduces drift, the lateral system becomes more ductile and effective in absorbing energy when it has sufficient stiffness in both directions as well. Other research tried to enhance structural system capacity by adding some elements, (Kamble, 2024) [16], studied adding steel plate shear walls and steel plate reinforced concrete composite shear walls to the structural system to improve the seismic performance of building structures. The conventional reinforced concrete shear

wall is not very ductile; it has a limited capacity to dissipate energy and is not very deformable. Specifically, the base of a typical shear wall is particularly vulnerable to earthquake damage and is highly challenging to restore. In high-rise buildings, these structural methods seem to be able to withstand lateral stresses brought on by earthquakes, blasts, and wind loads. Considering steel braces (Hadad et. al, 2014) [12], analyzed the cyclic behavior of braced concrete frames by executing an experimental investigation and numerical simulation. They made a comparison among four types of one bay RC frames: a bare frame, concrete braced frame, steel braced frame and solid bricks infilled frame. The comparisons cover the energy dissipation aspect. Experiments give the force value when the cracks start to appear and mode of failure. The energy dissipation for the braced and infilled frames is higher in comparison with the bare frame, where the increased values between 20% and 18%. Adding braces increases the lateral strength of the bare frame. The increases of lateral strength of concrete and steel bracing were 200%, 142%, respectively. However, (Bai and J, 2016) [8], have developed the Performance-Based Plastic Design (PBPD) method for the Buckling resistant braced frame system RC-BRBF. Base shear was calculated depending on energy equilibrium equation that considers energy dissipation capacity according to Large Takeda. The analyzed models were 5-10 story RC systems with Chevron bracing. The results showed that both buildings have achieved the desired level of performance in terms of Yield Mechanism, Capacity Curves, Cumulative Ductility Demands and Maximum Ductility. Considering Mega bracing system, (Abdulhameed et. al, 2023) [1], designed a multi-story steel building using ETABS software -of 52 m height- under vertical loads only. The model was enhanced with five different inner mega brace frames to carry a seismic load of El-Centro 1940 in SAP 2000 software in terms of nonlinear time history. As a result, Mega X-bracing with a diamond pattern gave the minimum roof displacement with a reduction ratio of 48%. This pattern also achieves the minimum story drift of all patterns.

The current research tries to find out a structural solution to create a column-free space. Concentric mega braces are applied to a paneled beams structure that has columns on the perimeter of the building. The plain frame model is designed to sustain merely vertical loads. Bracing system is added to carry lateral loads. The braces are added to the perimeter with different configurations. The goal is to find a structural system that makes mid-height

buildings give the best seismic performance under seismic loading with architectural flexibility without middle columns.

2. Theoretical Background

The Capacity Spectrum Method (CSM) listed in FEMA -440,[9] combines a representation of structural capacity curve with a representation of seismic demand curve to anticipate an expected displacement for a structure subjected to a specific seismic events in term of response spectrum. Structural capacity is represented by a capacity spectrum determined from a push-over analysis and seismic demand is represented by response spectra. Actually, push-over analysis represents a Shear force-Displacement curve as a result of nonlinear analysis of a building model's behaviour. The analysis depends on converting the whole structure into a single degree of freedom structure. This is executed using the first dynamic mode of the structure. This can be acceptable as a solution for low to mid rise structures. However, the results might not be correct for high rise structures which are affected with higher dynamic modes rather than the first mode only.

The Shear force-Displacement curve can be converted into a capacity curve through several procedures. Where the shear force is converted into spectral acceleration, and the displacement is converted into spectral displacement. The whole process depends on the first dynamic mode shape and the weight of the structure.

The spectral acceleration can be obtained from Eq. (1), where it is related to α_1 and W i.e. the weight of the structure. However, α_1 is calculated through Eq. (2) which is completely related to the first mode shape of the structure and the vertical distribution of the weight of the structure.

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \tag{1}$$

Where:

$$\alpha_1 = \frac{\left(\left(\sum W_i \phi_i\right)/g\right)^2}{\left(\sum (W_i)/g\right)\left(\sum (W_i \phi_i^2)/g\right)} \tag{2}$$

The spectral displacement is calculated by Eq. (3). Where it is a function of the displacement, PF_1 factor and the maximum value of the first mode at the top of the structure.

$$S_d = \frac{\Delta}{PF_1 \phi_1} \tag{3}$$

PF_1 Factor is calculated from Eq. (4):

$$PF_1 = \frac{\sum (W_i \phi_{i1}) / g}{\sum (W_i \phi_{i1}^2) / g} \tag{4}$$

As a result the secant period of the structure at any point of the capacity curve can be calculated by Eq. (5):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \tag{5}$$

As mentioned before finding the performance point needs a combination of the capacity curve and the demand curve which is represented by response spectrum of the studied seismic event. However, the response spectrum is given in terms of structure period rather than spectral displacement. This needs a simple modification on the response spectrum to get the spectral displacement that coincides with the spectral acceleration of it. This is done by Eq. (6)

$$S_d = S_a \left(\frac{T^2}{4\pi^2} \right) \tag{6}$$

Damping ratio of the structure at the performance point is calculated directly from capacity curve, Fig. (1). It is related to the ductility ratio Eq. (4-6) where ductility means the ability to undergo significant plastic deformation after yielding without a significant reduction in strength, the initial and second stiffness of the structure and the factor α , Eqs. (7,8,9)

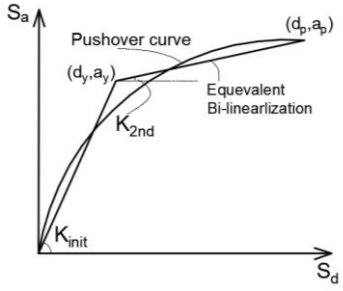


Figure.1: Capacity curve characteristics, FEMA- 440, [9]

$$\mu = \frac{d_p}{d_y} \tag{7}$$

$$K_{init} = \frac{a_y}{d_y} \qquad K_{2nd} = \frac{(a_p - a_y)}{(d_p - d_y)} \tag{8}$$

$$\alpha = \frac{K_{init}}{K_{2nd}} \tag{9}$$

$$\beta_{eff} = \beta_0 + \kappa \frac{2(\mu - 1)(1 - \alpha)}{\pi\mu(1 + \alpha\mu - \alpha)} \tag{10}$$

According to ATC-40 since $\beta_0 = 0.05 \le 0.1625$ then Hysteretic behaviour is Type A. then κ factor can be taken as $\kappa = 1$, FEMA-440,[9].

Eventually the damping ratio is given with Eq. (10). Then the equivalent period can be calculated by Eq. (11).

$$T_{\sec} = T_0 \sqrt{\frac{\mu}{(1 + \alpha\mu - \mu)}} \tag{11}$$

In order to find the performance point the procedure needs to calculate ductility ratios that coincides with the T(sec) values of the capacity curve and damping ratios as a result. This can offer a series of response spectra with different modification factors, Eq. (12). This method was explained by (Guyaderand Iwan, 2004) [11].

$$T_{eff} = T_0 \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \qquad M = \left(\frac{T_{eff}}{T_{\sec}}\right) \tag{12}$$

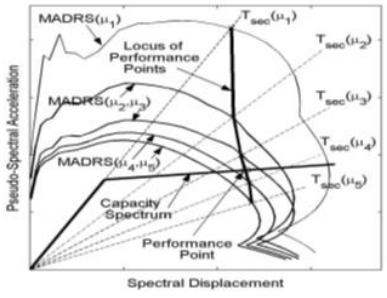


Figure.2: Determining performance point- Real events response spectra, [11]

Then a curve consists of the points of the T_{sec} lines that intersects with the response spectra would intersect with the capacity curve that represents the behaviour of the structure, Fig. (2). Considering the number and stage of the formed plastic hinges at the performance point. The stability of the structure can be determined, Fig. (3).

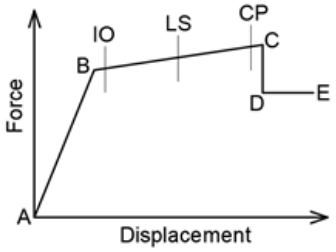
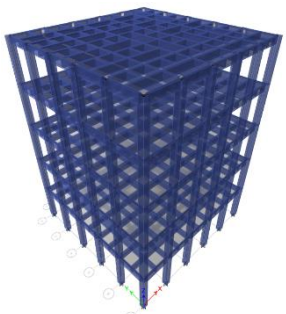


Figure. 3: Plastic Hinge curve, FEMA- 440, [9]

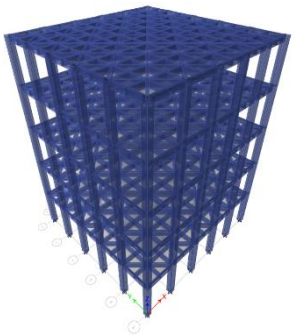
AB stage represents the linear state of the hinge. Where point B represents effective yield. However, BC stage means that the hinge gets into a non-linear stage by its ductile range. This non-linear stage is divided into three different levels: Immediate occupancy (IO): Light damage with no permanent strains, where the structure can retain original strength and stiffness. Life Safety (LS): Moderate damage with some noticeable strains which means cracks. The hinge might be beyond economical repair. Collapse Prevention (CP): High damage with large strains and cracks. The hinge is near collapse. CD stage gives a sudden reduction in load resistance followed by a reduced resistance from D to E.

3. Analyzed models

A five-story model 20x20m with a story height 5.5m, designed to carry vertical loads only. For architectural purposes no middle columns are allowed. Two slab systems were adopted, Fig. (4): the first one is a grid paneled beam slab with dimensions of 900 x 250 mm, and the second one is a skew paneled beam slab with dimensions of 600 x 250mm. Since the skew beams slab is interconnected and have less deflection, a reduced thickness of the beams is presumed, so the total weight of the two models is very close.



a. 3D – Plain Frame System- Grid paneled beam slab



b. 3D – Plain Frame System- Skew paneled beam slab

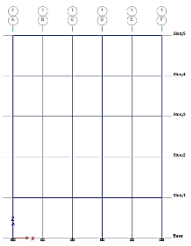
Figure. 4: Analysed models – Plain Frame

Six different types of Stiffening systems are added to the two models to sustain lateral loads i. e. mega X steel bracing, overlapping X steel bracing, mega K steel bracing, hexagon shape steel bracing, RC shear walls, and diagrid reinforced concrete bracings without columns. All these systems are added to the perimeter of the two models only to sustain free space to fulfil architectural functionality. All the models were built in ETABS 20.1.0, and nonlinear static pushover analysis was applied to all of them, where P-delta effect was checked for all models.

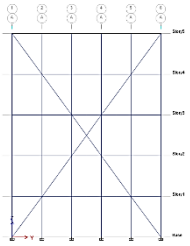
Live load equals 3 kN/m^2, flooring load equals 2 kN/m^2. Steel bracings have a section of HS: 100 x 200 x 10 and steel grade of S355. RC Longitudinal reinforcement f_y=400MPa, Shear reinforcement f_y=280MPa. A higher characteristic compressive strength was adopted for stiffening shear walls and diagrid bracings with f'_c=28MPa, where the rest elements have a value of f'_c=25MPa for characteristic compressive strength. Expected yield strength which is considered in backbone curve: (f_{ye}) is taken 1.25 times the nominal yield strength (f_y) for braces and reinforcement. Expected compressive concrete strength (f'_{ce}) equals 1.3 times the lower-bound compressive strength (f'_c=25MPa) as per ASCE 41-14, [6].

Concrete bracings have a section of 300x600 mm with $12T20, \phi 10/15cm$ reinforcement. Fig. (5) Depicts the six different configurations of the stiffening systems added to plain frame models to sustain seismic loads. Four of them are steel mega bracings. Diagrid and shear wall systems are made of reinforced

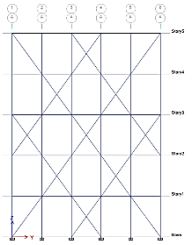
concrete. All of them are added to the perimeter of the structure. The braces are added to the four sides of the models symmetrically.



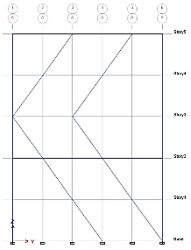
a. Plain Frame system



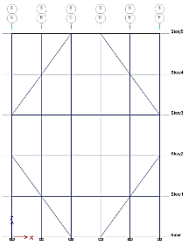
b. Mega X bracing



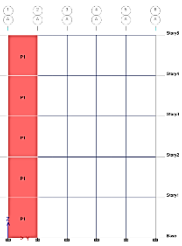
c. Overlapping X



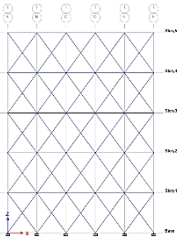
d. Mega K bracings



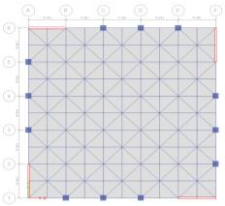
e. Hexagon shape bracing



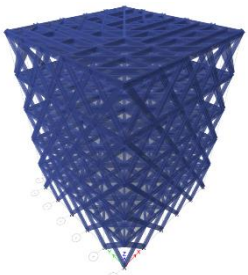
f. Shear wall



g. RC DiaGrid bracing



h. shear wall distribution



k. 3D shape- RC DiaGrid bracing

Figure. 5: Bracing and stiffening systems

Plastic hinges backbone curves were defined automatically in ETABS as per ASCE 41-13, [5]. Beams hinges defined as table 10-7: concrete beams-flexure. M_3 degree of freedom at the beginning and end of beams. Column hinges as table 10-8: concrete columns. P-M_2-M_3 degree of freedom at the beginning and end of columns. Steel braces hinges as table 9-7. Axial (P) at the beginning and end of beams. Shear wall hinges: auto fiber (P-M_3).

