مجلة جامعة حمص

سلسلة علوم الهندسة المدنية والمعمارية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 7

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
استخدام لقطات فيديو فائق الدقة لطائرة دون طيار في النمذجة ثلاثية الأبعاد للمباني	د. وسيم توفيق موسى	38-11
دراسة تأثير مادة الفلتر ونوع النبات على أداء الأراضي الرطبة الصنعية	شادي تقلا د.غادة بلال	66-39
دور حوامل المخلفات الزراعية داخل المفاعل اللاهوائي في تخفيض مساحة الأراضي الرطبة الصنعية باستخدام معادلة كلارك	عبد الرحمن المراد أ.د غادة بلال	118-67
التحليل الكهروبصري لتحسين زمن الاستجابة في شاشات الكريستال السائل باستخدام MATLAB	د. عصام غزولين	140-119
تقييم كفاءة قشور اللوز المنشطة كحوامل بيولوجية في نظام معالجة هجين لمياه الصرف الصحي	عبد الرحمن المراد أ.د غادة بلال	180-141

استخدام لقطات فيديو فائق الدقة لطائرة دون طيار في النمذجة ثلاثية الأبعاد للمباني

د.م. وسيم توفيق موسى*

الملخص

مع التطور التقني الحاصل في علوم المساحة التصويرية وأنظمة الاستشعار، ازدهر استخدام الطائرات دون طيار (UAVs) كمنصة للحصول على البيانات اليومية في العديد من التطبيقات مثل النمذجة ثلاثية الأبعاد. وذلك يعود لقدرة هذه المنصات على توفير بيانات صور وفيديو منخفضة التكلفة وسريعة ومحددة للمواقع المستهدفة. كما تسمح بتوليد غمامات نقطية ثلاثية الأبعاد ذات جودة ودقة متجانسة تقريباً، والتي بدورها توفر نظام بيانات مكاني متكامل عن موقع الدراسة.

تصف هذه المقالة منهجية للنمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على صور مقتطعة من تسجيلات فيديو فائق الدقة (UHD) من طائرة دون طيار بهدف استكشاف إمكانيات آلات تصوير الفيديو منخفضة التكاليف في حل مسألة النمذجة. تمّ اختبار المنهجية المقترحة باستخدام أحدث برامج المساحة التصويرية على حالة دراسية حقيقية مع توفر معلومات تحكم أرضية. كما أجري عرض وتقييم للنتائج لإثبات فعالية الطريقة المقدمة، إذ تمّ إنتاج نموذج ثلاثي الأبعاد بسوية دقة من مرتبة السنتيمتر.

الكلمات المفتاحية: النمذجة ثلاثية الأبعاد، طائرة دون طيار، لقطات فيديو، فائق الدقة، غمامة نقطية، تحكم أرضي.

* أستاذ مساعد – قسم الهندسة الطبوغرافية – كلية الهندسة المدنية – جامعة حمص – حمص – سورية.

Using UAV Ultra–High–Definition Video Footage in 3D Modeling of Buildings

Dr.Eng. Wassim Moussa*

Abstract

With the technical development in photogrammetry sciences and sensing systems, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) has flourished as a platform for daily data acquisition in many applications such as three-dimensional (3D) modeling. This is due to the ability of these platforms to provide low-cost, fast, and location-aware photo and video data for targeted sites. They also allow the generation of 3D point clouds of almost homogeneous quality and accuracy, which in turn provides an integrated spatial data system for the study site.

This paper describes a methodology for 3D modeling based on images extracted from UAV ultra-high-definition (UHD) video records to explore the potentials of low-cost video cameras in solving the modeling problem. The proposed methodology has been tested using the latest photogrammetric software on a real case study with the availability of ground control information. The results were also presented and evaluated to prove the effectiveness of the presented method, as a 3D model was produced with centimeter-level accuracy.

Key Words: 3D Modelling, UAV, Video Footage, UHD, Point Cloud, Ground Control.

* Associate Professor, Department of Topographical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Homs University, Homs, Syria.

1 مقدمة

نتيجةً للتطورات الأخيرة في علوم المساحة التصويرية والرؤية الحاسوبية وخاصة عمليات التحليل الآلي للصور الرقمية، أصبحت النمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على الصور أحد أهم طرق استحواذ وإعادة إنشاء نقاط السطوح الهندسية [1]. وتتلخص الفكرة الرئيسة لهذه الطريقة في استخلاص قياسات موثوقة ونماذج هندسية ثلاثية الأبعاد عن طريق الصور الرقمية. إذ إنّها تستخدم القياسات ثنائية الأبعاد (2D) من الصّور، مفردة أو متعددة، لاستعادة معلومات سطح العنصر ثلاثي الأبعاد من خلال نموذج رياضي.

في بيئة الرؤية الحاسوبية، تمّ تقديم الطرق الآلية لإعادة الإنشاء ثلاثي الأبعاد القائمة على خوارزمية البنية انطلاقاً من الحركة (SFM). إذ تشير هذه الخوارزمية إلى حساب متزامن لتوجيه الكاميرات والغمامات النقطية ثلاثية الأبعاد المتفرقة بالاعتماد على نقاط ربط بين الصور. مع إمكانية أن تشارك الكاميرات المعايرة أو غير المعايرة في عملية إعادة الإنشاء. وذلك لأنّ الحل الحسابي لنموذج الكاميرا يمكن أن ينجز في عملية (SFM) باستخدام قياسات العنصر الفعلية. تتطلّب هذه الطرق عادة فترات زمنية قصيرة جداً بين الصّور المتتالية لضمان الإضاءة المستمرة والمقياس بين الصور المتتالية. ولكن مع بلوغ مستوى الأتمتة تطوراً كبيراً بالتزامن مع القدرة على توجيه أعداد ضخمة من الصور، استخدمت هذه الطرق لأغراض التسجيل والنمذجة ثلاثية الأبعاد الدقيقة [2].

من حيث المبدأ، يكفي ما لا يقل عن صورتين لإعادة إنشاء مشهد وبالتالي الحصول على المعلومات ثلاثية الأبعاد. ولكن تتطلب عملية الحصول على إحداثيات دقيقة للنقاط المقاسة في الصور توافر تصميم مناسب للشبكة الفوتوغرامترية. وهذا يتطلب تحقيق مجموعة من القواعد (مثل آلية استحواذ

الصور، خطوط الأساس وما إلى ذلك) بحيث يتم تأمين التغطية الكاملة للهدف وبشكل وافٍ القياسات الفائضة لإعادة إنشاء سطح بدقة وموثوقية عاليين [3]. ولذا تستخدم اللقطات المقتطعة من تسجيلات الفيديو كمدخل أساسي في عملية النمذجة كونها لا تستهلك وقتاً طويلاً ويسهل إنجازها من قبل غير المختصين [4]. وتعرف هذه التقنية باسم الفيديوغرامتري (Videogrammetry)، كتقنية فرعية عن المساحة التصويرية.

تعدّ المساحة التصويرية باستخدام الطائرة دون طيار(UAV Photogrammetry) من أهم المصادر الرئيسية لتوفير المعلومات الجيومكانية ثلاثية الأبعاد. إذ تسمح بتزويد الطبوغرافيين بحلول غير معقدة، ومنخفضة التكاليف وسهلة الاستخدام مقارنة بالمنصات التقليدية [5,6]. كما تسمح منصات (UAVs) بمرونة هائلة للمستخدمين من حيث توافر المستشعرات، الوقت وتخطيط الطيران. فضلاً عن أنّ توافر هذه المنصات مع برمجيات المعالجة بأسعار معقولة يجعل من الممكن إعادة إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد مرجعة جغرافياً للمواقع بزمن وتكلفة أقل بكثير مقارنةً باستخدام الطرائق التقليدية [7,8].

حالياً، معظم (UAVs) من الفئة الاستهلاكية هي مجهزة بكاميرا قادرة على التقاط مقاطع فيديو عالية الدقة (2K) (2048x1080 pixels). إذ تتيح دقة الصورة فيها إمكانية إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد ذات جودة محدودة أكثر ملاءمة للواقع الافتراضي أو السياحة الافتراضية. ولكن لا تزال غير كافية لتطبيقات التوثيق ثلاثي الأبعاد [9]. لذا تحاول هذه المقالة أن تحلل جدوى استخدام صور مقتطعة من تسجيلات فيديو فائق الدقة (4K) (4096x2160 pixels) لكاميرا طائرة دون طيار في النمذجة ثلاثية الأبعاد للمباني. كما سيتم عرض خطوات المعالجة الفوتوغرامترية لبيانات (UAV) وتقييم دقة النموذج الناتج بالاعتماد على نقاط تحكم أرضية (GCPs).