Nurdagi event was applied to the models as a demand curve. It took place on 6 February 2023 in Turkey near Gaziantep with 21.27km distance of epicentre. PGA was 1.35m/sec^2. With (S_c) soil type, shear wave velocity was 599 m/s. The response spectrum is scaled to a target spectrum in zone 2B as per UBC97 code, [15] by a scale factor SF= 0.581. Scaling was done according to amplitude scaling method as per ASCE7-16, [4]- section 16.2.3. Where Average spectral ratio scaling procedure was adopted within a period range $0.2T_1$ to $1.5T_1$, ASCE7-16, [4]- section 21.2, where T_1 is the fundamental period of the structure. Since the models have different period values, the minimum and maximum fundamental periods of models were adopted. Directionality SRSS of the pairs EW, NS was adopted. Then the response spectrum is converted to spectral coordinates S_d-S_a, Eq(6)- Fig. (6,7).

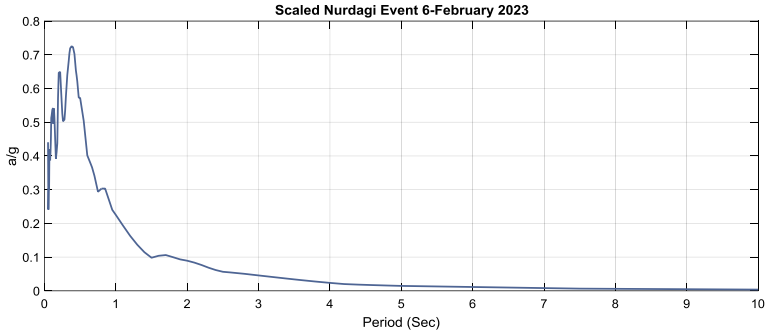


Figure.6 Nurdagi event's Response Spectrum

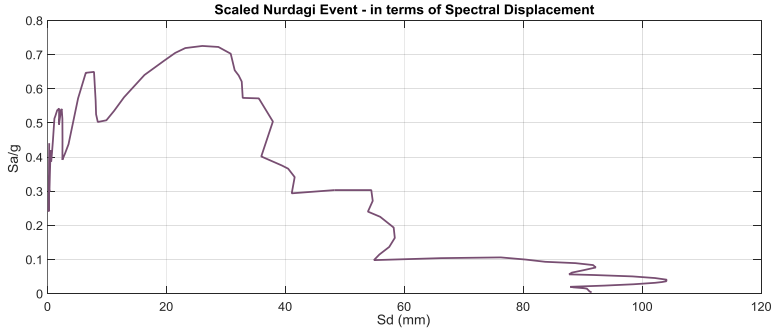
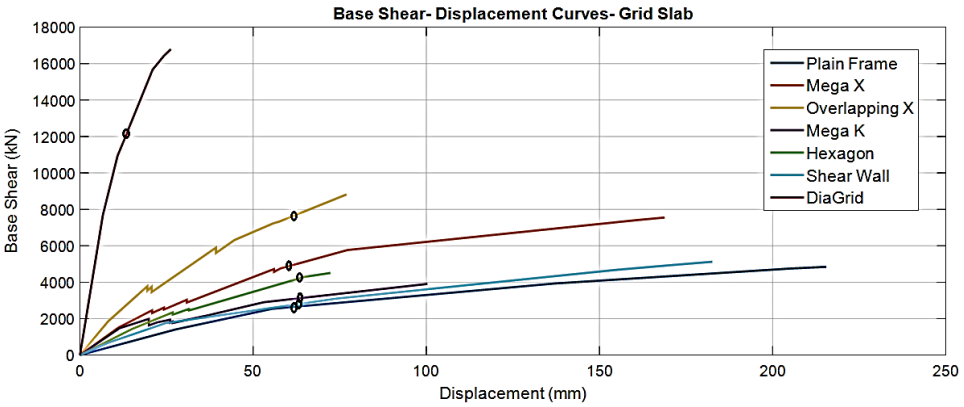


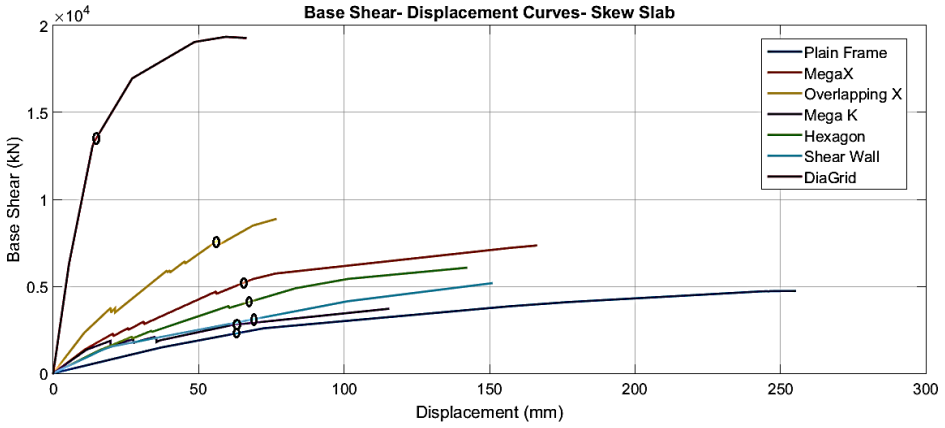
Figure.7 Nurdagi event's Spectral coordinates, (Eq. 6)

4. Analysis results

After defining the plastic hinges and applying nonlinear analysis to the 14 models. The shear force- displacement curves were obtained, Fig. (8) From which the most ductile model is the plain frame system sustains the maximum displacement. However, the plain frame models have the lowest value of base shear. Fig. (8) Also shows that all models fulfil the condition $\mu_{strength} < \mu_{\max}$, $ASCE7-16$,[4]. Except for grid slab model-DiaGrid. In general, all skew slab models gave better results than grid slab model. Which is probably due to the additional stiffness gained by beams interconnections.



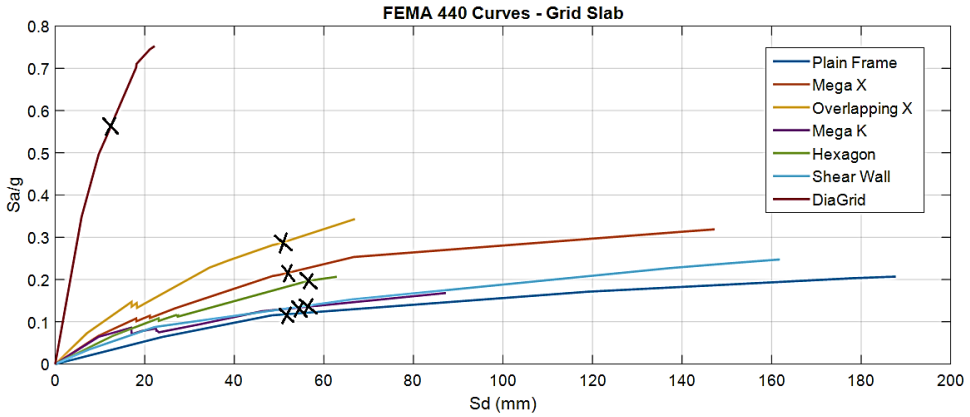
a. The shear force- displacement curves Grid Slab



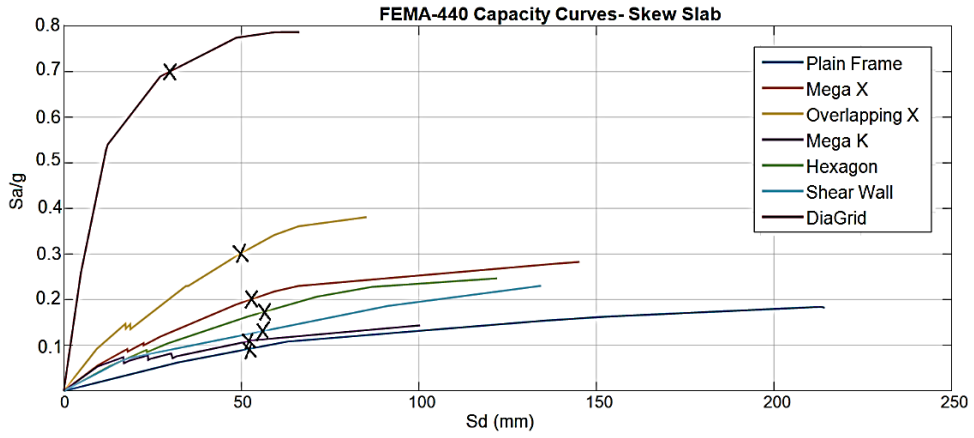
b. The shear force- displacement curves Skew Slab

Figure.8 The shear force- displacement curves of 14 models

After converting the curves into capacity curves by converting displacement into spectral displacement. A set of curves are obtained as per FEMA-440, [9], Fig. (9).



a. The Capacity curves Grid Slab



b. The Capacity curves Skew Slab, (Eq. 1,3)

Figure.9 The Capacity curves of 14 model

By intersecting demand curve with capacity curve, the performance point could be identified i.e. Nurdagi event's Response spectra –scaled to zone 2B as per UBC97 with the FEMA-440 capacity curve, Fig. (10). performance

points are obtained for all 14 models. The adopted procedure was to calculate values of ductility μ that coincides with T_{sec} values of the capacity curve of the model, Eq. (11). And calculating modification factors, Eq. (12) and obtaining a set of modified demand curves. Each of them will intersect with the period lines by a point. The series of points will make a curve that intersects with the capacity curve of the model identifying the performance point.

Table. 1 Ductility value and modification factor according to T_{sec} of Overlapping X braced frame model's capacity curve

T_{sec}	MF, (Eq. 12)	μ (*Eq.*11)
0.64	1.56	0.66
0.69	1.36	0.84
0.70	1.29	0.92
0.72	1.24	1.00
0.75	1.15	1.19
0.82	0.96	1.88
0.89	0.82	3.41

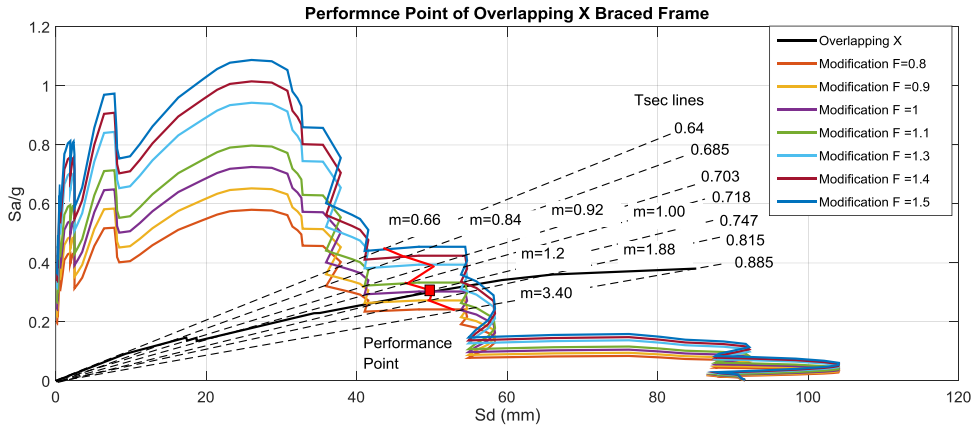


Figure. 10 Finding performance point of overlapping X Supporting system

The performance points parameters of the 14 models are tabulated in table. (2). Although all the models have approximately similar weight values the dynamic properties of them are different. i. e. fundamental period. It has a range from

0.306 sec to 1.418 sec. From which it can be said that the difference in configurations makes a big change in dynamic properties.

Table.2 Performance point parameters, Fig. (9)

Grid Slab

System	Plain Frame	Mega X	Overlapping X	Mega K	Hexagon	Shear wall	DiaGrid
S_d (mm) (Eq.3)	56	55	54	58	58	57	13
S_a (/g) (Eq.1)	0.12	0.22	0.3	0.135	0.2	0.14	0.57
T_{eff} (Eq.12)	1.72	1.04	0.81	1.20	1.23	1.25	0.35
T_0 (ETABS)	1.35	0.94	0.72	0.97	1.15	1.22	0.32
W (kN)	30721.1	30826.4	30955	30826.5	30803.1	30857.4	31561.9
T_{sec} (ETABS)	1.50	1.05	0.82	1.35	1.17	1.30	0.42
M F (Eq.12)	1.31	0.98	0.97	0.79	1.10	0.93	0.70
α (Eq.9)	0.81	0.57	0.51	0.26	0.67	0.43	0.32
μ (Eq.7)	1.70	3.18	2.90	3.21	2.46	3.32	2.61
κ (Fig.2)	1.00	0.80	0.80	0.78	0.82	0.78	0.81

β% (Eq.10)	0.08	0.12	0.13	0.21	0.10	0.15	0.19

Skew Slab

System	Plain Frame	Mega X	Overlapping X	Mega K	Hexagon	Shear wall	DiaGrid
S_d (mm) (Eq.3)	54.88	57	50	55	58	59	30.5
S_a (/g) (Eq.1)	0.0982	0.215	0.3	0.12	0.18	0.14	0.7
T_{eff} (Eq.12)	1.89	0.97	0.80	1.12	1.11	1.12	0.35
T_0 (ETABS)	1.42	0.87	0.67	0.89	1.04	0.80	0.31
W (kN)	28273.4	28378.8	28507.6	28378.8	28355.4	30748.4	29008.6
T_{sec} (ETABS)	1.43	0.99	0.85	1.30	1.10	1.10	0.32
M F (Eq.12)	1.75	0.95	0.89	0.74	1.02	1.03	1.23
α (Eq.9)	0.65	0.49	0.45	0.22	0.57	0.46	0.53
μ (Eq.7)	2.33	3.04	3.31	3.36	2.49	2.65	2.27
κ (Fig.2)	0.83	0.78	0.78	0.78	0.82	0.81	0.88
β% (Eq.10)	0.11	0.14	0.14	0.23	0.12	0.15	0.14

By returning to the base shear- displacement curves, displacement values at the performance point can be obtained. Table. (3). Shows the step of the performance point.

Table.3 Performance Point's displacements in (mm) and base shear in (kN).

Performance Point's displacements and base shear

Slab Type		Plain Frame	Mega X	Overlapping X	Mega K	Hexagon	Shear wall	DiaGrid
Grid Slab	Step	10	10	10	11	9	3	5
	Displ.	64.36	63.22	64.36	66.67	66.67	65.53	13.76
	V kN	2693	5034	7852	3190	4300	2868	12299
Skew slab	Step	10	10	13	13	8	4	5
	Displ.	63.08	65.53	57.47	63.22	66.67	67.82	13.96
	V kN	2320	5400	7683	2778	4580	3044	13284

Plastic hinge analysis at the final step is shown in table. (4) where the number of plastic hinges is shown, the stage and the correlated element are tabulated. The best behavior goes to the Overlapping X stiffening system for a skew paneled beam slab where it has at the performance point: 12 plastic hinges- stage IO in braces and 2 plastic hinges-CP stage in columns. While the plain Frame model has 14 plastic hinges- stage IO in columns and 2 plastic hinges-CP stage in columns as well, Fig. (11). It is obvious that there are no plastic hinges in the paneled beams slab. Which means that the model succeeded in making an architectural free space that resists lateral force as well.

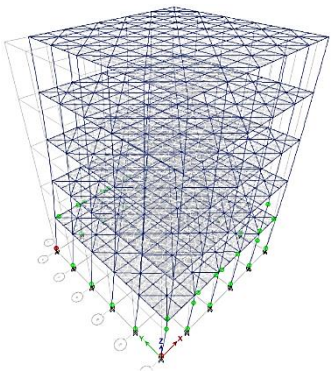
Table.4 Plastic hinge analysis

Final Step's plastic hinges

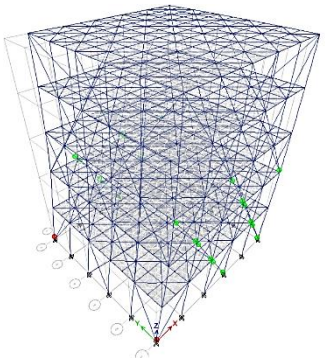
Slab Type	Plain Frame	Mega X	Overlapping X	Mega K	Hexagon	Shear wall	DiaGrid
Grid Slab	40 IO Beam	16 IO Br	16 IO Br	12 IO Br	6 IO Br	14 IO Br	14 CP Br

	20 IO Col	16 IO Col 4 CP Col	2 CP Col	14 IO Col	12 IO Col	6 IO Col	
	4 CP Col	12 IO Beam		2 CP Col	2 CP Col	2 CP Col	
Skew slab	34 IO Col	12 IO Br	14 IO Br	12 IO Br	6 IO Br	10 IO Br	8 CP Br
	2 CP Col	18 IO Col 2 CP Col	2 CP Col	14 IO Col	12 IO Col	6 IO Col	
		2 IO Beam		2 CP Col	2 CP Col	1 CP Col	

Br: braces, Col: Column



a. Plastic hinges-plain frame at the Performance point



b. plastic hinges- overlapping X at Performance point

Figure. 11: Plastic hinges at performance point's step for plain frame and overlapping X bracing

Table. (5) shows the response modification factor of R for all 14 models. Which varies depending on the nonlinear behavior of the structural system. Where $R = R_{\mu} \times R_s$; $R_{\mu} = V_e / V_u$ and $R_s = V_u / V_d$, ASCE7-16, [4].

V_e: Elastic strength
V_u: actual strength
V_d: design strength

Table.5 Response modification factor

Grid Slab	Plain Frame	Mega X	Overlapping X	Mega K	Hexagon	Shear wall	DiaGrid
R	5.5	8.4	7.15	4.706	4.118	5.6	3.625
Skew Slab	Plain Frame	Mega X	Overlapping X	Mega K	Hexagon	Shear wall	DiaGrid
R	5.25	7.826	7.5	5.25	5	6	5.077

5. Conclusion

Inspecting all parameters, the skew paneled beam slab gave better performance than the grid slab. Where the slab acts as horizontal diaphragm that transfers lateral loads to the seismic resisting system. The bi- directional interaction significantly alters the force distribution and stiffness of the seismic resisting system. Firstly, considering lateral stiffness mega brace systems increased the lateral stiffness with a noticeable ratio. The diagrid RC system and the overlapping X braces frame system has the maximum amplification ratio with a value of 573% and 331% respectively. Which was proved by (Hadad, 2014) [10] and (Abdulhameed et. al, 2023) [1]. Hence, the two systems sustain the least values of top displacement with a reduction of 22% and 91% respectively. Secondly, considering plastic hinge analysis it is obvious the overlapping X braced frame system gave the optimum performance, since the hinges were mostly in braces (14-16 hinges) while only two columns were damaged. Which is very good since most of the columns are safe and the rehabilitation can be done easily. The plain frame system would

have 24 column hinges and 40 beam hinges at the final step for grid slab. While it would have 36 column hinges and no beam hinge at the final step for skew slab. The shear wall frame system gave 14 hinges in beams and 8 hinges in columns for grid slab, and it gave 10 hinges in beams and 7 hinges in columns for skew slab at final step. Furthermore, in terms of response modification factor the Mega X bracing frame system and the overlapping X bracing frame system have the highest values between 7.15-8.4 for grid slab and skew slab as well. Finally, the shear wall frame and diagrid systems have more like elastic behaviour since they have less ductility than the other systems, as it was proved by (Kamble, 2024) [16]. However, at the performance point for grid slab the most ductile systems are the overlapping X and mega X braced frame systems with 3.3% and 3.36% ductility ratios. For skew slab the most ductile systems are the mega X, overlapping X and mega K braced frame systems with 3.18%, 2.9% and 3.21% ductility ratios.

As an extend to this topic an eccentric bracing system can be considered since they can dissipate energy through ductility more effectively than concentric braces. Concentric mega bracing with ductile shear links can be analyzed using NSP (Nonlinear Static Procedure) to find out the best solution. Soil type effect can be considered to find out the best configuration for each soil type.

6. References

1. Abdulhameed. A, Ahmad. M, Karim. A, 2023. *Enhancing Seismic Performance Of Multi-Story Steel Buildings Using Inner Mega Braced Frames.* Basra, Iraq: Misan Journal of Engineering Sciences.
2. Anjum. N, Rana. M, Islam. F, Rahman. M, 2026. *Seismic Performance Evaluation of a 10-story RC Building Using Pushover Analysis & Response Spectrum Analysis.* Bangladesh: American Journal of Civil Engineering.
3. *Disaster and Emergency Management Autority (AFAD).* Turkey: 2023.
4. ASCE7-16, 2016. *American Society of Civil Engineering.* USA.
5. ASCE 41-13, 2013. *American Society of Civil Engineering*. USA.
6. ASCE 41-14, 2014. *American Society of Civil Engineering*. USA
7. Ashwini .L. K, Keshavamurthy. M, Ravikumar. C, 2024. *Pushover Analysis -A Review.* Bengaluru, India: JETIR.

8. Bai. J and J. Ou, 2016. *Earthquake-Resistant Design Of Buckling-Restrained Braced Rc Moment Frames Using Performance-Based Plastic Design Method.* s.l.:Engineering structures.
9. FEMA-440, *Federal Emergency Management Agency*. US.
10. Genikomsou. A, 2024. *Seismic Damage Assessment Of Reinforced Concrete Slacolumn Connections—Review Of Test Data, Code Provisions And Analytical Models.* Canada: MDPI.
11. Guyader. A, and Iwan.W, 2004. *An Improved Capcity Spectrum Method Employing Statistically Optimized Linearization Parameters.* Canada: 13th World Conference on Earthquake Engineering.
12. Hadad. H, Metwally. I, El-Betar. S, 2014. *Cyclic Behavior Of Braced Concrete Frames.* Cairo: HBRC Journal.
13. CSI Incorporation., *ETABS. 20.0.0.*
14. JKHSI.S, and SABER. S, 2025. *Factors Influencing The Elastic Stiffness Factor In Reinforced Concrete Structure Of Dual System Using Pushover Analysis.* Northern Cyprus: IIUM Engineering Journal.
15. Kamble. D, 2024. *A Conceptual study of Wind Load with Different Types of Lateral Load Resisting Methods in 15-Storey Structure*. s.l.:Interantional Journal Of Scientific Research In Engineering And Management.
16. UBC97, 1997. *UNIFORM BUILDING CODE*
17. Mahmoud. O, El-Kateb. M, Zaher. A, 2024. *Performance-Based Seismic Analysis of RC Structures with Vertically Variable Lateral Load Resisting System.* Cairo: IJCRT.

استخدام مواد مالئة محلية معاد تدويرها لرفع كفاءة المعالجة في الأراضي الرطبة الصنعية

شادي تقلا* غادة بلال**

*طالب دكتوراه في قسم الهندسة الصحية والبيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق

**أستاذ مساعد في قسم الهندسة الصحية والبيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق

الملخص

تتلخص فكرة البحث في دراسة إمكانية استخدام إحدى مواد المخلفات الصلبة وهي نفايات الإطارات المطاطية كمادة مالئة في أحواض النباتات ضمن الأراضي الرطبة الصنعية واعتبارها وسيط جديد وناقل حيوي للتدفق ضمن تلك الأحواض رديفاً للمواد الحصوية الاعتيادية ومقارنتها مع المادة المالئة البديلة كلياً أو جزئياً أي من خلال دمج الحصويات مع القطع المطاطية وتقييم كفاءة المادة المالئة البديلة في رفع كفاءة المعالجة وإزالة الملوثات، وبالتالي التخلص من تلك المخلفات بطريقة آمنة بيئياً، كل ذلك سينعكس إيجابياً على تخفيض كلفة المعالجة، وكذلك على الناحية البيئية ومواصفات المياه الناتجة عن المعالجة.

تم تقييم الأنظمة اعتمادًا على كفاءة إزالة المواد الصلبة العالقة الكلية (TSS)، والطلب الحيوي للأكسجين (BOD_5)، والطلب الكيميائي للأكسجين (COD)، والأمونيوم (NH_4^+)، والنترات (NO_3^-)، والفوسفات (PO_4^{+3})، إضافة إلى نسبة انخفاض المسامية كمؤشر على تطور الانسداد.

أظهرت النتائج أن الأنظمة المختلطة حققت أداءً أفضل مقارنة بالأوساط الأحادية. وقد بلغت أعلى كفاءة إزالة حوالي 80% لـ BOD_5، و74% لـ COD ، و63% لـ NH_4^+، و46% لـ NO_3^-، و66% لـ PO_4^{+3}، في حين انخفض فقدان المسامية من 39.7% في الوسط الحصوي إلى نحو 24.49% في الأوساط المختلطة.

أكدت النتائج أن زيادة نسبة المطاط حسنت المسامية وخفضت تطور الانسداد، بينما أدت النسب المرتفعة جدًا من المطاط إلى انخفاض طفيف في كفاءة إزالة المواد الصلبة العالقة بسبب انخفاض قدرة الترشيح الفيزيائي.

وبالتالي فإن الخلط بين المادة الحصوية ورقائق نفايات الإطارات المطاطية تحقق توازنًا بين التوصيلية الهيدروليكية، وانتقال الأكسجين، وكفاءة الترشيح، والنشاط البيولوجي. كما تدعم الدراسة إمكانية استخدام رقائق الإطارات المطاطية المعاد تدويرها كوسط ترشيح مستدام منخفض التكلفة لتحسين الأداء طويل الأمد للأراضي الرطبة الصنعية.

كلمات مفتاحية: الأراضي الرطبة الصنعية، أحواض المعالجة البيولوجية، مادة مالئة، نفايات الإطارات المطاطية، كفاءة المعالجة، إعادة تدوير.

Using recyclable materials for enhancing the treatment efficiency of the constructed wetlands

Shadi Takla* **Ghada Bilal****

* PhD student at environment and sanitary of faculty of civil engineering – Damascus university

** Assistant Professor at environment and sanitary of faculty of civil engineering – Damascus university

Abstract

The idea of the research is summarized in studying the feasibility of using one of the solid waste materials, rubber tire waste, as a filler material in plant basins within constructed wetlands, and considering it as a new medium and a biological conduit for flow within these beds alongside conventional gravel materials, and comparing it with the alternative filler material either fully or partially, that is, by combining gravel with rubber pieces, and evaluating the efficiency of the alternative filler material in improving treatment efficiency and pollutant removal, thus disposing of this waste in an environmentally safe manner. All of this will positively reflect on reducing treatment costs, as well as on the environmental aspect and the quality of the water resulting from the treatment.