1.1 النمذجة القائمة على الفيديو (الفيديوغرامتري)

يقصد بالنمذجة القائمة على الصور بعملية التقدير المتزامن لعناصر توجيه الكاميرات والغمامات النقطية ثلاثية الأبعاد المتفرقة من مجموعة من النقاط المترافقة للصور المتداخلة والذي يتم عادة استناداً إلى خوارزميات (SfM). باستخدام صور (UAV)، تشير معظم الأبحاث إلى أن نسبة تداخل عرضي وطولي مقداره (80%) هو كافٍ من أجل النمذجة ثلاثية الأبعاد [6,7,10]. إذ إنّ هذا التداخل العالي يفرض خطوط أساس قصيرة بين الصور وهو المطلوب لأجل عملية إعادة الإنشاء المكثفة للصور [10]. وهذا سمح بإجراء النمذجة بالاعتماد على لقطات مقتطعة من تسجيلات فيديو (الفيديوغرامتري) [11]. إذ تلتقط هذه اللقطات عند خطوط أساس قصيرة جداً بحيث يتم تتبع السمات عبر الصور بشكل

آلي [12]. وعادة ما يتم اقتطاع هذه اللقطات عند فاصل زمني ثابت أو باستخدام طرق ترشيح متقدمة للصور. ويتم معالجة هذه اللقطات المتعددة (كصور رقمية) بهدف استعادة المعلومات ثلاثية الأبعاد للمشهد المدروس. كما أنها توفر كل المعلومات الهندسية والراديومترية اللازمة للنمذجة الصورية ثلاثية الأبعاد كما هو الحال في المساحة التصويرية [13].

على الرغم من عدم تفضيل الصور ذات الدقة المحدودة والملتقطة عند خطوط أساس قصيرة جداً في أعمال النمذجة، كونها تؤمن نسبة قاعدة إلى عمق صغيرة، يزداد حالياً استخدام لقطات الفيديو فائق الدقة (UHD) على نحو واسع. وذلك كونها تحقق عدة خصائص والتي تشمل الدقة العالية، وسهولة الالتقاط والتسجيل، وتوفير معلومات غنية وجهد أقل في التخطيط [12]. إذ أظهر استخدام لقطات فيديو بدقة (2K) نتائج مقاربة للنمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على صور كاميرا انعكاسية، وخاصة عند اختيار اللقطات بناءً على هندسية المشهد المدروس [13]. وحديثاً في [12]، تم استخدام لقطات فيديو من طائرة دون طيار بدقة (6K,8K) في إعادة إنشاء نماذج عالية الدقة للمباني. إذ ازدادت كثافة النقاط الناتجة ودقة إعادة الإنشاء بنسبة تصل إلى (90%) مقارنةً بمقاطع الفيديو عالية الدقة (HD) المأخوذة من نفس الطائرة دون طيار.

استخدمت سابقاً تقنية الفيديوغرامتري من أجل التطبيقات الصناعية مثل التقاط الحركة، وتحليل اختبارات الانهيار وراسم الخرائط المتنقل وغير ذلك [13]. وحالياً يشهد استخدام تسجيلات الفيديو لأغراض إعادة الإنشاء ثلاثي الأبعاد للمعالم انتعاشاً بعد التجارب الأولية التي أجريت مبكراً [14,15]. وذلك بفعل الزيادة الحاصلة في الجودة الراديومترية والهندسية للقطات الفيديو وتطبيق طرق تحديد الموضع ورسم الخرائط المتزامن (SLAM) البصرية في معالجة تسجيلات الفيديو [13]. إذ تصمم الطرق الأخيرة على العمل في الزمن الحقيقي على مقاطع الفيديو. أي أنها تتوقع خطوط أساس قصيرة جداً وتوفر عناصر توجيه الكاميرات والنقاط المتفرقة ثلاثية الأبعاد بمجرد معالجة لقطات الفيديو. بالمقابل، تتطلب خوارزميات توجيه الصور التقليدية و(SfM) شبكة صور مناسبة مع خطوط أساس جيدة. وهذا بدوره يسمح بإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد أكثر دقة ولكن أكثر تكلفة. لذا يجب اختيار بعض اللقطات الرئيسية من تسجيلات الفيديو بعناية قبل تنفيذ عملية إعادة الإنشاء ثلاثي الأبعاد [13].

يوجد العديد من الابحاث التي درست جدوى استخدام لقطات فيديو من طائرة دون طيار في تطبيقات النمذجة ثلاثية الأبعاد. في [16]، تم تقديم منهجية لإعادة إنشاء التضاريس الحضرية من مقاطع فيديو عالية الدقة (1280X720 pixels HD) شبه شاقولية لطائرة دون طيار صغيرة لأغراض الواقع

الافتراضي. كما تم تقديم منهجية لتوثيق المباني الأثرية استناداً إلى لقطات فيديو كاملة الدقة (Full HD 1920X1080 pixels) لطائرة دون طيار وبيانات مسح ليزري أرضي في [17]. وقدم في [18] حل لتعديل لقطات فيديو (Full HD) من طائرة دون طيار منخفضة التكلفة عن طريق إضافة بيانات التنسيق الوصفية (EXIF) (ملف الصورة القابل للتبادل) إلى الصور. ثم تم دمجها مع نظام (SFM) مفتوح المصدر لإعادة إنشاء نموذج متماسك ثلاثي الأبعاد.

2 أهمية البحث وأهدافه

تكمن أهمية هذا البحث في أنه يقترح منهجية لاستخدام تسجيلات الفيديو فائق الدقة من طائرة دون طيار كمصدر منخفض التكلفة لبيانات النمذجة ثلاثية الأبعاد. كما يحاول تسليط الضوء على قدرات آلات تصوير الفيديو المحمولة على منصات الطائرات دون طيار في تطبيقات نمذجة المباني. فضلاً عن توفير بيانات ذات دقة مكانية فائقة بتكلفة منخفضة مقارنةً بتقنيات المسح التقليدية. وبشكل عام يمكن تلخيص أهداف البحث في النقاط التالية:

- اقتراح طريقة لاستحواذ تسجيلات الفيديو من طائرة دون طيار ومن ثم اقتطاع اللقطات المناسبة منها بنسبة تداخل عالية لأجل إنشاء النموذج ثلاثي الأبعاد.
- توضيح مراحل معالجة الصور الملتقطة من تسجيلات فيديو الطائرات دون طيار وذلك من خلال تطبيق عملي يوضح إمكانيات ومخرجات هذه الأنظمة الآلية.
- جذب انتباه غير المختصين في مجال المساحة التصويرية إلى إمكانية الاستفادة من لقطات الفيديو للطائرات دون طيار، بشكل عام وبشكل خاص طائرات الهواة، وذلك كمدخلات للنمذجة ثلاثية الأبعاد.
- تقييم دقة نتائج النمذجة وذلك عبر مقارنتها بقياسات تحكم أرضية.

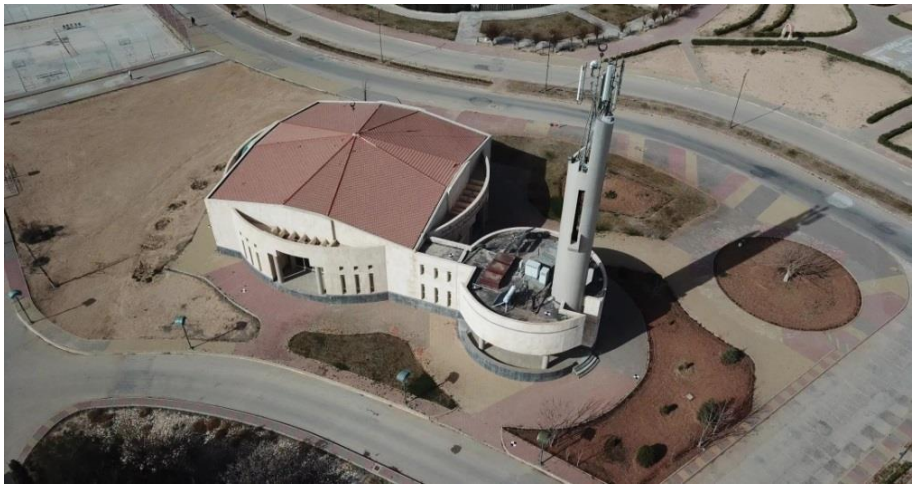
3 مواد وطرائق البحث

3.1 استحواذ البيانات

3.1.1 العنصر المدروس

تم اختيار حالة دراسية ضمن حرم جامعة القلمون الخاصة في مدينة دير عطية وهي مبنى مسجد الجامعة (الشكل 1). يتميز المبنى بتصميمه الحديث ضمن بيئة جامعية متكاملة تشمل مرافق سكنية

وتعليمية. إذ تم إنشاؤه دون قبة تقليدية وبمأذنة واحدة بتصميم هندسي محدد وتتراوح أبعاده تقريباً (50*32) متراً مربعاً وارتفاع المأذنة بحوالي (25) متر.



الشكل(1). لقطة جوية لمسجد جامعة القلمون الخاصة وحرمه.

3.1.2 الأجهزة المستخدمة:

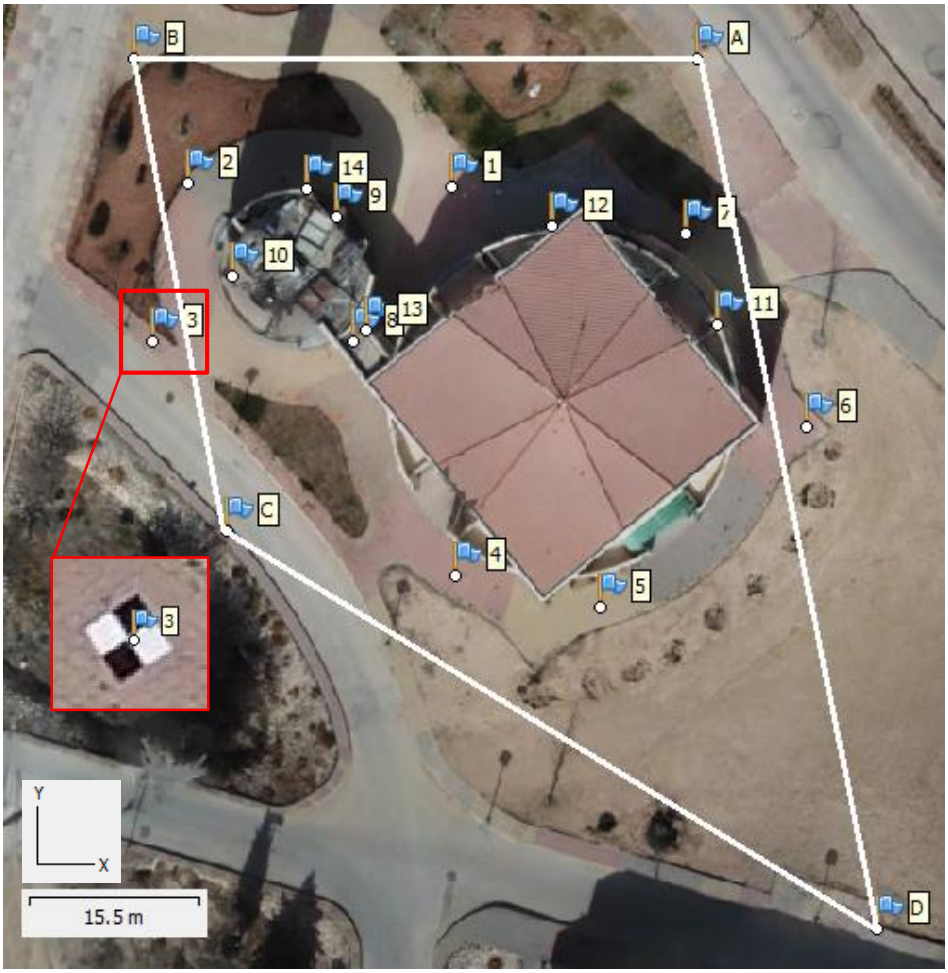
لإنشاء معطيات الضبط الخارجي، أجريت القياسات المساحية التقليدية باستخدام جهاز المحطة المتكاملة (Nikon FX)، (الشكل 2)، عند دقة قياس للزوايا قدرها ($5''$) ودقة قياس للمسافات قدرها ($\pm 2mm \pm 2PPM$). كما تم استخدام طائرة دون طيار من فئة الهواة والاستخدام التجاري الخفيف رباعية المراوح (Quadcopter) من نوع (Mavic Pro) لالتقاط تسجيلات الفيديو (الشكل 2). وهي مزودة بكاميرا رقمية بدقة تمييز (12MP)، بعد محرقي (4.98mm)، ودقة تسجيل فيديو (4K) بمعدل التقاط قدره (24 Frame/sec) وبأبعاد للفيديو (4096*2160pix).



الشكل (2). جهاز المحطة المتكاملة (Nikon FX) (يمين) والطائرة دون طيار (Mavic Pro) (يسار).

3.1.3 نقاط التحكم الأرضية (GCPs)

بهدف الحصول على معطيات الضبط الخارجي والتحضير للتصوير، تم تأسيس شبكة محلية تبدأ بزرع مضلع مساحي مغلق وحساب إحداثيات ومناسيب ذراه ومن ثم استخدام المضلع كأساس لاختيار وتثبيت شبكة مؤلفة من (15) نقطة مرجعية أرضية (على واجهات المبنى وسطحه وفي محيطه)، إذ تم زرع النقاط بحيث تراعي ما أمكن التوصيات المرعية من حيث التباعد والتجانس في التوزيع والتموضع، (الشكل 3). وتم اختيار وتصميم أهداف أو درايا رقعة الشطرنج (Black and White Target–45cmx45cm)، مع الأخذ بعين الاعتبار ناحيتي الشكل والأبعاد للدريئة بحيث تكون واضحة على الصور وبالتالي يمكن التعرف عليها وقياسها بدقة [19]. تتبع عملياً أبعاد الدريئة لدقة تمييز آلة التصوير المستخدمة (مسافة الاعتيان الأرضية GSD)، وبحسب الأدبيات العالمية ينبغي أن لا تقل أبعاد الهدف المقاس على الصور عن (5–10) مرات من قيمة (GSD) (مثلا Pix4D Documentation).



الشكل (3). شبكة مراصد المضلع المغلق ونقاط الضبط (ممثلة على صورة الموزاييك المصححة عامودياً).

3.1.4 تسجيلات فيديو الطائرة دون طيار

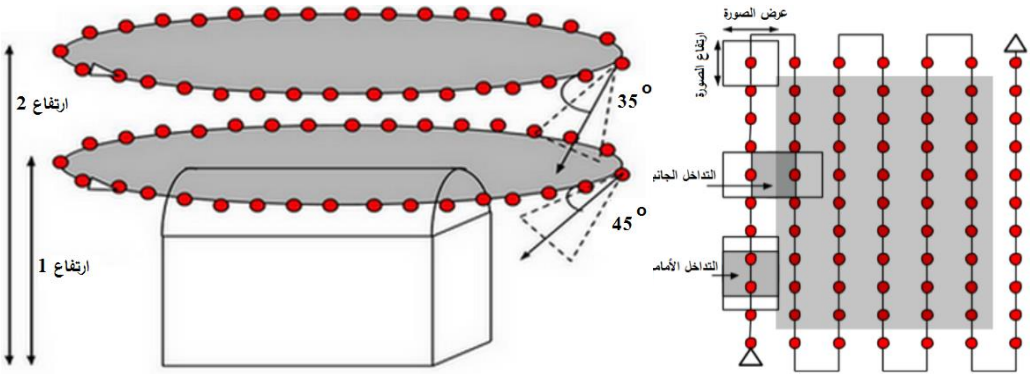
بهدف تغطية المبنى المستهدف وإنجاح عملية النمذجة ثلاثية الأبعاد، تم وضع خطة استحواذ لتسجيلات الفيديو مؤلفة من أربع جولات طيران باستخدام الطائرة دون طيار (جدول 1).

الجدول (1). بيانات جولات الطيران مع عدد اللقطات المقتطعة من تسجيلات الفيديو.

مدة الجولة (s)	ارتفاع الطيران الوسطي (m)	سرعة الطيران (km/h)	زاوية ميل الكاميرا (°)	عدد اللقطات
1:01	53	36	–	98
2:20	10	36	45	68
1:34	20	36	35	225
1:06	50	36	30	158

تمثل الجولة الأولى حالة تصوير عامة (الحالة الناظمية) بهدف إكمال تغطية السقوف وسهولة تحديد وقياس (GCPs) على الصور (الشكل 4 يمين). إذ تسمح باقتطاع صور بتداخل أمامي لا يقل عن 75% (بالنسبة لاتجاه الطيران) وتداخل جانبي لا يقل عن 60% (بين مسارات الطيران) [6,7,20]. كما تمّ التصوير فيها بنمط شبكي منتظم بحيث يتم تثبيت الكاميرا قدر الإمكان على ارتفاع ثابت فوق المنطقة المستهدفة لضمان الحصول على (GSD) المطلوبة (حوالي 2cm/pix).

أما الجولات الثلاث الباقية فتهدف لإنجاز عملية إعادة الإنشاء ثلاثي الأبعاد للمبنى بحيث يتم التصوير بمسار على شكل خاتم يحيط بالمبنى في كل جولة طيران. ويتم الطيران على ارتفاعات متزايدة بحيث يتم تجنب ما أمكن التغير الكبير في الدقة المكانية [20]. كما تم تقليل زاوية الكاميرا (5– 10 درجات بحسب حجم المبنى ومسافة التصوير) في كل مرة لضمان التغطية والتداخل اللازمين لعمليات توجيه الصور وإعادة الإنشاء الهندسي (الشكل 4 يسار) [20].



الشكل (4). خطة التصوير باستخدام الطائرة دون طيار [20].

3.2 البرامج المستخدمة

تمّ في هذا البحث استخدام البرامج التالية:

- **البرنامج (Free Video to JPG Converter)**: هو برنامج مجاني لتحويل تسجيل فيديو إلى صور بتنسيق (JPG). إذ يسمح باستخراج لقطات من تسجيلات الفيديو إلى صور بنقرة زر واحدة عن طريق التحكم بمعدل وزمن الالتقاط. بناء على التجربة، تمّ في هذا البحث التقاط لقطة واحدة كل ثانية واحدة (الشكل 5) بهدف تأمين تداخل أمامي وجانبي لا يقل عن 80%، وذلك بما يتوافق مع متطلبات النمذجة ثلاثية الأبعاد. فضلاً عن إجراء تقاطع وفلترة للصور المقتطعة من الجولات الثلاث واستبعاد للصور الفائضة.
- **البرنامج (Agisoft Metashape)**: هو من أشهر برامج المساحة التصويرية التجارية. إذ تمّ استخدامه بشكل أساسي من أجل توجيه الصور واستخلاص النقاط منها بشكل أولي على شكل غمامة نقطية منفصلة ثم تكثيفها وتحويلها إلى نموذج سطوحي. والذي يتم إسقاط الصور عليه للحصول على النموذج الصوري الحقيقي. يستخدم هذا البرنامج أحدث تقنيات إعادة الإنشاء الآلية ثلاثية الأبعاد من الصور المتعددة ويعمل في حالتي الشروط المضبوطة (كما هي الحال في هذا البحث إذ تتوفر معطيات تحكم) وغير المضبوطة [21].