The systems were evaluated based on the efficiency of removing total suspended solids (TSS), biochemical oxygen demand (BOD_5), chemical oxygen demand (COD), ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-), and phosphate (PO_4^{+3}), in addition to the percentage reduction of porosity as an indicator of clogging development.

The results showed that mixed systems achieved better performance compared to single media. The highest removal efficiency reached approximately 80% for BOD, 74% for COD, 63% for NH4, 46% for NO3, and 66% for PO4, while porosity loss decreased from 39.7% in the gravel medium to about 24.49% in the mixed media .

The results confirmed that increasing the proportion of rubber improved porosity and reduced clogging development, while very high proportions of rubber led to a slight decrease in the removal efficiency of suspended solids due to decreased physical filtration capacity .
Therefore, mixing gravel material with rubber tire chips achieves a balance between hydraulic conductivity, oxygen transfer, filtration efficiency, and biological activity. The study also supports the feasibility of using recycled rubber tire chips as a low-cost sustainable filter medium to enhance the long-term performance of constructed wetlands.

Keywords: Constructed wetland, biological treatment basin, media, waste rubber tires, Recycling.

1. المقدمة:

تعتبر معالجة مياه الصرف الصحي مشكلة عالمية، وإن إلقاء النفايات في المياه السطحية يمكن أن يؤدي إلى العديد من المشاكل البيئية الإضافية. غالباً ما كانت تقنية الصرف الصحي التقليدية غير ناجحة في البلدان النامية بسبب إمدادات التشغيل المعقدة وإجراءات الصيانة المكلفة (نيلسون وآخرون، 2012). تعتبر الأراضي الرطبة الصنعية حلاً تقنياً واقتصادياً وبيئياً مستداماً لمعالجة مياه الصرف الصحي في المجتمعات الصغيرة لأنها فعالة في إزالة الملوثات المتنوعة (Araújo et al.، 2008؛ Chen et al.، 2008). وهي محطات سهلة الإنشاء، بسيطة التشغيل، لا تحتاج إلى طاقم عمال أو مشرفين ويمكن مراقبتها وإدارتها من قبل شخص واحد، بالإضافة لكونها صديقة للبيئة حيث لا ينتج عنها أي تأثيرات غير مرغوب فيها (S. Vidal ; G. Hormazábal, 2018).

يمكن أن تحتوي المواد المالئة في الأراضي الرطبة على نوعين أو أكثر من الوسائط في طبقات متغيرة. من الناحية العملية، تعتبر الحصى هي الوسائط المستخدمة على نطاق واسع في الأراضي الرطبة الصنعية (Zidan et al.، 2013). نجح (Collac¸o and Roston, 2006) في التحقيق في استخدام الإطارات المقطعة كوسيط للأراضي الرطبة لمعالجة مياه الصرف المزروعة بالنباتات الكبيرة المائية. قام (Cordesius and Hedström, 2009) بالبحث في استخدام قطع الحصى والبلاستيك في معالجة مياه الصرف مع التقدم في الوسائط البلاستيكية. أثبتت الأنابيب البلاستيكية المعاد تدويرها وقطع الإطارات الممزقة أنها وسيلة جيدة لمعالجة مياه الصرف الصحي البلدية (عبد الهادي، 2014).

سيتم في هذا البحث التركيز على مادة نفايات الإطارات المطاطية لتشكيل وسيط ترشيح في الأراضي الرطبة الصنعية، ودراسة جدوى استخدامها في معالجة تلوث مياه الصرف الصحي بالنباتات. لا سيما أن نفايات المواد المطاطية بحد ذاتها تشكل تهديدًا بيئياً خطيراً. كما تم التركيز على نوعين من

النباتات هما القصب وأحد نبات الزينة (الجهنمية)، حيث تلعب نباتات الزينة دوراً هاماً في إزالة ملوثات الصرف الصحي فضلاً عن كونها تعطي منظراً جمالياً خلاباً.

2. هدف البحث:

تتلخص الأهداف الرئيسية فيما يلي:

- اختيار مادة مالئة بديلة للحصويات في أحواض الأراضي الرطبة الصنعية من إحدى مواد النفايات الصلبة للتخفيف من آثارها الضارة على البيئة من جهة وتوفير كلفة المادة المالئة الحصوية التقليدية ضمن الأحواض ومساهمتها في إزالة ملوثات الصرف الصحي مع التخفيف من مشكلة انسداد المادة المالئة من جهة ثانية.
- استخدام قطع نفايات الإطارات المطاطية كمادة مالئة في الأراضي الرطبة الصنعية وتحديد مدى تأثيرها على فعالية معالجة مياه الصرف الصحي. وإجراء مقارنة بين نوعي المادة المالئة الحصوية والمطاطية، مع دراسة خيارات الدمج بينهما.

3. الدراسات المرجعية:

تم تصنيف تلك الدراسات إلى محورين أساسيين:

1.3. المحور الأول: استخدام نفايات الإطارات المطاطية كمادة مالئة في أحواض محطات المعالجة بالنباتات (الأراضي الرطبة الصنعية):

- دراسة (Scott D. Wallace،Robert H. Kadlec) في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2009، بعنوان (KADLECWALLACE 2009 Treatment Wetlands 2nd Edition)، حول موضوع تطورات مراقبة تشغيل أنظمة الصرف الصحي ضمن الأراضي الرطبة، حيث أوضحا

أنه خلال آخر عقد من الزمن، تطورت الأراضي الرطبة تكنولوجياً. وأنه هناك مشكلة في أن العديد من الدراسات العليا تركز على الأحداث قصيرة المدى. على سبيل المثال، لم يتم دراسة انسداد طبقات الترشيح ضمن الأراضي الرطبة بطريقة منهجية، لأن مراقبة ظاهرة الانسداد تستغرق وقتًا أطول من فترة عمل طالب الدراسات العليا.

- دراسة (Vassilios A. Tsihrintzis ، Alexandros I. Stefanakis) في اليونان عام 2009 بعنوان (Use of various substrates as filter media to treat the effluent of a Vertical Flow Constructed Wetland)، والتي ركزت على دراسة جدوى استخدام ركائز مختلفة كوسائط ترشيح لمعالجة النفايات السائلة للتدفق الشاقولي في الأراضي الرطبة الصنعية من خلال إنشاء أربعة مرشحات جاذبية على نطاق تجريبي، تحتوي على وسائط ترشيح مختلفة (زيوليت، وبوكسيت، ومزيج من الزيوليت والبوكسيت)، أظهرت النتائج أن جميع المرشحات حسنت جودة مياه الصرف في الأراضي الرطبة. أدى استخدام الزيوليت والبوكسيت إلى تحسين إزالة النيتروجين والفوسفور بشكل كبير.

- دراسة (P.Molle، M.Vanclooster، N.Forquet،A.Morvannou) في فرنسا عام 2013 بعنوان (Use of various substrates as filter media to treat the effluent of a Vertical Flow Constructed Wetland)، حول نمذجة منظومة الصرف الصحي، واستخدمت عبوات معدنية معاد تدويرها كوسائط ترشيح. وقد أوصت الدراسة بضرورة توصيف الخصائص الهيدروليكية لمواد الترشيح المستخدمة عموماً في الأراضي الرطبة ذات التدفق الشاقولي.

واعتبروا ذلك شرطاً أساسياً لنمذجة منظومة معالجة مياه الصرف الصحي. حيث وصفوا مادة المرشح بأنها عبارة عن مصفوفة من المواد المعدنية المسامية والمواد العضوية التي تجعل التوصيف الهيدروليكي مهمة صعبة إلى حدٍّ ما.

- دراسة (Abdel ، Mahmoud EL-Gamal، Ali Rashed،Mohamed Ahmed Ahmed Abdel Hady Eid،Razik Zidane) في مصر سنة 2015، بعنوان (Wastewater treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands using different media)، قامت باختبار ومقارنة معالجة مياه الصرف الصحي من خلال التدفق الأفقي تحت السطحي للأراضي الرطبة ((CWsباستخدام ثلاث وسائل معالجة مختلفة (الحصى وقطع الأنابيب البلاستيكية وشرائح المطاط الممزقة) في قرية سماحة، الدقهلية، مصر. أظهرت النتائج أنه لا بد من النظر إلى كفاءة المعالجة وإزالة الملوثات حيث مدة البحث لم تكن كافية خاصة الأشهر الأولى من التأقلم أعطت نتائج متقاربة، وغالباً ما تم ملاحظة تفوق الحصويات في إزالة كل من BODو COD وTSS، وتفوق البلاستيك من حيث المسامية، وتفوق قطع نفايات الإطارات المطاطية. ووضع الباحث توصية بضرورة إجراء أبحاث أكثر ومقارنة أوسع لجدوى استخدام البدائل المحلية لحصويات وسط الترشيح.

- دراسة (Bill ، Craig Chivers، Mark Harrison،Alfredo García-Pérez Grant) في جامعة لانغرانج في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2015، بعنوان (Recycled Shredded-Tire Chips Used As Support Material in a Constructed Wetland

Treating High-Strength Wastewater from a Bakery)، أثبت الباحثون من خلالها أن المواد الداعمة المستخدمة في الأراضي الرطبة الصنعية هي عنصر أساسي وآلية مهمة في عملية إزالة الملوثات من مياه الصرف الصحي بما في ذلك مركبات الفوسفور. حيث أبدت نفايات الإطارات المعاد تدويرها بعد أن يتم تقطيعها إلى شرائح صغيرة تشبه الحصويات التقليدية المستخدمة في أحواض الترشيح كفاءة عالية في إزالة الفوسفور من مياه الصرف الصحي.

- وتوصل الباحثون في النهاية إلى أنه يمكن أن تكون نفايات الإطارات بديلاً صديقًا للبيئة كمواد داعمة في محطات النباتات، وذلك من خلال النتائج العملية. ويمكن تفسير الكفاءة العالية لإزالة الفسفور (65٪) إلى وجود المعادن، وتحديداً الحديد من الأسلاك المكشوفة ضمن رقائق نفايات الإطارات المطاطية. يمكن أن يتفاعل أي فوسفور موجود في مياه الصرف الصحي مع الحديد مما ينتج عنه مركبات فسفور غير قابلة للانحلال. وفي نهاية البحث أوصى الباحثون بأنه ستكون التطبيقات المبكرة لرقائق الإطارات المقطعة المعاد تدويرها في الأراضي الرطبة المبنية بمثابة نقطة الأساس الأولية للتحسين والتكرير وتطوير أجيال مستقبلية أفضل لمعالجة مياه الصرف الصحي.

- دراسة (Derakhshan،Ghaneian، Mahvi، Oleveri Conti، Faramarzian ، Dehghani،Ferrante) في إيران عام 2017، بعنوان (A new recycling technique for the waste tires reuse)، وهي عبارة عن سلسلة من التجارب العملية، تم فيها استخدام نموذج تجريبي لدراسة حركية استهلاك الركيزة في الأغشية الحيوية باستخدام نفايات الإطارات (خيوط البوليامايد) كوسيط ضمن محطات المعالجة بالنباتات. حيث تم تقييم جدوى استخدام حوامل الأغشية

الحيوية ذات الطبقة الثابتة المصنعة من إطارات النفايات لمعالجة مياه الصرف الصحي. وتم تسجيل نتائج تدل على زيادة كفاءة المعالجة وإنتاج حمأة أقل. وتشير نتائج هذه الدراسة إلى جدوى استخدام الحامل المطاطي من نفايات الإطارات لدعم النشاط البيولوجي لمجموعة متنوعة من تطبيقات معالجة مياه الصرف الصحي حيث أبدت إمكانات عالية وأداء أفضل مثل إزالة CODو TSSوترسيب حمأة أقل وجودة أفضل للمياه الناتجة.

- دراسة (Po-، Chien-JungLin، Delia-B.Senoro،Jih-MingChayan I-MingChen،JaiChen) في تايوان عام 2019، بعنوان (A novel biofilm carrier for pollutant removal in a constructed wetland based on waste rubber tire chips)، ركزت على الإطارات المطاطية كمادة تشكل تهديداً خطيراً لحماية البيئة، وكخطوة لإعادة تدويرها تم تقديم رقائق الإطارات المطاطية كوسائط جديدة وناقل حيوي للتدفق تحت السطحي للأراضي الرطبة، والتي يتم دمجها مع سطح الماء الحر لتشكيل نظام تجريبي هجين. حيث أعطت المقارنة بين مادة الحصى التقليدية والرقائق المطاطية نتائج جيدة بالنسبة للمادة البديلة ونجاح استخدامها، حيث وبسبب بعض الأسلاك المعدنية الموجودة ضمن الرقائق، يتم إطلاق أيونات الحديد بشكل طبيعي في أحواض المعالجة.

- دراسة (Courtney ، Amanda Richter، Richard Weaver،Bruce Lesikar O'Neill) في ولاية تكساس في الولايات المتحدة الأمريكية في عام 2019، بعنوان (A new recycling technique for the waste tires reuse Constructed wetland media)،

حول معالجة المياه العادمة المنزلية بشكل فعال، يمكن أن تحتوي أنظمة الأراضي الرطبة المصممة بالتدفق تحت السطحي على الأنواع الصحيحة من الوسائط، مثل الرمل والحصى وقطع نفايات الإطارات، ويجب تكوين الوسائط بصورة صحيحة، كما أنه يجب صيانة المادة المالئة بانتظام. حيث قاموا بتحديد العمليات التي تتم خلال عملية المعالجة (الترشيح، الترسيب، النترجة، نزع النتروجين، الامتزاز، إضافة إلى تثبيت النباتات ودعم نموها). كما حدد الباحثون الأحجام المثالية لقطع المطاط حيث يؤثر حجم جسيمات الوسائط بشكل كبير على قدرة النظام على العمل، حيث أن القطع الصغيرة تؤمن سطح أكبر تعيش عليه الكائنات الحية الدقيقة التي تتغذى على ملوثات مياه الصرف الصحي، لكن بنفس الوقت فإن القطع الصغيرة جداً أكثر عرضة للانسداد. كما وضعوا معايير اختيار نوع الركيزة ضمن أحواض المعالجة بالنباتات (المسامية، الاستقرار، حجم الوسائط، مساحة السطح، الجمالية). كما وضعوا تعليمات خاصة للمحافظة على نظام الأراضي الرطبة الذي تم إنشاؤه كي يعمل بشكل صحيح، حيث أكدوا على ضرورة صيانة جميع المكونات في النظام.