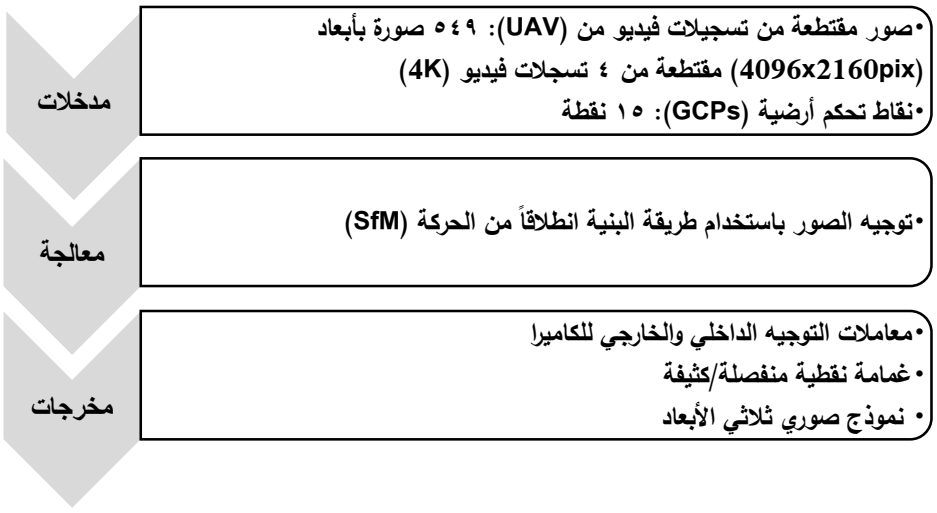
- **البرنامج (SPSS):** هو برنامج إحصائي قوي يستخدم على نطاق واسع في الأوساط الأكاديمية والبحثية. يُمكن من إدارة البيانات، وإجراء التحليلات الإحصائية المتقدمة وعرض البيانات بصرياً. ويوفر واجهات سهلة الاستخدام لإدخال البيانات ومعالجتها وتفسيرها بفضل خوارزميات التعلم الآلي المدمجة وآليات تحليل النصوص، كما يدعم احتياجات تحليلية متنوعة [22].



الشكل(5). أمثلة عن لقطات مقتطعة (4096x2160pix) من أربع تسجيلات فيديو للطائرة دون طيار معتمدة في النمذجة.

3.3 منهجية النمذجة

يمكن تلخيص خطوات المعالجة الفوتوغرامترية للصور في برنامج (Agisoft Metashape) من خلال المخطط التدفقي الموضح في الشكل 6.



الشكل(6). المخطط التدفقي للمعالجة الفوتوغرامترية للصور في برنامج (Agisoft Metshape).

4 النتائج والمناقشة

4.1 بناء النموذج من تسجيلات الفيديو

تمّ تطبيق مراحل المعالجة الفوتوغرامترية الموضحة في المخطط التدفقي (الشكل 6) على اللقطات (الصور) المقتطعة من تسجيلات فيديو الطائرة دون طيار. إذا تم استخدام (15) نقطة تحكم أرضي موزعة بتجانس في منطقة العمل (10 نقاط ضبط control Points و 5 نقاط تحقق check Points) (الجدول 2). تمّ توجيه (549) صورة بدقة (خطأ إعادة الإسقاط) نسبية في فضاء الصورة من مرتبة واحد بكسل، وعند دقة تمييز أرضية وسطية قدرها (1.9cm/pix) وبخطأ إرجاع جغرافي قدره (1.38cm). ثمّ طبقت عملية مواءمة مكثفة للصور من أجل إنشاء النموذج الشبكي الصوري. إذ يمكن بصرياً ملاحظة سوية تفاصيل النموذج، ناتج من توليد (27150181) نقطة عند جودة عالية للمواءمة المكثفة للصور وباستخدام (5429868) وجهاً/مثلثاً للنمذجة ثلاثية الأبعاد. وهذا بدوره يؤكد إمكانية استخدام تسجيلات فيديو الطائرات دون طيار من فئة الهواة في أعمال النمذجة الصورية ثلاثية الأبعاد للمباني (الشكل 7 و 8).

الجدول (2). أسماء نقاط التحكم الأرضية (GCPs) ونقاط التحقق (CPs) والفروق بين إحداثياتها المرجعية والمعدلة بعد عملية الإرجاع الجغرافي والخطأ التربيعي المتوسط للفروق.

	P.	dX (cm)	dY (cm)	dZ (cm)	$RMSE_X$ (cm)	$RMSE_Y$ (cm)	$RMSE_Z$ (cm)	$RMSE_{XY}$ (cm)
GCPs	A	−0.89	−0.18	−0.29	0.64	0.43	1.15	0.77
	2	−0.77	0.40	2.18				
	3	0.16	0.33	−1.55				
	5	1.16	−0.14	0.25				
	6	−0.77	−0.39	0.60				
	8	0.04	−0.46	0.88				
	9	0.04	−0.24	0.37				
	10	−0.15	−0.42	0.03				
	11	0.43	0.98	−2.11				
	13	0.76	0.12	−0.36				
CPs	1	−1.97	1.00	−1.31	1.46	0.88	1.65	1.71
	4	−1.93	0.09	2.15				
	7	−0.97	−0.05	1.02				
	12	−1.34	0.95	−1.76				
	14	−0.61	1.38	−1.77				

4.2 تقييم دقة بناء النموذج

تم مناقشة الدقة المكانية للنموذج بالاعتماد على نقاط التحكم الأرضية (GCPs) ونقاط التحقق (CPs) وإجراء قياسات لمسافات على المبنى والنموذج. تستخدم عادة نقاط التحكم الأرضية لإتمام عملية الإرجاع الجغرافي للنموذج. إذ تشير قيمة الخطأ التربيعي المتوسط (RMSE) لنقاط التحكم الأرضية الحاصلة بنتيجة عملية التثليث الجوي إلى دقة عملية الإرجاع، أي مدى تطابق نقاط النموذج

مع مواقع نقاط التحكم الأرضية. تشير القيم الصغيرة (من مرتبة سنتمتر واحد) للأخطاء التربيعية المتوسطة المستوية والرأسية (RMSExy, RMSEz) في الجدول (1) إلى سوية أعلى في دقة الإرجاع الجغرافي.

أما نقاط التحقق فتستخدم لتقييم دقة التثليث الجوي، إذ يعتبر (RMSE) لهذه النقاط معياراً للدقة النهائية للنموذج. في [23,24]، تم تحديد قيم (RMSExy, RMSEz) وفق قاعدة قائمة على الخبرة أو ما يدعى بالتعميم التجريبي (Empirical Generalization) كما يلي:

$$RMSE_{XY} \approx [1-2] \times GSD \;\; ; \;\; RMSE_Z \approx [1-3] \times GSD \qquad (1)$$



الشكل(7). نتائج المعالجة الفوتوغرامترية لبيانات مبنى مسجد جامعة القلمون: الغمامة النقطية الكثيفة (أعلى) والنموذج الصوري ثلاثي الأبعاد (أسفل).







الشكل(8). نتائج المعالجة الفوتوغرامترية لبيانات مبنى مسجد جامعة القلمون: لقطات من زوايا مختلفة للنموذج الصوري ثلاثي الأبعاد.

ويسبق هذا التقييم عادة إجراء عملية كشف للقيم الشاذة في القياسات ومعرفة تبعية الأخطاء (فروق إحداثيات نقاط التحقق) للتوزيع الطبيعي، وذلك يرفع من الموثوقية في دقة النموذج الناتج. لذا ونظراً لصغر حجم العينة (n=5)، تم تطبيق اختبار (Shapiro–Wilk) [25,26] لكونه الأكثر دقة وقوة للعينات الصغيرة لتحديد تبعية الفروق للتوزيع الطبيعي باستخدام البرنامج الإحصائي (SPSS).

يُعد اختبار (Shapiro–Wilk) أحد أهم اختبارات المطابقة الإحصائية وأكثرها استخداماً للتحقق من افتراض التوزيع الطبيعي للبيانات، خاصة عندما يكون حجم العينة صغيراً. إذ يستخدم الاختبار معايير إحصائية الاختبار (W) والقيمة الاحتمالية (P–value) في التحقق من الفرضية الصفرية (Null Hypothesis). والتي تعني أن البيانات تتبع توزيعاً طبيعياً. تأخذ (W) قيمة رقمية تقع بين [0–1] ويتم حسابها من البيانات وتُستخدم في تقييم مدى توافق توزيع البيانات مع التوزيع الطبيعي. إذ تدل القيم القريبة من الواحد إلى توافق البيانات مع التوزيع الطبيعي، بينما تدعم القيم الصغيرة رفض الفرضية الصفرية وبالتالي تشير إلى انحراف البيانات عن التوزيع الطبيعي. بالنسبة إلى القيمة (P–value)، فإذا كانت بنتيجة الاختبار أكبر من (0.05) دل ذلك على عدم وجود مبرر لرفض الفرضية الصفرية، وبالتالي يمكن اعتبار أن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي. أما إذا كانت القيمة أقل من أو تساوي (0.05) فهذا يبرر رفض الفرضية الصفرية، وبالتالي لا يمكن اعتبار أن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي. كما يمكن استخدام مخطط الكميات (Q–Q Plot) كأداة بيانية إحصائية بهدف التقييم البصري لمقارنة توزيع بيانات العينة مع التوزيع الطبيعي و تشخيص الشاذ منها.

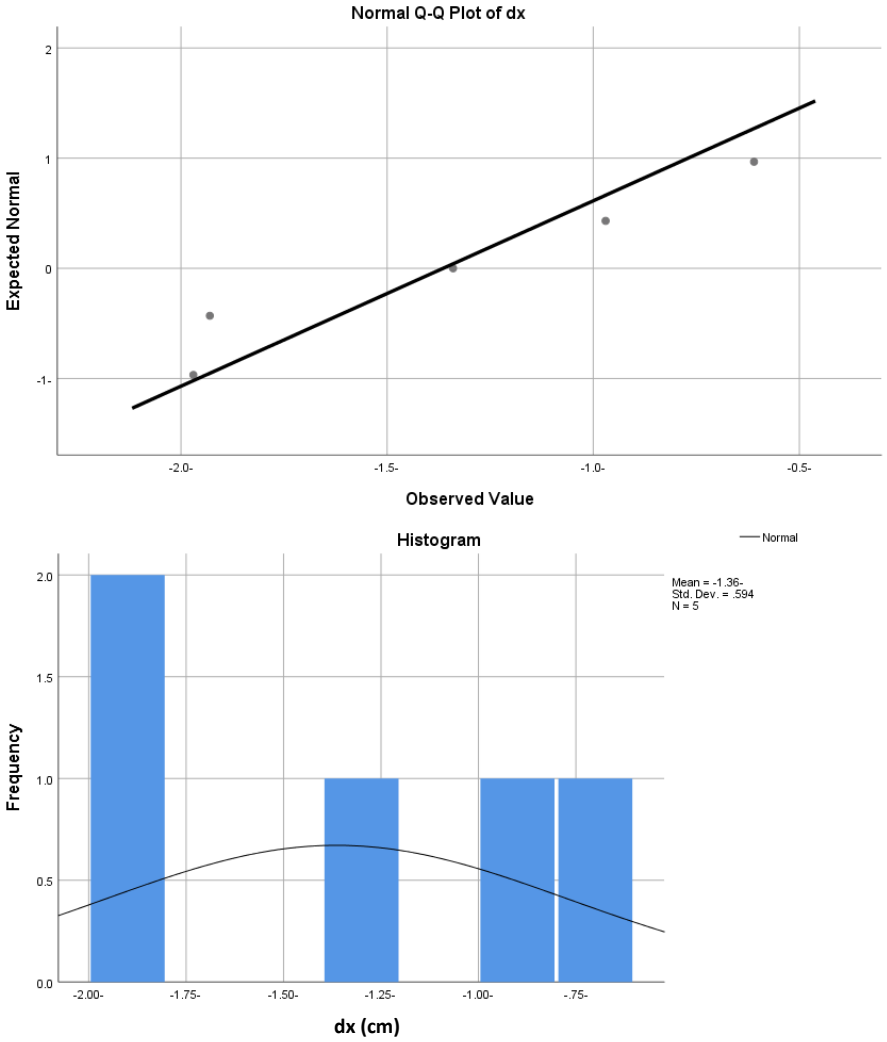
تبين من خلال تطبيق اختبار (Shapiro–Wilk) على كل من فروق إحداثيات نقاط التحقق (dx, dy, dz) قبول الفرضية الصفرية (P–value=Sig > 0.05) وبالتالي جميعها تتبع التوزيع الطبيعي (الأشكال 9 و10 و 11). كما أن التقييم البصري للمخططات (Q–Q) لا يشير إلى وجود دلالة كبيرة للقيم الشاذة في بيانات الفروق والذي بدوره يدعم تتبع البيانات للتوزيع الطبيعي.

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
dx	.230	5	.200*	.913	5	.488

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction



الشكل(9). نتائج اختبار (Shapiro–Wilk) على فروق إحداثيات (X) لنقاط التحقق:

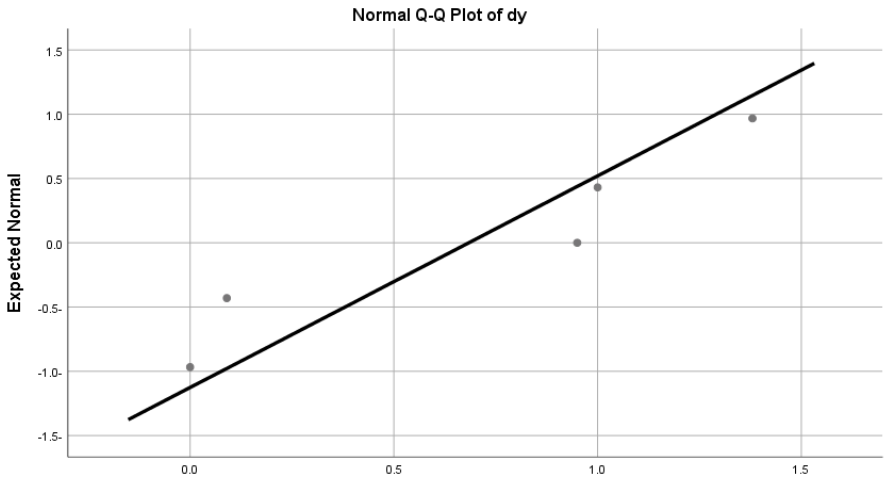
معايير الاختبار (أعلى) ومنحني التوزيع التكراري للفروق (وسط) ومخططات (Q–Q) (أسفل).

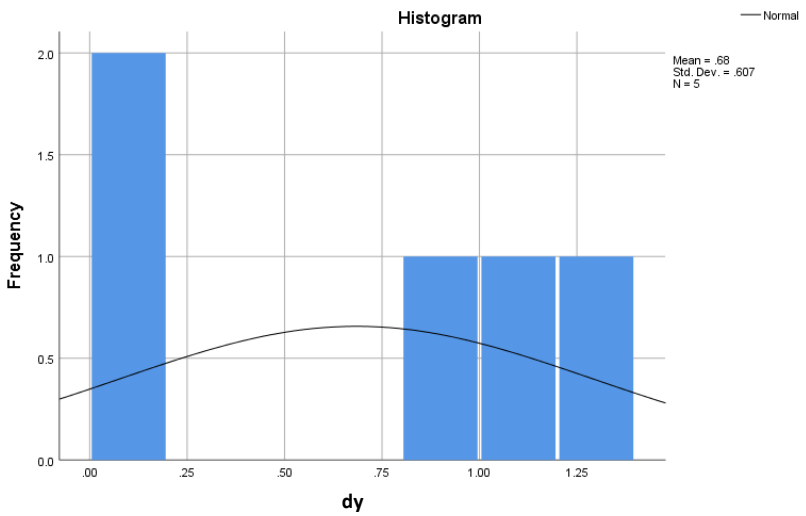
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
dy	.269	5	.200*	.876	5	.291

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction



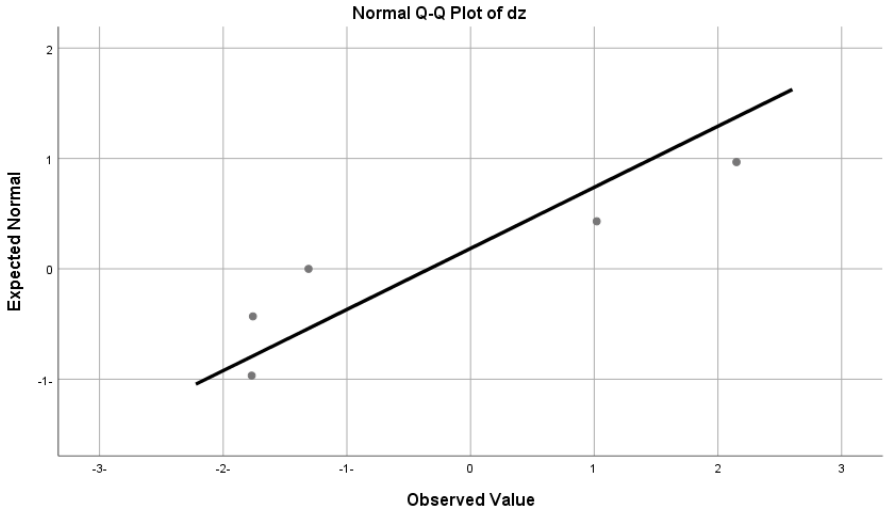


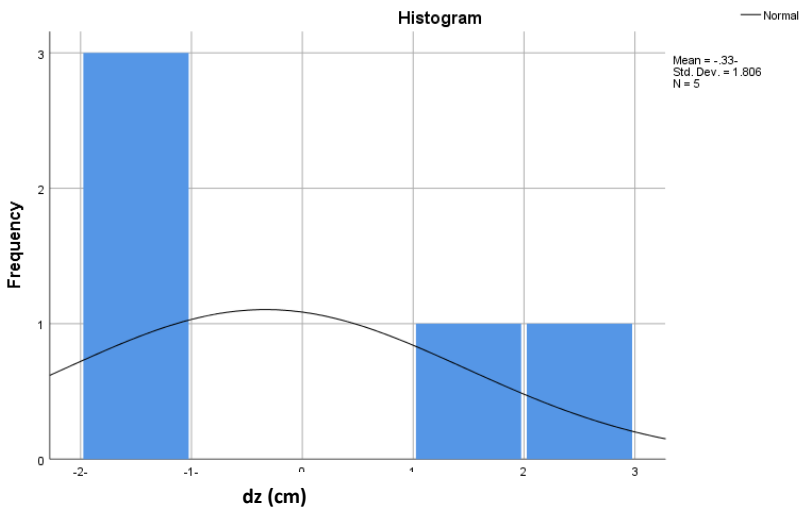
الشكل(10). نتائج اختبار (Shapiro–Wilk) على فروق إحداثيات (Y) لنقاط التحقق: معايير الاختبار (أعلى) ومنحني التوزيع التكراري للفروق (وسط) ومخططات (Q–Q) (أسفل).