- بحث (Michigan،St. Joseph) في الولايات المتحدة الأمريكية عام 2013.بعنوان (PHOSPHORUS REDUCTION IN EFFLUENT FROM SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS FILLED WITH TIRE CHIPS) ، تم نشره مؤخراً مع حلول العام الحالي 2021 بواسطة الجمعية الأمريكية للمهندسين الزراعيين والبيولوجيين (ASABE) وعلى الموقع (www.asabe.org) ، ركز الباحثان على أهمية الأراضي الرطبة التي تم إنشاؤها بالتدفق تحت السطحي (SFCWs) لمعالجة مياه الصرف الصحي في الموقع. ورغم أن الحصى هو

النوع الأكثر شيوعاً كوسط مرشح في الأراضي الرطبة، لكن الوفرة المفرطة لنفايات الإطارات جعلتها مبرراً لاستخداماتها كوسائط بديلة وفعالة. حيث تمتاز الإطارات المطاطية المتكسرة بأنها أقل كثافة وأقل تكلفة من وسط الحصى. وقد ركزت هذه الدراسة على قدرة الوسط الممتلئ بقطع الإطارات المطاطية على إزالة محتوى الفوسفور من مياه الصرف الصحي. وقد لوحظ انخفاض أكبر في الفوسفور في الأراضي الرطبة المليئة برقاقات الإطارات لأن الحديد من الأسلاك المكشوفة في الإطارات الفولاذية الممزقة اتحد مع الفوسفور المتواجد في مياه الصرف الصحي لتكوين مركبات من الفوسفور غير قابل للانحلال. وبذلك تكون رقائق الإطارات مادة مالئة أفضل من الحصى بسبب المسامية العالية، والتكلفة المنخفضة، والتقليل الأكبر من الفوسفور في المياه الناتجة.

2.3. المحور الثاني: تأثيرات نوع النبات ومادة الفلتر في محطات المعالجة بالنباتات (الأراضي الرطبة الصنعية) على كفاءة المعالجة وإنتاج نباتات الزينة فيها:

- دراسة الدكتورة غادة بلال، جامعة دمشق (عام 2013) بعنوان (التحكم بتراكيز المغذيات في مياه الصرف الصحي باستخدام النباتات المحلية كمعالجة ثالثية)، والتي هدفت إلى معالجة مياه الصرف الصحي الناتجة عن محطات المعالجة التقليدية بطريقة المعالجة بالنباتات المائية المحلية، كنظام جيد للتحكم وتخفيض الملوثات بديلاً عن محطات المعالجة الثالثية التقليدية لمياه الصرف الصحي. وقد اعتمدت الباحثة على إنشاء محطة معالجة تجريبية بالنباتات كمرحلة معالجة ثالثية، تعتمد على استخدام ثلاثة أنواع من النباتات المحلية في إزالة أو تخفيض تركيز النتروجين والفوسفور (الزَّل، التيفا، البتيموس) بزراعتها في ثلاثة أحواض مستقلة كمرحلة أولى، ثم زراعة نبات عدس النهر

في حوضين إضافيين كمرحلة ثانية، ومن المفترض أن تتحول المياه بعد المعالجة إلى مياه صالحة للري.

- وكان من أبرز نتائجها أن التحكم بتراكيز الملوثات في المياه المعالجة يتطلب التحكم بالتحميل السطحي الهيدروليكي، ونسب تدوير المياه المعالجة، وكذلك نوع النبات المستخدم ضمن الأحواض، حيث أعطى نبات قصب الزَّل نتائج جيدة في إزالة الملوثات مقارنة مع غيره من النباتات إلا فيما يخص إزالة الفوسفور فقد لوحظ انخفاض مردود الإزالة في كافة الأحواض، وأوصت الباحثة بضرورة إجراء أبحاث لاحقة فيما يخص رفع نسبة إزالة الفوسفور، كما أوصت بأن تتم أبحاث جديدة على محطات المعالجة بالنباتات ضمن بلدنا سوريا وبما يتناسب مع ظروفه.

- دراسة (Shubiao Wu، Peter Kuschk، Hans Brix، Jan Vymazal ، Renjie Dong) في الدانمارك عام 2014، بعنوان (Alternative to gravel stones for filter media of Constructed Wetland)، تناولت موضوع تحسين الأراضي الرطبة الصنعية في الدانمارك. حيث قاموا بدراسة بديل لأحجار الحصى كوسيط ترشيح تقليدي للأراضي الرطبة الصنعية مثل نشارة الخشب العضوية أو خليط من نشارة الخشب والحصى. وتوصل الباحثون إلى عدة نتائج كان من أهمها أن تطوير طبيعة وسط الترشيح بمواد محلية يساهم في تحسين كفاءة الأحواض لإزالة الملوثات في الأراضي الرطبة ذات التدفق الشاقولي، بينما في الأحواض ذات التدفق الأفقي فإن الحصى التقليدي يبدو أكثر فاعلية.

- دراسة د. العابد ابراهيم، الجزائر (عام 2015) بعنوان (معالجة مياه الصرف الصحي لمنطقة تقرت بواسطة نباتات منقية محلية)، تناولت موضوع قدرة النباتات (Typha latifolia، Juncus effuses، (Cyperus papyrus على تنقية مياه الصرف الصحي.

- أظهرت النتائج أن نسبة النشاط تختلف من نبات لآخر، كما أن نبات Typha latifolia له فعالية كبيرة في المعالجة، ويعتبر نبات ذو نشاط ملحوظ والأكثر نمواً واستقراراً حيث أعطت نتائج أحسن من حيث أدائها وقدرتها على إزالة المواد العضوية والفوسفور، ثم يليها نبات Juncus effuses ثم Cyperus papyrus، ولا يوجد فرق في إزالة النتريت والنترات والبكتريا بالنسبة لأنواع لنباتات الثلاثة. وفيما يخص الوسائط الفيزيائية والبيكترولوجية، فقد كانت قدرة التنقية بالأحواض المغروسة بالنباتات أعلى منها في الأحواض غير المغروسة (الشاهد).

- دراسة (Raquel ، Vânia S.Bessa،Cristina S.C.Calheiros، Paula M.L.Castro، António O.S.S.Rangel، HansBrix،B.R.Mesquita) في البرتغال عام 2015، بعنوان (Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility)، تم فيها إنشاء نظام للتدفق تحت السطحي الأفقي في بيت ضيافة يقع في منطقة ريفية وجبلية في البرتغال. كانت ركيزة السرير عبارة عن ركيزة طينية، وتم زراعة من نباتات زينة مزهرة متعددة وهي (Canna flaccida وZantedeschia aethiopica وCanna indica وAgapanthus africanus و Watsonia borbonica). تم تسجيل كفاءة إزالة BOD وCOD عالية بشكل عام (> 90 ٪)

ومستقلة عن ظروف التحميل. كما قام النظام أيضًا بتقليل (PO_4^{3-} حتى 92٪)، (NH_4^+ حتى 84٪) والبكتيريا القولونية الكلية (حتى 99٪). حيث تفوق نبات A. africanus نسبياً على بقية النباتات. تم إثبات أن أنظمة محطات المعالجة بالنباتات المزروعة بأنواع مختلفة من نباتات الزينة، بالإضافة إلى وظيفة معالجة المياه، تمتلك العديد من الفوائد الإضافية بما في ذلك الجماليات وتعزيز التنوع البيولوجي.

- دراسة (Gregorio ، J. Luis Marín-Muñíz، Luis Sandoval،Sergio Zamora and M. Graciela Hernández-Orduña،Fernández-Lambert) في المكسيك عام 2015، بعنوان (Impact of Ornamental Vegetation Type and Di erent Substrate Layers on Pollutant Removal in ConstructedWetland Mesocosms Treating Rural Community Wastewater) قامت بإجراء مقارنة اثنين من نباتات الزينة (Spathiphyllum wallisii و Hedychium corarium) مزروعة في وحدات تجريبية مليئة بطبقات من الصخور النهرية المسامية والتربة، أو في وحدات من طبقات الصخور النهرية المسامية، دون وجود التربة. أظهرت الدراسة أن كلا النوعين من النبات مناسبين للاستخدام في محطات المعالجة بالنباتات، من حيث وظائفها كمعالجة نباتية ومزايا جمالية يمكن أن تولد اهتماماً بمعالجة مياه الصرف الصحي في المجتمعات الريفية والمتنزهات والمدارس أو في الأبنية السكنية كأحواض زهور في الفناء الخارجي.

- دراسة (Renato ، Serena Doni، Eleonora Peruzzi،Cristina Macci Grazia Masciandaro،Iannelli) في إيطاليا عام 2015، بعنوان (Ornamental plants for micropollutant removal in wetland systems) هدفت إلى تقييم كفاءة إزالة الملوثات الدقيقة مثل النحاس والزنك وسلفونات الكيل بنزين من مياه الصرف الصناعي، من خلال استخدام نظام الأراضي الرطبة ذات التدفق الشاقولي تحت السطحي مع نباتات الزينة (Zantedeschia aethiopica و Canna indica و Carex hirta و Miscanthus sinensisو Phragmites australis)، وزُرعت في أحواض مملوءة بالحصى. انخفضت العناصر الغذائية (N و P) والمعادن الثقيلة بشكل كبير بسبب كل من نشاط النبات والامتصاص. أظهر كل من C. indicaو P. australis أعلى محتوى معادن في أنسجتهما بينما كان نبات Z.aethiopica هو النبات الأقل كفاءة في إزالة المركبات العضوية والمعدنية.

- دراسة د. ابراهيم عمر سعيد، جامعة تكريت العراقية (عام 2017) بعنوان (مسح ميداني للنباتات المائية النامية في مياه المجاري واستخدامها في معالجة التلوث)، أجريت هذه الدراسة في كليتي البيئة والتربية في جامعتي الموصل وتكريت وتضمنت مسح ميداني لتقدير بعض الصفات الفيزيائية والكيميائية للمياه وكذلك تقدير بعض العناصر الثقيلة لبعض النباتات المائية إضافة إلى إجراء تجارب مختبرية لمعالجة مياه المجاري باستخدام نباتي عدس الماء والسعد.

- أشارت نتائج الدراسة إلى ارتفاع قيم الصفات الفيزيائية والكيميائية في حين ارتفعت قيم هذه العناصر بشكل كبير في مواقع مياه المجاري مقارنة بمواقع مياه نهر دجلة، وسجلت قيم عالية

للعناصر الثقيلة في مواقع مياه الآبار. كما تبين من نتائج الدراسة أن التراكم الحيوي للعناصر الثقيلة في نبات القصب أعلى من نبات البردي، كما أظهرت نتائج الدراسة المختبرية لتجارب المعالجة بنبات عدس الماء أن له القابلية على سحب العناصر الثقيلة من الوسط الذي يعيش فيه وتجميعه في داخله، وبالتالي انخفاض تراكيزها في المياه المعالجة. تم التوصل إلى أنه لنوع النبات المستخدم في محطات النباتات تأثير على كفاءة إزالة الملوثات.

- دراسة (Daniela ، Gloria Gómez، Romina Núñez،Ana María Leiva Gladys Vidal،López) في تشيلي عام 2018، بعنوان (Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater)، كان الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثير نباتين من نباتات الزينة (Cyperusو (Zantedeschia aethiopica في أحواض ذات تدفق أفقي تحت سطحي لمعالجة مياه الصرف الصحي. كانت كفاءة إزالة المواد العضوية والمواد الصلبة العالقة والمغذيات ومسببات الأمراض خلال سنوات التشغيل أعلى من 60٪ و 90٪ و 10٪ و 1.8 سجل على التوالي، دون فروق ذات دلالة إحصائية بين النوعين من النبات. وتم استنتاج أن زراعة الأحواض بنوعي النبات معاً كانت بديلاً جيداً من حيث كفاءة المعالجة إضافة لفوائد أخرى، مثل تحسين المنظر العام.

- دراسة (María ، Josè Luis Marín-Muñiz،Luis Carlos Sandoval-Herazo and Antonio Janoary Aleman-Chang،Graciela Hernández y Orduñas) في

المكسيك عام 2018، بعنوان (Role of wetland plants and use of ornamental 3 flowering plants in constructed wetlands for 4 wastewater treatment).

- ودراسة (Carlos Nakase-، J. Luis Marín-Muñíz،Sergio Zamora Luis Sandoval، Gregorio Fernández-Lambert،Rodríguez) في المكسيك عام 2019، بعنوان (Wastewater Treatment by Constructed Wetland Eco-Technology: Influence of Mineral and Plastic Materials as Filter Media and Tropical Ornamental Plants).