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
dz	.306	5	.143	.822	5	.122

a. Lilliefors Significance Correction





الشكل(11). نتائج اختبار (Shapiro–Wilk) على فروق إحداثيات (Z) لنقاط التحقق: معايير الاختبار (أعلى) ومنحني التوزيع التكراري للفروق (وسط) ومخططات (Q–Q) (أسفل).

ومن الجدول (2)، تشير قيم (RMSExy, RMSEz) لنقاط التحقق إلى قيم أقل من قيمة (GSD) وبالتالي هي قيم مقبولة وفقاً للمعادلات رقم (1). وهذا يدل على دقة أعلى للتثليث الجوي وجودة النموذج التصويري.

فضلاً عما سبق، تم إجراء عدة قياسات باستخدام شريط قياس من الفايبر جلاس (Fiberglass Measuring Tape 30m, EC Class II) لمسافات أفقية وشاقولية على عناصر في واجهات المبنى (مسافات مرجعية) والنموذج (مسافات مقاسة) وحساب الفروق بينها. إذ تم الحصول على دقة متوسطة للفروق قدرها (6mm) (جدول 3)، والتي تشير لدقة هندسية عالية للنموذج.

الجدول (3). مقارنة بين مسافات مرجعية ومسافات مقابلة مقاسة على النموذج.

المسافة المرجعية (m)	المسافة المقاسة (m)	الفرق (m)
0.453	0.450	0.003
0.604	0.607	0.003
1.878	1.872	0.006
2.257	2.250	0.007
3.409	3.400	0.009

5 الاستنتاجات والتوصيات

استناداً إلى كل من الدراسة النظرية والعملية المقدمة حول استخدام صور مقتطعة من تسجيلات فيديو فائق الدقة من طائرة دون طيار في إنتاج نماذج رقمية ثلاثية الأبعاد للمباني، يمكن أن نلخص الاستنتاجات التالية:

1. يمكن اعتبار تسجيلات فيديو الطائرات دون طيار من فئة الهواة حلّاً بديلاً وسريعاً لمسألة النمذجة الصورية ثلاثية الأبعاد للمباني كونها تحقق دقة هندسية مقاربة لاستخدام آلات التصوير التقليدية.
2. إن التخطيط الناجح لعملية استحواذ تسجيلات الفيديو باستخدام الطائرة دون طيار، من الاختيار والتوزيع الأمثل لنقاط التحكم الأرضية وتغيير ارتفاع الطيران وزاوية التصوير بما يسمح بضمان نسب التداخل بين الصور المقتطعة والتغطية اللازمين لعملية النمذجة وتجنب التغير الكبير في الدقة المكانية، كفيل بإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد بسوية دقة عالية.
3. أكدت النتائج كفاءة المنهجية المقدمة وتلبيتها لمعايير الجودة من سوية عالية في الدقة المستوية والرأسية (أقل من قيمة GSD=1.9cm)، والذي يدعم إمكانية استخدامها في أعمال التوثيق الدقيق للمباني.

وانطلاقاً من النتائج وحدود الدراسة والتي تشمل حجم منطقة الدراسة، والظروف الجوية المتاحة ونوعية الطائرة دون طيار، يمكن أن يوصى بما يلي:

1. تطبيق منهجية العمل السابقة وذلك باستخدام تسجيلات فيديو بدقة (6K,8K) بهدف اختبار وبناء نماذج رقمية بسوية دقة أعلى، مع الأخذ بعين الاعتبار نتائج الأبحاث السابقة.
2. إجراء دراسة مقارنة بين النماذج المبنية من لقطات الفيديو وتلك المبنية من صور ثابتة (Still Images) لتحديد الفروق الكمية في الدقة والزمن والتكلفة. مع إمكانية اختبار المنهجية على أنواع مختلفة من المباني وفي ظروف جوية وإضاءة متباينة لتحديد حدود التطبيق بدقة أكبر.
3. دراسة تأثير معدل اقتطاع اللقطات على جودة النموذج، بدلاً من الاعتماد على اقتطاع ثابت، وذلك باستخدام طرق ترشيح متقدمة تعتمد على التغطية والجودة البصرية.

6 المراجع

1. Luhmann, T., (2019). Recent developments in Close-Range Photogrammetry. GIM International, February 2019, pp. 14-19.
2. Moussa, W. (2014). Integration of digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for cultural heritage data recording. Deutsche Geodätische

Kommission, Reihe C, Nr. 725, München 2014, ISBN 978-3-7696-5137-9, 162 S.

3. Wenzel, K., Rothermel, M., Fritsch, D., and Haala, N. (2013). Image Acquisition and Model Selection For Multi-View Stereo. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-5/W1, pp. 251-258.
4. AL Khalil, O., (2016). Using Video Records in 3D Modeling of Large Historical Monuments. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (6).
5. Moussa, W., (2020). Resent Developments in UAV Photogrammetry with Practical Examples. Homs University Journal – Civil Engineering Science Series 42 (10), pp. 35-64.
6. Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D Mapping Applications: a Review. Applied Geomatics, 6 (1), pp.1-15.
7. Colomina, I. & Molina, P., (2014). Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 92, pp.79-97.
8. Alomar, A., (2023). Drone Photogrammetry for urban planning purposes in Syria Comparison Study. Homs University Journal – Civil Engineering Science Series 45 (10), pp. 39-64.
9. Teo, T. (2015). Video-based point cloud generation using multiple action cameras. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40, p. 55-60.

10. Wenzel, K. Flight Planning for City Acquisition at High Resolution. EuroSDR Workshop. Available online: http://www.eurosdr.net/sites/default/files/images/inline/04_nframes-eurosdr_isprs-southampton2015.pdf (accessed on 15 July 2024).
11. Gruen, A. (1997). Fundamentals of Videogrammetry-a Review. Human movement science, 16(2-3), pp. 155-187.
12. Alsadik, B., & Khalaf, Y. H. (2022). Potential use of drone ultra-high-definition videos for detailed 3d city modeling. ISPRS international journal of geo-information, 11(1), p. 34.
13. Torresani, A., & Remondino, F. (2019). Videogrammetry vs photogrammetry for heritage 3D reconstruction. In Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W15 (Vol. 42, pp. 1157-1162).
14. Sato, T., Kanbara, M., Yokoya, N., & Takemura, H. (2002). Dense 3-d reconstruction of an outdoor scene by hundreds-baseline stereo using a hand-held video camera. International Journal of Computer Vision, 47, pp. 119-129.
15. Pollefeys, M., Nistér, D., Frahm, J. M., Akbarzadeh, A., Mordohai, P., Clipp, B., ... & Towles, H. (2008). Detailed real-time urban 3d reconstruction from video. International Journal of Computer Vision, 78, pp. 143-167.
16. Bulatov, D., Solbrig, P., Gross, H., Wernerus, P., Repasi, E., & Heipke, C. (2011). Context-based urban terrain reconstruction from UAV-videos for geoinformation applications. In International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences:[International Conference On Unmanned Aerial Vehicle In Geomatics (UAV-G)] 38-1 (2011), Nr. C22 (Vol. 38, No. C22, pp. 75-80.

17. Xu, Z., Wu, T. H., Shen, Y., & Wu, L. (2016). Three dimentional reconstruction of large cultural heritage objects based on UAV video and TLS data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41, pp. 985-988.
18. Byrne, J., O'Keeffe, E., Lennon, D., & Laefer, D. F. (2017). 3D reconstructions using unstabilized video footage from an unmanned aerial vehicle. Journal of Imaging, 3(2), p. 15.
19. Doumit, Jean A. (2018). From Drones to Geospatial Data. KubGU, Krasnodar. Courtesy of assistant professor Steve Scott.
20. https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459#label4 (accessed on 15.12.2025)
21. Agisoft, (2026). Agisoft Metashape User Manua User Manual Professional. Edition, Version 2.3., Copyright © 2026 Agisoft LLC.
22. IBM Corp. (2020). IBM SPSS Statistics for Windows (Version 27.0) [Software]. Armonk, NY: IBM Corp.
23. ASPRS, (2024). ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data. (doi: 10.14358/ASPRS.PAS.2024)
24. Luhmann T, Robson S, Kyle S, Boehm J. (2023). Close-range photogrammetry and 3D imaging. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

25. Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52(3/4), pp. 591-611.

26. Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. Journal of statistical modeling and analytics, 2(1), 21-33.