- ودراسة (Gregorio، J. Luis Marín-Muñíz، Luis Sandoval،Sergio Zamora M. Graciela Hernández-Orduña،Fernández-Lambert) في المكسيك عام 2019، بعنوان (Impact of Ornamental Vegetation Type and Different Substrate Layers on Pollutant Removal in Constructed Wetland Mesocosms Treating Rural Community Wastewater).

- ودراسة (Alejandro Alvarado-Lassman،Luis Carlos Sandoval-Herazo ، Alberto A. Aguilar-، Albino Martínez-Sibaja،María Cristina López-Méndez José Luis Marín-Muñiz، Sergio Zamora-Castro،Lasserre) في المكسيك عام 2020، بعنوان (Effects of Ornamental Plant Density and Mineral/Plastic Media

on the Removal of Domestic Wastewater Pollutants by Home Wetlands (Technology).

- ركزت الدراسات الأربعة السابقة على اختبار عدة أنواع من نباتات الزينة ومن أجل فلاتر مختلفة. تم التوصل إلى أن استخدام نباتات الزينة المزهرة في محطات النباتات خياراً ممتازاً، ويجب بذل الجهود لتحقيق ذلك زيادة اعتماد هذه الأنواع من الأنظمة واستخدامها في المناطق السكنية والريفية والحضرية.

- دراسة (A.Deligianni،D.Kotsia، N.M.Fyllas، A.S.Stasinakis، M.S.Fountoulakis) في اليونان عام 2020، بعنوان (Converting treatment wetlands into “treatment gardens”: Use of ornamental plants for greywater treatment)، قامت باستخدام نباتات الزينة (Pittosporum tobira، (Hedera helix كغطاء نباتي للأراضي الرطبة ذات التدفق الشاقولي لمعالجة المياه الرمادية، بهدف تحسين المنظر الجمالي. تظهر النتائج أن كلا النوعين من النبات Pittosporum tobira و Hedera helix يمكن أن ينمو في أحوض النباتات الشاقولية التي تعمل بالمياه الرمادية دون أي أعراض مرئية. تتحمل هذه الأنواع ظروف الجفاف والفيضانات، مما يجعلها مثالية للاستخدام ليس فقط في المباني السكنية ولكن أيضًا في الفنادق الموسمية والمنازل المخصصة لقضاء أيام العطل. لوحظ انخفاض نسبة الفوسفور تدريجياً من 100٪ خلال الأشهر الأولى من العملية إلى 15٪ خلال السنة الثانية من التشغيل. بالإضافة إلى ذلك، انخفض تركيز القولونيات الكلي بمقدار 2.2 وحدة لوغاريتمية في مياه الصرف في جميع

الأنظمة المزروعة، بينما لوحظ انخفاض كفاءة الإزالة في حالة عدم وجود نباتات. بشكل عام، توفر "حدائق المعالجة" المقترحة في هذه الدراسة حلاً عملياً تقنياً واقتصادياً لمعالجة المياه الرمادية، مع فائدة إضافية تتمثل في تحسين جمالية المناطق الحضرية وشبه الحضرية والسياحية.

توجهت الدراسات السابقة إلى تطبيق مكونات البحث من خلال نموذج عملي مصغر يحقق اشتراطات الأكواد العالمية والمحلية، حيث تم إعادة استخدام نفايات الإطارات المطاطية كمادة مالئة إلى جانب الحصويات، وإجراء المقارنة الفنية والاقتصادية والبيئية فيما بينهما.

4. المواد وطرائق البحث

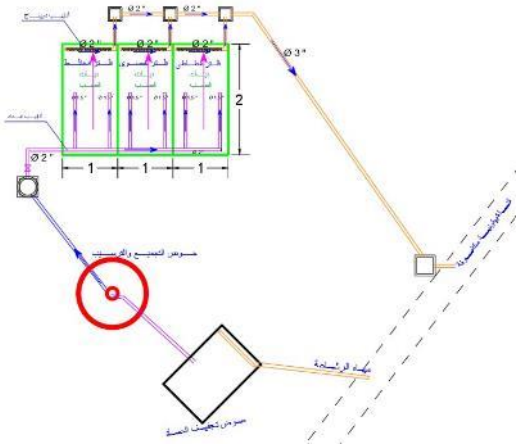
1.4. تصميم المحطة التجريبية:

لقد تم تصميم المحطة التجريبية لمعالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات وتنفيذها ضمن حرم كلية الزراعة بجامعة دمشق لتطبيق خطة البحث المقترحة عليها وقد صُممت هذه المحطة وفقاً لبارامترات التصميم الواردة في الكود الألماني ATV–DVWK– 262. حيث أن معالجة المياه فيها تتم وفق مرحلتين أساسيتين:

المرحلة الأولى: المعالجة الأولية لمياه الصرف وتشمل خزان التجميع والترسيب.

المرحلة الثانية: المعالجة الثانوية لمياه الصرف وتشمل الأحواض الثلاثة للمعالجة بنبات القصب على التوازي.

يبين الشكل (1) المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية.



الشكل (1): الخط التكنولوجي للمحطة التجريبية.

وتتألف المحطة التجريبية من المنشآت التالية:

1.1.4.مضخة المياه الأولية إلى خزان التجميع والترسيب:

تم وضع هذه المضخة في ريكار الصرف الصحي بداخل برميل ارتفاعه cm55، تم تزويده بشقوق طولية على محيطه الخارجي (كل شق طوله cm10 وعرضه mm5) كما يغطى البرميل بشبك معدني فتحاته mm5، لمنع دخول المواد العالقة كبيرة الحجم الموجودة في مياه النهر وذلك من أجل تخفيض حمل التلوث في منشأة المعالجة اللاحقة.

يتم ضخ المياه إلى خزان التجميع والترسيب بواسطة أنبوب الضخ المستخدم من مادة البولي إيتلين (PE).

2.1.4.خزان التجميع والترسيب الأولي:

سعة الخزان $1/m^3/$ مصنوع من مادة الـ PVC، يتم فيه التخلص من الندف الموجودة في المياه كما يتم التخلص من الأجسام الحبيبية ذات الأقطار الصغيرة. يتراوح زمن المكث في الخزان بين (2-1)

hour يتم فيها فصل الحمأة عن المياه والتي تتجمع في قاع الخزان حيث يتم سحبها إلى حوض تجفيف الحمأة بواسطة انبوب من البولي إيتيلين مزود بسكر بلاستيك.

يتم ضخ المياه بالإسالة من خزان التجميع والترسيب إلى خزان التوزيع الرئيسي عن طريق تامين فرق منسوب بميل 1% وبواسطة انبوب من البولي إيتيلين (PE) مزود بسكر بلاستيك عند مخرج خزان التجميع والترسيب.

3.1.4.حوض تجفيف الحمأة:

حوض أسمنتي بأبعاد m(1*2) وبعمق 0.4m، تم وضع طبقة من الرمل في أرضية الحوض بسماكة cm5 لحماية طبقة العزل، ثم وضعت الطبقة العازلة على أرضية وجوانب الحوض لمنع تسرب الرشاحة، بعدها تم تثبيت أنابيب دريناج فوق طبقة العزل وجمعها في مجمع يتم تصريفه إلى قناة بيتونية مجاورة للحوض.



الشكل (2): حوض تجفيف الحمأة.

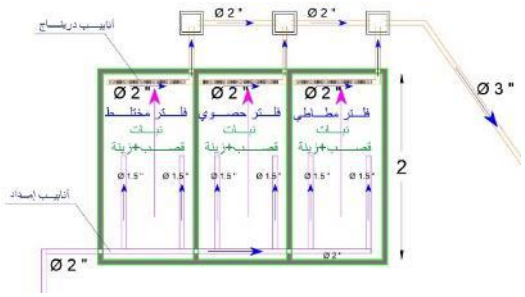
4.1.4. خزان توزيع المياه الرئيسي إلى أحواض المعالجة بالنباتات:

سعة الخزان $0.1m^3$ مصنوع من البلاستيك، يغذي كل حوض من أحواض النباتات اللاحقة عبر الضخ بالإسالة عن طريق تامين فرق منسوب بميل 1% وبواسطة أنبوبين من البولي إيتيلين، يتم

تركيب سكورة بلاستيكية على أنابيب تغذية الأحواض عند مخرج خزان التوزيع للتحكم بالغزارة الداخلة إلى أحواض النباتات وقياسها.

5.1.4.أحواض المعالجة بالنباتات:

يبين الشكل (3) أحواض المعالجة بالنباتات الثلاثة وفقاً لتوضعها ونوع مادة الفلتر في كل منها وآلية دخول وخروج المياه منها.



الشكل (3): أحواض المعالجة بالنباتات.

حيث اعتمد في حساب حقول النباتات:

- على التحميل الهيدروليكي الوارد في الكود المذكور $\leq 6l/m^2.min$
- الفترة الزمنية بين تحميلين متتاليين $\leq 2-6hour$.
- تحسب مساحة مقطع الحوض من العلاقة:

$$A=Q/24*v$$

A: مساحة مقطع المفاعل (m^2).

Q: تدفق المياه الخام (m^3/d).

v: سرعة التدفق الشاقولية في المفاعل (m/h).

اعتماداً على هذه البارامترات، تم اختيار مساحة m (1*2) وعمق 0.75m ، وميل 1% لكل حوض من الأحواض الثلاثة، التي زُرعت بنبات القصب وبثلاثة أنواع مختلفة للمادة المالئة (الأول بمادة مالئة مطاطية، والثاني بمادة مالئة حصوية، والثالث بمادة مالئة مختلطة حصوية–مطاطية)، وفقاً لذلك بلغت الغزارة الداخلة إلى المحطة $6m^3/h$ أي $2m^3/h$ لكل حوض (خلال ساعة واحدة هي فترة تحميل الأحواض بالمياه)، ليكون زمن الترشيح بين تحميلين متتاليين هو 2 ساعة، علماً أن هذه الغزارة تم سحبها من خزان التوزيع الرئيسي الذي يسبق الأحواض مباشرة.

وبالنسبة للمادة المالئة (الفلتر) فهي كمايلي:

1- الحوض ذو الفلتر الحصوي:

تم تنفيذ فلتر المعالجة بثلاثة طبقات على التوالي من الأسفل إلى الأعلى، بداية طبقة من الحصى بسماكة (15cm) وتدرج حبي mm (25–10)، ثم طبقة من رمل المازار بسماكة (50cm) وتدرج حبي حتى (mm0.4)، وأخيراً طبقة من الحصى بسماكة 10cm وتدرج حبي mm (25–10)، ليكون ارتفاع الحوض(0.75 m).



الشكل (4): الحوض ذو الفلتر الحصوي.

2- الحوض ذو الفلتر المطاطي: تم تنفيذ فلتر المعالجة من طبقة من قطع نفايات الإطارات المطاطية بأبعاد cm (0.8-2)، وبارتفاع للحوض (0.75 m).



الشكل (5): الحوض ذو الفلتر المطاطي.

3- الحوض ذو الفلتر المختلط: تم تنفيذ فلتر المعالجة بثلاثة طبقات على التوالي من الأسفل إلى الأعلى، بداية طبقة من الحصى بسماكة (15cm) وتدرج حبي (10-25mm)، ثم طبقة من رمل المازار بسماكة (10cm) وتدرج حبي حتى (0.4mm)، وطبقة من الخليط المطاطي والحصوي بتدرج حبي (10-25mm)، ليكون ارتفاع الحوض (0.75 m).



الشكل (6): الحوض ذو الفلتر المختلط.

6.1.4.غرف التفتيش بعد أحواض النباتات:

مصنوعة من البلاستيك بسعة $0.02m^3$، يتم عبرها تحويل المياه الراشحة من أحواض النباتات إلى قناة التجميع النهائي للمياه المعالجة بالإسالة عبر فتح السدات الموجودة ضمنها. وذلك عن طريق تامين فرق منسوب بميل 2% وعبر انابيب مصنوعة من مادة الـ PVC.



الشكل (7): غرفة التفتيش في المحطة التجريبية.

7.1.4.شبكة التصريف بعد أحواض النباتات:

قساطل مادة الـ PVC قطر 3 إنش تجمع المياه من الريكارات إلى قناة بيتونية مكشوفة تنتهي بشبكة الصرف العامة.

8.1.4.التجهيزات الكهربائية والميكانيكية في المحطة:

تم تجهيز المحطة التجريبية بالتجهيزات التالية:

- مضخة تؤمن ضخ مياه المجاري من ريكار الشبكة العامة إلى خزان التجميع والترسيب باستطاعة 200l/min.
- قاطع كهرباء مزدوج 32 امبير يؤمن تشغيل المضخة يدوياً كون عمل المحطة متقطع.

2.4. نوع النبات: سيتم اعتماد نبات القصب الذي يناسب الظروف المناخية لبلدنا، كما يعتبر النبات التقليدي المستخدم في الأراضي الرطبة الصنعية.



الشكل (8): نبات القصب.

ويوضح الشكل (9) محطة المعالجة التجريبية بالنباتات بوضعها النهائي بعد التنفيذ وزراعة نبات القصب للبدء بتنميته ضمن الأحواض.



الشكل (9): المحطة التجريبية بالنباتات.

5. النتائج

تتضمن الدراسة التجريبية العملية، وتتمثل في:

1.5. خطة الاعتيان:

تم تحديد الملوثات المراد تحديد تراكيزها، ومراقبة تغيراتها ضمن المياه. وتحديد البارامترات اللازمة: ($COD, BOD_5, TSS, NH_4^+, NO_3^-, Po_4^{-3}$).