دراسة تأثير مادة الفلتر ونوع النبات على أداء 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 تقييم الأداء الهيدروليكي وكفاءة إزالة الملوثات لعدة نسب خلط بين الحصى ورقائق الإطارات المطاطية ضمن أراضٍ رطبة صنعية ذات جريان تحت سطحي شاقولي لمعالجة مياه الصرف الصحي تحت ظروف تشغيلية ثابتة. تم اختبار سبعة أوساط ترشيح مختلفة شملت: 100% حصى، 75% حصى + 25% مطاط، 60% حصى + 40% مطاط، 50% حصى + 50% مطاط، 40% حصى + 60% مطاط، 25% حصى + 75% مطاط، و100% مطاط معاد تدويره.

تم تقييم المنظومة اعتمادًا على كفاءة إزالة المواد الصلبة العالقة الكلية (TSS)، والطلب الحيوي للأكسجين (BOD)، والطلب الكيميائي للأكسجين (COD)، والأمونيوم ($NH4^{+}$)، والنترات (NO_3^{-})، والفوسفات ($PO4^{-3}$)، إضافة إلى نسبة انخفاض المسامية كمؤشر على تطور الانسداد.

أظهرت النتائج أن المنظومة المختلطة حققت أداءً أفضل مقارنة بالأوساط الأحادية. وقد حققت نسب الخلط ضمن المجال 50–60% مطاط أعلى كفاءة معالجة واستقرار هيدروليكي. بلغت أعلى كفاءة إزالة حوالي 80% لـ BOD، و74% لـ COD، و63% لـ $NH4^{+}$، و46% لـ $NO3^{-}$، و62–66% لـ PO_4^{-3}، في حين انخفض فقدان المسامية من 39.7% في الوسط الحصوي إلى نحو 23% 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.

تشير النتائج إلى وجود نسبة خلط مثلى تحقق توازنًا بين الموصلية 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.

Studying the effect of filter media and plant type on the performance of 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 research idea is summarized in evaluating the hydraulic performance and pollutant removal efficiency for various mixing ratios between gravel and rubber tire chips within constructed wetland systems with vertical subsurface flow for wastewater treatment under steady operational conditions. Seven different filter media were tested, including: 100% gravel, 75% gravel + 25% rubber, 60% gravel + 40% rubber, 50% gravel + 50% rubber, 40% gravel + 60% rubber, 25% gravel + 75% rubber, and 100% recycled rubber.

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

The results showed that mixed media systems achieved better performance compared to single once. Mixing ratios within the range of 50–60% rubber achieved the highest treatment efficiency and hydraulic stability. The highest removal efficiency reached approximately 80% for BOD, 74% for COD, 63% for NH_4^+, 46% for NO_3^-, and 62–66% for PO_4^{-3}, while the porosity loss decreased from 39.7% in the gravel medium to about 23% in the mixed media.

The results confirmed that increasing the rubber content improved porosity and reduced clogging development, while very high rubber ratios led to a slight decrease in the efficiency of suspended solids removal due to reduced physical filtration capacity.

The results indicate the existence of an optimal mixing ratio that achieves a balance between hydraulic conductivity, oxygen transfer, filtration efficiency, and biological activity. The study also supports the feasibility of using recycled tire rubber chips as a sustainable and low-cost filter medium to enhance the long-term performance of constructed wetlands.

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

1. المقدمة:

تعتبر معالجة مياه الصرف الصحي مشكلة عالمية، فإلقاء 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).

تم 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 من جهة ونباتات زينة محلية من جهة ثانية (تم اختيار الجهنمية وأم كلثوم)، 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:

- إعادة تدوير نفايات الإطارات المطاطية واستخدامها كمادة مالئة في الأراضي الرطبة الصنعية، وتحقيق الفائدة البيئية والاقتصادية.
- تحديد التحليل الحبي ونسبة الخلط المثالية بين قطع الإطارات المطاطية والحصويات التي تعطي أعلى كفاءة إزالة للملوثات وأقل نسبة انخفاض للمسامية ضمن مادة الفلتر.
- تحقيق التنوع النباتي والجمالي عند مصبات الصرف الصحي من خلال إنتاج نباتات زينة وبما يحقق التنقية الأفضل لمياه الصرف الصحي.

3. المواد وطرائق البحث

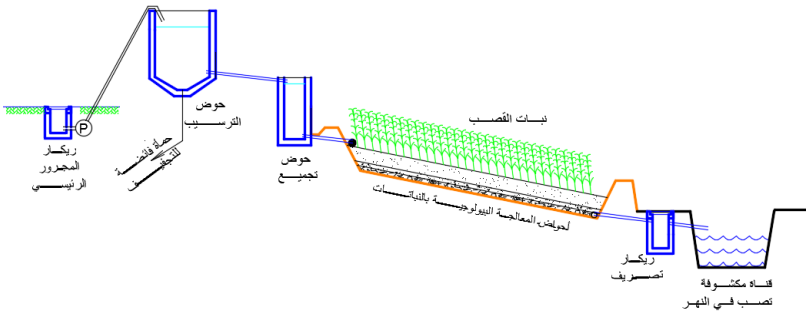
1.3. تصميم المحطة التجريبية:

لقد تم تصميم المحطة التجريبية لمعالجة مياه الصرف الصحي بالنباتات وتنفيذها ضمن حرم كلية الزراعة بجامعة دمشق لتطبيق خطة البحث المقترحة، 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): المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية

وتتألف المحطة التجريبية من المنشآت التالية:

1.1.3.مضخة المياه الأولية إلى خزان التجميع والترسيب:

تم وضع هذه المضخة في ريكار الصرف الصحي بداخل برميل ارتفاعه 55cm، تم تزويده بشقوق طولية على محيطه الخارجي (كل شق طوله 10cm وعرضه 5mm) كما يغطى البرميل بشبك معدني فتحاته 5mm، لمنع دخول المواد العالقة كبيرة الحجم الموجودة في مياه النهر وذلك من أجل تخفيض حمل التلوث في منشأة المعالجة اللاحقة.

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

2.1.3.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 (1-2) 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.

3.1.3.حوض تجفيف الحمأة:

حوض اسمنتي بأبعاد m(1*2) وبعمق m 0.4، تم وضع طبقة من الرمل في أرضية الحوض بسماكة cm 5 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.

4.1.3.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.

5.1.3.أحواض المعالجة بالنباتات:

يبين الشكل (2) أحواض المعالجة بالنباتات السبعة وفقاً لتوضعها ونسبة الخلط في مادة الفلتر.



الشكل (2): أحواض المعالجة بالنباتات.

حيث اعتمد في حساب حقول النباتات:

- على التحميل الهيدروليكي الوارد في الكود المذكور ≤ $6l/m^2.min$
- الفترة الزمنية بين تحميلين متتاليين ≤ 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 بفلتر مطاطي، والثاني بفلتر حصوي، والثالث بفلتر مختلط حصوي–مطاطي)، فبلغت 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.

6.1.3. غرف التفتيش بعد أحواض النباتات:

تم وضع غرف تفتيش على هذه الشبكة بعد أحواض المعالجة بالنباتات وعند التقاء الخطوط مع بعضها وقبل المصب النهائي، وهي مصنوعة من البلاستيك بسعة m30.02، يتم عبرها تحويل المياه الراشحة من أحواض النباتات إلى قناة التجميع النهائية للمياه المعالجة بالإسالة عبر فتح السدات الموجودة ضمنها. وذلك عن طريق تامين فرق منسوب بميل 2% وعبر انابيب مصنوعة من مادة الـ PVC.

7.1.3. شبكة التصريف بعد أحواض النباتات:

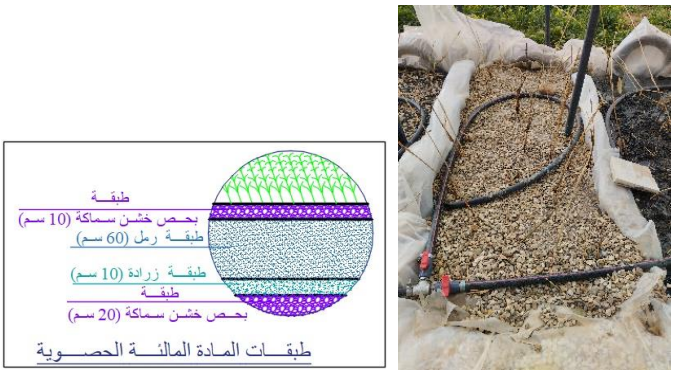
قساطل مادة الـ PVC قطر 3 إنش تجمع المياه من الريكارات إلى قناة بيتونية مكشوفة تنتهي بشبكة الصرف العامة.

2.3. تشغيل المحطة التجريبية

تم تشغيل المحطة وفق مرحلتين أساسيتين:

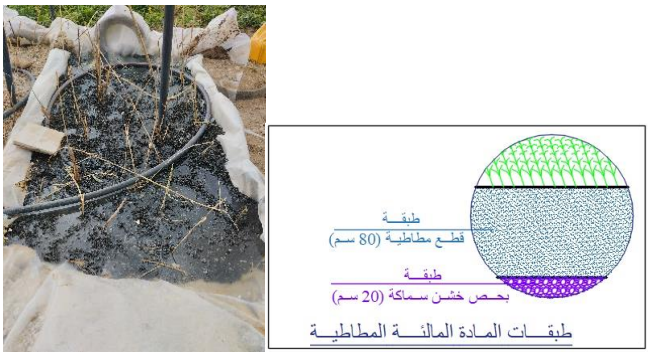
1.2.3. المرحلة الأولى: تم فيها التركيز على دور المادة المالئة ضمن الأراضي الرطبة الصنعية وتحسين أدائها من خلال إيجاد بديل للحصى التقليدي من أجل تخفيف مشاكل الانسداد فيها، فكانت الأحواض ثلاثة أنواع أساسية بحسب مادة الفلتر فهي كما يلي:

1- الحوض ذو الفلتر الحصوي: تم تنفيذ فلتر المعالجة بثلاثة طبقات على التوالي من الأسفل إلى الأعلى، بداية طبقة من الحصى بسماكة cm(20) وتدرج حبي mm(25-10)، ثم طبقة من رمل المازار بسماكة cm(60) بأبعاد حتى mm(0.4) ، وأخيراً طبقة من الحصى بسماكة cm(20)، بأبعاد بين mm(25-10)، ليكون ارتفاع الحوض m(1)، يوضح الشكل (3) الحوض ذو الفلتر الحصوي.