2.5. تشغيل المحطة وتوثيق النتائج:

تم اعتماد نباتات القصب ضمن ثلاثة أحواض من المواد المالئة: المادة المالئة الحصوية، المادة المالئة المطاطية، المادة المالئة المختلطة. ومن ثم مقارنة البدائل السابقة لاختيار البديل الأفضل فنياً واقتصادياً.

تم قياس المسامية ومؤشرات التلوث وتسجيل النتائج التالية:

الجدول (1) – قيم المسامية لأنواع المواد المالئة المستخدمة

	المادة المالئة الحصوية		المادة المالئة المطاطية		المادة المالئة المختلطة	
اليوم	المسامية	نسبة انخفاض المسامية	المسامية	نسبة انخفاض المسامية	المسامية	نسبة انخفاض المسامية

0.00%	**0.327**	0.00%	**0.370**	0.00%	**0.277**	1
1.02%	0.323	0.90%	0.367	1.20%	0.273	15
3.06%	0.317	1.80%	0.363	3.61%	0.267	30
8.16%	0.300	5.41%	0.350	14.46%	0.237	50
12.24%	0.287	8.11%	0.340	20.48%	0.220	85
19.39%	0.263	14.41%	0.317	30.12%	0.193	113
23.47%	0.250	17.12%	0.307	33.73%	0.183	176
24.49%	0.247	19.82%	0.297	39.76%	0.167	239
24.49%	**0.247**	**19.82%**	**0.297**	**39.76%**	**0.167**	275

الجدول (2) – قيم TSS لأنواع المواد المالئة المستخدمة

المادة المالئة المختلطة		المادة المالئة المطاطية		المادة المالئة الحصوية		TSS in	اليوم
نسبة إزالة TSS	TSS out	نسبة إزالة TSS	TSS out	نسبة إزالة TSS	TSS out	(الترسيب بعد)	
20%	136	15%	143	28%	122	169	1
36%	103	32%	110	41%	95	161	15
44%	93	38%	103	47%	88	166	30
47%	81	40%	92	49%	79	153	50
49%	79	44%	87	50%	77	154	85
54%	69	50%	74	55%	67	149	113
62%	59	57%	66	63%	58	155	176
69%	45	65%	50	67%	47	144	239
74%	37	**69%**	45	**74%**	37	145	275

الجدول (3) – قيم BOD_5 لأنواع المواد المالئة المستخدمة

المادة المالئة المختلطة		المادة المالئة المطاطية		المادة المالئة الحصوية		BOD in	اليوم
نسبة إزالة BOD	BOD out	نسبة إزالة BOD	BOD out	نسبة إزالة BOD	BOD out	(الترسيب بعد)	
34.7%	133	33.7%	135	34.7%	133	204	1
41.3%	116	41.8%	115	43.3%	112	198	15
43.0%	112	39.4%	119	44.5%	109	196	30
47.2%	103	43.1%	111	45.1%	107	195	50

59.5%	79	54.4%	89	57.4%	83	195	85
61.6%	74	56.4%	84	59.0%	79	193	113
65.9%	64	63.3%	69	63.3%	69	188	176
71.3%	52	67.4%	59	69.1%	56	181	239
79.5%	36	**73.9%**	46	**77.8%**	39	176	275

الجدول (4) – قيم COD لأنواع المواد المالئة المستخدمة

المادة المالئة المختلطة		المادة المالئة المطاطية		المادة المالئة الحصوية		COD in	اليوم
نسبة إزالة COD	COD out	نسبة إزالة COD	COD out	نسبة إزالة COD	COD out	(الترسيب بعد)	
30%	223	27%	232	25%	240	319	1
36%	204	30%	222	31%	218	317	15
43%	173	30%	211	37%	192	303	30
51%	147	42%	172	47%	159	299	50
54%	137	48%	153	50%	148	296	85
57%	125	52%	139	56%	126	289	113
66%	99	58%	122	60%	115	288	176
69%	88	63%	104	67%	93	282	239
74%	74	**67%**	93	**72%**	80	281	275

الجدول (5) – قيم NH4 لأنواع المواد المالئة المستخدمة

المادة المالئة المختلطة		المادة المالئة المطاطية		المادة المالئة الحصوية		NH4 in	اليوم
نسبة إزالة NH4	NH4 out	نسبة إزالة NH4	NH4 out	نسبة إزالة NH4	NH4 out	(الترسيب بعد)	
12%	53	16%	51	14%	52	60	1
22%	48	22%	48	17%	51	62	15
37%	40	34%	42	27%	46	63	30
43%	35	46%	33	44%	34	61	50
50%	30	52%	29	53%	28	60	85
56%	25	52%	27	57%	24	56	113
58%	23	53%	26	56%	24	55	176
62%	21	53%	26	60%	22	55	239
62%	20	**57%**	23	**62%**	20	53	275

الجدول (6) – قيم NO3 لأنواع المواد المالئة المستخدمة

اليوم	NO3 in (الترسيب بعد)	المادة المالئة الحصوية		المادة المالئة المطاطية		المادة المالئة المختلطة	
		NO3 out	نسبة إزالة NO3	NO3 out	نسبة إزالة NO3	NO3 out	نسبة إزالة NO3
1	58	48	17%	47	19%	48	17%
15	59	47	20%	47	20%	47	20%
30	55	41	25%	42	24%	41	25%
50	54	39	28%	39	28%	41	24%
85	55	35	36%	33	40%	36	35%
113	53	35	34%	33	38%	34	36%
176	51	34	33%	32	37%	34	33%
239	50	33	34%	31	38%	31	38%
275	50	31	**38%**	31	**38%**	28	**44%**

الجدول (7) – قيم PO4 لأنواع المواد المالئة المستخدمة

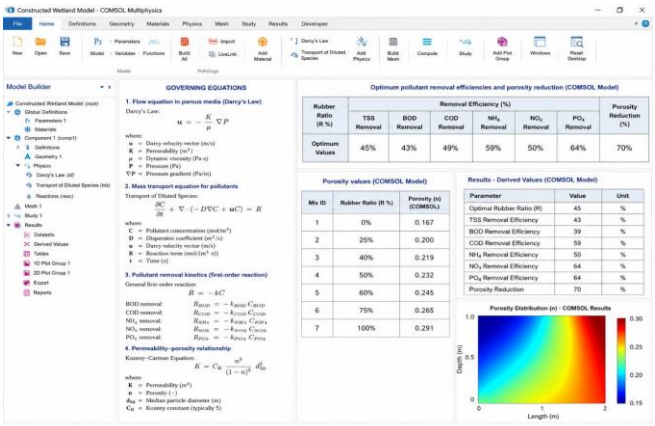
اليوم	PO4 in (الترسيب بعد)	المادة المالئة الحصوية		المادة المالئة المطاطية		المادة المالئة المختلطة	
		PO4 out	نسبة إزالة PO4	PO4 out	نسبة إزالة PO4	PO4 out	نسبة إزالة PO4
1	35	32	7%	31	10%	31	10%
15	34	30	13%	27	22%	27	22%
30	31	26	16%	24	23%	26	16%
50	30	25	18%	19	37%	21	31%
85	31	20	36%	17	45%	18	42%
113	29	19	35%	15	48%	16	45%
176	28	18	35%	12	57%	14	50%
239	27	18	33%	10	63%	13	51%
275	26	17	**36%**	9	**66%**	11	**58%**

3.5. تحليل النتائج ومناقشتها:

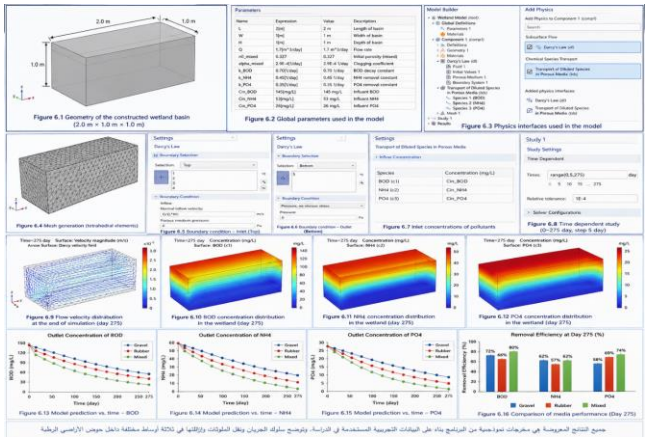
تضمنت تحليل النتائج ونمذجتها على برنامج COMSOL Multiphysics المعتمد على طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method, FEM) لمحاكاة انتقال المياه والملوثات داخل الأراضي الرطبة الصنعية ذات الجريان الشاقولي تحت السطحي، ودراسة تأثير نسب خلط مختلفة من الحصى ورقائق الإطارات المطاطية على الأداء الهيدروليكي وكفاءة إزالة الملوثات. ويتميز هذا البرنامج بما يلي:

- قدرته على محاكاة التداخل بين الجريان في الأوساط المسامية، انتقال الملوثات، التفاعلات الكيميائية، انتقال الحرارة والعمليات البيولوجية، ضمن نموذج موحد.
- يسمح بربط عدة ظواهر فيزيائية في الوقت نفسه، وهو ما يجعله مناسباً لدراسة أنظمة الأراضي الرطبة الصنعية.
- القدرة على نمذجة الأوساط المسامية، ويتيح COMSOL توصيف هذا النوع من الأوساط بدقة باستخدام معادلات دارسي.
- دمج انتقال الملوثات مع الجريان.
- يمكن للبرنامج حل معادلات الجريان، انتقال الكتلة والتفاعلات الحيوية، في وقت واحد.
- دراسة تأثير المسامية.
- يسمح البرنامج بإدخال المسامية، النفاذية والتدرج الحبي، كمتغيرات مستقلة.
- تحليل سيناريوهات متعددة.

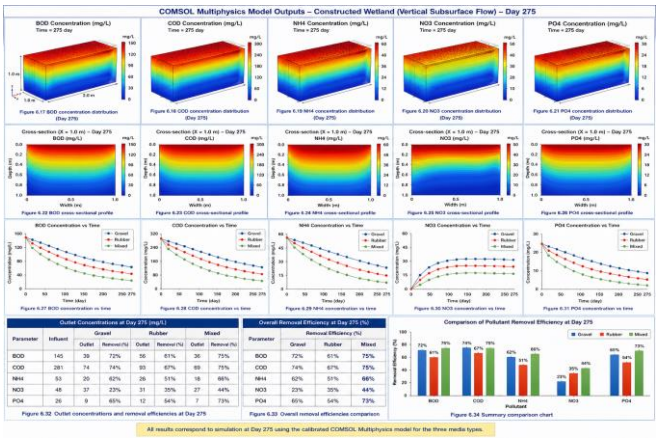
يوضح الشكل (10) المعطيات التصميمية ونتائج التحليل في نهاية النمذجة بينما يوضح الشكلين (11)، (12) النموذج الذي تم بناؤه مع آلية توزع وإزالة الملوثات ضمن النموذج.



الشكل (10): المعطيات التصميمة والنتائج ببرنامج COMSOL.



الشكل (11): بناء النموذج وتحليل البيانات ببرنامج COMSOL.



الشكل (12): نتائج تحليل البيانات ببرنامج COMSOL.

<u>أولاً</u> – من حيث كفاءة المعالجة وإزالة الملوثات: تم ملاحظة انخفاض ملوثات الصرف الصحي بين الأوساط الثلاثة بشكل متقارب إلى حد ما، بمرور الوقت ومع تراكم الأغشية الحيوية. فقد انخفضت مؤشرات التلوث BOD_5، COD، NH_4^+، NO_3^-، PO_4^{-3} لتصل نسب الإزالة في نهاية المرحلة الأولى إلى 80%، 74%، 62%، 44% على الترتيب.

حيث أبدت كل مادة مالئة جدواها في إزالة الملوثات بشكل منفصل وبنتائج متقاربة فيما عدا الفوسفور الذي تفوق الوسط المطاطي في إزالته عن الوسط الحصوي بسبب الأسلاك المعدنية المكشوفة التي تقوم بدور ايجابي هام في وسط المعالجة بالنباتات. وهنا يجب التركيز على نقطتين هامتين للمادة المختلطة البديلة:

1. تعزيز نمو الأغشية الحيوية: السطح المعدني الخشن ضمن المادة المطاطية يُوفِّر مساحات إضافية لالتصاق البكتيريا والأحياء الدقيقة، ما يزيد مساحة السطح المتاحة لنمو الأغشية الحيوية ويعوض الفارق بين السطح النوعي للحصويات والسطح النوعي للرقائق المطاطية وبالتالي المساهمة في تحسين المعالجة البيولوجية.

2. التحفيز على نزع الفوسفور: وجود الحديد داخل الوسط يمكن أن يؤدي إلى ترسيب الفوسفور على هيئة مركّبات مثل فوسفات الحديد ($FePO_4$) غير القابل للانحلال في الوسط المائي، ما يزيد من إزالة الفوسفور من المياه. وذلك وفق المعادلة الكيميائية:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+}+2e^- \qquad 4Fe^{2+}+O_2+4H^+ \rightarrow 4Fe^{3+}+2H_2O \qquad Fe^{+3}+ PO_4^{-3} \rightarrow FePO_4$$

ويتم طرح هذا المركب الناتج مع المياه بعد المعالجة ليقلل من تلوث الفوسفور في المسطحات المائية والتربة.

وقد أظهرت نتائج الموديل الرياضي COMSOL تحسن كفاءة الإزالة مع الزمن نتيجة تطور الأغشية الحيوية واستقرار الوسط، كما أظهر تفوق الوسط المختلط على الوسطين الحصوي والمطاطي في معظم المؤشرات.

ثانياً – من حيث مسامية الوسط والانسداد: أظهرت النتائج أن قيمة المسامية كانت الأكبر في الوسط المطاطي 0.297 يليه المختلط 0.247 فالحصوي 0.167 ، فبدمج الوسطين الحصوي والمطاطي، تم زيادة مسامية الوسط الحصوي بنسبة 48% مما يساعد في تخفيف الانسداد وفتح الممرات المائية التي تساعد على تأمين الكمية الضرورية من الأكسجين إلى الوسط بشكل أكبر مع الاستفادة من كل ما تملكه الحصى من مواصفات تساعدها لتكون وسط جيد لنمو الغشاء الحيوي وترسيب المواد العالقة، ويستدل من النتائج أن هذا الدمج يحسن المواصفات الهيدروليكية للوسط وبتخفيف الانسداد نكون قد زدنا من العمر التصميمي للمادة المالئة وبالتالي تحقيق فوائد اقتصادية إلى جانب الفوائد الفنية والتشغيلية.

وقد أكدت نتائج الموديل الرياضي COMSOL هذه النتيجة وأظهرت انخفاض المسامية تدريجياً مع الزمن بنسب متفاوتة كان أصغرها انخفاضاً في الحوض المطاطي.

وإضافة إلى التنبؤ بقيم مؤشرات التلوث ونسبة إزالتها فإن النموذج الرياضي يساعد في التنبؤ بالعمر التصميمي الجديد من خلال المعادلات الرياضية التي يتم إدخالها للنموذج بناء على تغير مسامية الوسط وجريان المياه فيه.

ثالثاً – من حيث نمو النبات:

أثبت الوسط المطاطي ضعف في تثبيت جذور النبات مقارنة بالوسط الحصوي وقد بدا ذلك واضحاً خلال تدفق المياه عبر طبقات المادة المالئة المطاطية حيث نرى قطع المطاط الطافية مؤكدة تخلخل وسط المعالجة بشكل ملحوظ، كما أنه لوحظ دخول الحيوانات (قطط وكلاب) إلى الحوض ونبشه بسهولة خلافاً للحوض الحصوي وكذلك المختلط.

وقد تم التغلب على ذلك بتثبيت جذور النبات بالحجارة أو الحصى كي لا تطفو وكي لا تتعرض للنبش من قبل الحيوانات، وسيتم في المرحلة الثانية من الدراسة مراقبة تصرف نباتات الزينة ذات الجذور القاسية والمتينة.

وهكذا نستنتج أن نتائج الموديل الرياضي COMSOL قد أظهرت توافقاً واضحاً مع الاتجاهات العامة التي تم تسجيلها تجريبياً، ففي الوقت الذي أظهرت فيه النتائج أن الوسط الحصوي يتميز بكفاءة عالية في إزالة المواد العالقة والعضوية نتيجة لفعالية الترشيح ونمو الأغشية الحيوية، تميز الوسط المطاطي بقدرته على تحسين انتقال الأوكسجين وتعزيز إزالة الفوسفور من خلال التفاعلات الكيميائية المرتبطة بالحديد.

وبالتالي فإن فعالية الوسط الخليط كانت الأفضل نتيجة التكامل بين خصائص الوسطين في إزالة ملوثات مياه الصرف الصحي العضوية والنترات والفوسفور كوسط متكامل، مما يوفر توازنًا مثالياً بين الكفاءة التشغيلية والاستقرار الهيدروليكي، ويجعله الخيار الأكثر ملاءمة لتطبيقات الأراضي الرطبة الصنعية.

6. الاستنتاجات والتوصيات:

إن استخدام نفايات الإطارات المطاطية كمادة مالئة في الأراضي الرطبة الصنعية يمكن أن يحقق عدة فوائد بيئية واقتصادية وهيدروليكية ضمن أحواض المعالجة بالنباتات وكذلك دعم الاستدامة. ويمكن تلخيص هذه الأهداف في النقاط الآتية:

- إعادة تدوير النفايات: إن التخلص من الإطارات المستعملة يشكل تحديًا بيئياً، فاستخدامها كمادة مالئة يسهم في تقليل تراكمها في مكبات النفايات ويخفف من الحاجة إلى طرق التخلص التقليدية مثل الحرق أو الطمر وما ينتج عنه من آثار بيئية سلبية وتلوث بصري.
- ديمومة الأراضي الرطبة وتفادي المشاكل التشغيلية: إن الإطارات المطاطية مادة قوية ومتينة وقادرة على مقاومة التحلل لفترات طويلة، مما يجعلها مناسبة كمواد بناء للأراضي الرطبة الصنعية، كما يمكن أن تحافظ على استقرار البنية التحتية وتقلل من الحاجة إلى الصيانة المتكررة خاصة فيما يتعلق بمشكلة الانسداد ضمن طبقات المادة المالئة بسبب الرواسب والملوثات الصلبة التي تترافق مع مياه الصرف الصحي.
- تحسين جودة معالجة المياه: إن الإطارات المطاطية المجزأة يمكن أن تعمل كمادة مالئة لتحسين معالجة مياه الصرف الصحي أو المياه الملوثة في الأراضي الرطبة الصنعية حيث بمرور المياه عبرها فإنها تساهم في تحسين ترشيح المواد العضوية والملوثات، خاصة وأن الأسلاك الحديدة الموجودة ضمن الإطارات تساهم بشكل كبير في إزالة الفوسفور كميزة جيدة في الأراضي الرطبة الصنعية التقليدية.
- إن دمج قطع نفايات الإطارات المطاطية مع نسبة من الحصى التقليدي يؤمن رفع مساحة السطح وتأمين تثبيت أكبر للجذور، ويساعد على تكوين الأغشية البكتيرية (الفيلم البيولوجي) مع تأمين المسارات المطلوبة للمياه بشكل أفضل. ومن الناحية التشغيلية، فإنه من الأفضل:
  - تقطيع الإطارات جيدًا إلى قطع بأحجام كافية لتأمين سطح نوعي جيد وبنفس الوقت تسمح بتصريف جيد للمياه بانسداد أقل.
  - تحديد النسب المثلى للخلط بين المادة المالئة الحصوية والمادة المالئة المطاطية (الكاوتشوك).

- مراقبة تراكم الصدأ أو تكوُّن المواد المترسبة، مما يتطلب وقتاً أطول.
- إجراء صيانة دورية للوسط المالئ، في خطة تشغيلية طويلة الأمد.
- إن مراقبة مسامية الوسط وتحديد العمر التصميمي للمادة البديلة يحتاج إلى وقت طويل يتعدى الفترة الزمنية للبحث.

- الكفاءة الاقتصادية: بالمقارنة مع المواد التقليدية الأخرى مثل الحصى أو الرمال، فإن استخدام نفايات الإطارات المطاطية يكون أقل تكلفة، خاصة إذا كان هناك وفرة منها في المناطق المحلية كما في بلدنا سوريا.
- ضرورة الاعتماد في هكذا أبحاث على منهجين متكاملين لتقييم أداء منظومة الأراضي الرطبة الصنعية ذات الجريان الشاقولي تحت السطحي، وهما:

أ- المنهج التجريبي من خلال تشغيل أحواض فعلية مملوءة بأوساط مختلفة (حصوي، مطاطي، مختلط) وقياس مؤشرات جودة المياه خلال فترة التشغيل.

ب- المنهج العددي باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics لمحاكاة حركة المياه وانتقال الملوثات والتفاعلات داخل الأحواض.

حيث قد أتاح الدمج بين العمل التجريبي والنمذجة العددية فهماً أعمق لسلوك النظام، حيث قدمت النتائج التجريبية القيم الفعلية للأداء، بينما ساعدت النمذجة العددية في تفسير الأسباب الهيدروليكية والبيولوجية والكيميائية التي تقف خلف تلك النتائج. كما عزز النقاط الآتية:

- عكست التجربة النتائج الواقعية، في حين فسرت النمذجة أسباب تلك النتائج.
- يساعدنا النموذج بالتنبؤ بالأداء المستقبلي.
- أمكن اختبار سيناريوهات مختلفة دون الحاجة لتجارب مكلفة ووقت كبير.

7. المراجع العلمية:

1- بلال، العجي، حداد، (2013). التحكم بتراكيز المغذيات في مياه الصرف الصحي باستخدام النباتات المحلية كمعالجة ثالثية. رسالة دكتوراه، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق .

2- تطبيقات نظم الذكاء الصنعي في حماية البيئة , الدكتور عادل عوض , منشورات وزارة الثقافة ,2007.

3 - الخفاجي، كاظم، رزاق (2014). استخدام نبات القصب في تنقية مياه الصرف الصحي في مدينة الناصرية، كلية العلوم، جامعة ذي قار، العراق.

4 - شاهين هيثم، حسيان علي، (2017) ، تقييم كفاءة الأراضي الرطبة المصطنعة لمعالجة مياه الصرف لأغراض الري في ظروف الساحل السوري . مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، المجلد /39/، العدد /6./

5 - العابد، لعجال، عبدالحفيظ، (2015). معالجة مياه الصرف الصحي لمنطقة تقرت بواسطة نباتات منقية محلية. رسالة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح، الجزائر.

6 - عبد الرزاق التركماني، (2008). محطات المعالجة بالنباتات، دليل تخطيط و تصميم و تنفيد محطات - . المعالجة بالنباتات، شبكة خبراء المياه السوريين.

7 - كال، روضة، (2024). دراسة تحليلية لمعالجة مياه الصرف الصحي في الأراضي الرطبة المصطنعة باستخدام النمذجة الحاسوبية.

8 - المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا/ مخبر البيئة/- د. أحمد محمد منير الفرا- م.عدنان اللادقاني، وغيرهم (2011)- نمذجة محطات معالجة مياه الصرف العاملة بطريقة الحماة المنشطة.

9- Wastewater Treatment in Constructed wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow, by Jan Vymazal & Lenka Kropfelova. Spain, 2008

10- Constructed wetlands for wastewater treatment. Fabio Masi, Italy 2006.

11- Kadlec R.H, Knight R.L Treatment Wetlands. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton 1996.

12- Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste USA (1991).

13- Krayzelova, L.; Lynn, T.J.; Banihani, Q.; Bartacek, J.; Jenicek, P.; Ergas, S.J. ,2014.

14- Sameanram, C. (2015). Modelling nitrogen removal by the vertical subsurface flow Planted with Typha angustifolia . phD.Thesis, Environmental Science , Faculty OF Science Burapha University.

15- Okhravi S., Eslamian S., Fathianpour N., (2017)- Assessing the effects of flow distribution on the internal hydraulic behavior of a constructed horizontal subsurface flow wetland using a numerical model and a tracer study. Ecohydrology & Hydrobiology, 17, 264–273

16- Wang R., Xu L., Cong X.(2021) . Simulation and optimization of hydraulic performance of small baffled subsurface flow constructed wetland. Water Science & Technology, 84(3),633-643.

17- COMSOL Multiphysics reference manual (2020). Version: COMSOL 5.6

18- Environment Agency.(2003). Guidance Manual for Constructed Wetlands.London.

19- Agency, U.S. Environmental Protection. (1999). Constructed Wetlands Treatment of Municipal wastewater, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio.

20- Sameanram, C. (2015). Modelling nitrogen removal by the vertical subsurface flow Planted with Typha angustifolia . phD.Thesis, Environmental Science , Faculty OF Science Burapha University.

21- Chang N., Xuan Z., Wanielista M. (2011). A tracer study for assessing the interactions between hydraulic retention time and transport processes in a wetland system for nutrient removal. Bioprocess Biosyst Eng. DOI 10.1007/s00449-011-0578-z.Springer.

22- Kadlec RH, Knight RL, Vymazal J, Brix H, Cooper P; R., Haberl. (2000). Constructed wetlands for pollution control:processes, performance, design and operation. IWA specialist group on use of macrophytes in water pollution control.London.

23- Rousseau, D., Vanrolleghem P., Pauw N., (2004). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review.Water Research.vol(38), 1484–1493.

24- Langergraber G., Dittmer U., Meyer D., (2005). Simulation of a subsurface vertical flow constructed wetland for CSO treatment. Water Science & Technology.vol(51),225-232.

25- Akratos C., Papaspyros J., Tsihrintzis V. (2008). An artificial neural network model and design equations for BOD and COD removal prediction in horizontal

subsurface flowconstructed wetlands. Chemical Engineering Journa.143(1).96-110.Elsevier.

26- KADLEC R., WALLACE S., (2009) Treatment wetlands. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group,2nd Ed, United States,1048.

27- Liwei F., Reti H., Wenxing W., Zexiang L., Zhiming Y., (2008). Application of computational fluid dynamic to model the hydraulic performance of subsurface flow wetlands. Environmental Sciences, 20(12), 1415–1422. Elsevier.

28- Samso C., (2014) Numerical modelling of Constructed Wetlands for wastewater treatment. PhD. Thesis. Environmental Engineering Department , Barcelona university .

29- Liolios K., Moutsopoulos K. , Tsihrintzis V.(2012). Modeling of flow and BOD fate in horizontal subsurface flow constructed wetlands. Chemical engineering journal.200(202).681-693. Elsevier.

30- Green M., Upton J., (1992). Constructed reed beds: A cost effective way to polish wastewater effluents for small communities. Water Environment Federation.

31- Okhravi S., Eslamian S., Fathianpour N., (2017)- Assessing the effects of flow distribution on the internal hydraulic behavior of a constructed horizontal subsurface flow wetland using a numerical model and a tracer study. Ecohydrology & Hydrobiology, 17, 264–273