الشكل (3): الحوض ذو الفلتر الحصوي.

2- الحوض ذو الفلتر المطاطي: تم تنفيذ فلتر المعالجة من طبقة من قطع نفايات الإطارات المطاطية بأبعاد بين mm(25-10)، ليكون ارتفاع الحوض m(1)، يوضح الشكل (4) الحوض ذو الفلتر المطاطي.



الشكل (4): الحوض ذو الفلتر المطاطي.

3- الحوض ذو الفلتر المختلط: تم تنفيذ فلتر المعالجة بطبقتين على التوالي من الأسفل إلى الأعلى، بداية طبقة من الحصى بسماكة cm(20) بأبعاد بين mm(25-10)، ثم طبقة من الخليط

المطاطي والحصوي بسماكة cm(60) بأبعاد بين mm(25–10)، ليكون ارتفاع الحوض m(1)، يوضح الشكل (5) الحوض ذو الفلتر المختلط.



الشكل (5): الحوض ذو الفلتر المختلط.

وتراوحت نسبة خلط قطع نفايات الإطارات المطاطية (كاوتشوك) مع المادة الحصوية من 0% (الفلتر الحصوي) حتى 100% (الفلتر المطاطي) وما بينهما 25%، 40%، 50%، 60%، 75% (الفلتر المختلط)، وبذلك حصلنا على سبعة أحواض للمعالجة بالنباتات تبعاً لنسب الخلط السابقة كما هو واضح في الجدول (1).

الجدول (1)– نسب الخلط المعتمدة للمواد المالئة ومكوناتها

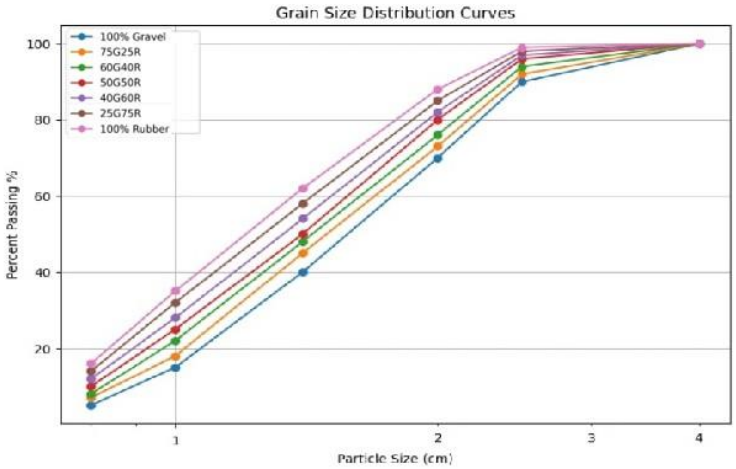
#	1	2	3	4	5	6	7
نسبة الخلط	%0	25%	40%	50%	60%	75%	%100
مكونات المادة المالئة	%100 حصى + %0 كاوتشوك	%75 حصى + %25 كاوتشوك	%60 حصى + %40 كاوتشوك	%50 حصى + %50 كاوتشوك	%40 حصى + %60 كاوتشوك	%25 حصى + %75 كاوتشوك	%0 حصى + %100 كاوتشوك

التحليل الحبي لأوساط الترشيح التجريبية:

يُعد التحليل الحبي من الاختبارات الأساسية المستخدمة لتوصيف المواد المالئة في أحواض المعالجة بالنباتات، لما له من تأثير مباشر على الخصائص الهيدروليكية وكفاءة الترشيح والنفاذية وانتقال الأوكسجين داخل الوسط المسامي.

في هذه الدراسة تم استخدام سبعة أحواض معالجة نباتية تحتوي على خلطات مختلفة من الحصى وقطع الإطارات المطاطية بهدف دراسة تأثير نسبة المطاط على التدرج الحبي وخصائص الوسط المالئ.

وقد تم إجراء تجربة التحليل الحبي لكل خليط من الخلائط السابقة باستخدام مجموعة مناخل قياسية ذات الفتحات التالية: 8mm – 12.5mm –3.75mm–25mm، وتم حساب الأقطار المميزة D10، D30، D50، D60، ويبين الشكل (9) منحنيات التدرج الحبي لأوساط الترشيح السبعة وفق نسب الخلط المتعددة.



الشكل (6): منحني التدرج الحبي لأوساط الترشيح وفق نسب خلط متعددة

ويبين الجدول (2) الأقطار المميزة للحبيبات d10، d30، d50، d60، (القطر الذي تمر منه نسبة 10%، 30%، 50%، 60% من الحبيبات على التوالي)، والتي تعطي تصوراً عن حجم الحبيبات ضمن الوسط وتدرجها فيه وانتظامها من عدمه.

الجدول (2): الأقطار المميزة لحبيبات المادة المالئة من أجل نسب خلط متعددة

100%	75%	60%	50%	40%	25%	0%	R (%)
1.20	1.20	1.20	1.20	1.25	1.28	1.80	**d_{10} (cm)**
1.43	1.47	1.55	1.62	1.68	1.77	1.60	**d_{30} (cm)**
1.83	1.92	2.01	2.10	2.16	2.27	1.24	**d_{50} (cm)**

d_{60} (cm)	0.90	2.58	2.49	2.40	2.30	2.16	2.06

أظهرت النتائج انخفاضاً تدريجياً في قيم الأقطار المميزة مع زيادة نسبة المطاط داخل الوسط المالئ، ويعود ذلك إلى اختلاف الشكل الهندسي والكثافة الظاهرية لقطع المطاط مقارنة بالحبيبات الحصوية.

كما لوحظ أن زيادة نسبة المطاط أدت إلى:

- زيادة عدم انتظام التدرج الحبي.
- ارتفاع المسامية الفعالة.
- تحسن التهوية داخل الوسط.
- زيادة النفاذية الهيدروليكية.

إلا أن الزيادات العالية جداً للمطاط قد تؤثر على الاستقرار الميكانيكي للوسط المالئ نتيجة انخفاض الوزن الحجمي للمادة. فعندما يحتوي الوسط على أحجام متعددة بنسب متقاربة فهذا يدل على إمكانية ملء الفراغات بين الحبيبات الأكبر حجماً بالحبيبات الأقل حجماً واكتناز الوسط وزيادة كثافته وتراصه، هذا المعيار جيد لوسط الترشيح من أجل تأمين سطح أكبر لنمو الغشاء البيولوجي ولكن بعد حد ما يصبح ذو تأثير سلبي على الترشيح بسبب البدء بالانسداد نتيجة تراكم المواد الصلبة وانخفاض مسامية الوسط، لذلك لا بد من تحديد نسبة الخلط المثالية التي تعطي أفضل كفاءة لإزالة الملوثات وأفضل كفاءة لزيادة المسامية وتخفيف الانسداد مع الزمن.

2.2.3.المرحلة الثانية: تم التركيز في هذه المرحلة على نوع النبات ودوره في عملية المعالجة ضمن الأراضي الرطبة الصنعية. تم فيها اعتماد المادة المالئة ذات نسبة الخلط الأمثل في المرحلة الأولى، وإنشاء ثلاثة أحواض: الأول مزروع بنبات القصب فقط والثاني بنبات الزينة فقط، والثالث مزروع بنباتي القصب والزينة، ليتم بذلك دراسة إمكانية إنتاج أنواع أخرى من النباتات لتحسين المناظر الجمالية عند مصبات مياه الصرف الصحي والأراضي الرطبة الصنعية ودراسة إمكانية استخدام بعض نباتات الزينة المحلية لمعالجة مياه الصرف الصحي ضمن الأراضي الرطبة الصنعية وعند مصبات مياه الصرف الصحي كما هو واضح في الشكل (7).



الشكل (7): المحطة التجريبية في بداية المرحلة الثانية

وقد تم اختيار نوعين من نباتات الزينة المحلية ليتم اعتمادها في المرحلة الثانية من هذا البحث وهي:

O نبات الجهنمية المعروف علميًا باسم Bougainvillea: هو نبات زينة شائع ينتمي إلى العائلة القلبية (Nyctaginaceae) يتميز هذا النبات بجمال أوراقه القنابية الملونة التي تشبه الأزهار، مما يجعله خياراً مفضلاً لتزيين الحدائق والأسوار. ويفضل نبات الجهنمية المناخ الحار والجاف ويتحمل الحرارة العالية، وينمو جيداً في التربة الرملية أو الطينية جيدة التصريف، كما أنه يتحمل الجفاف.

إن أنواع البوغانفيليا (الجهنمية)، هي نباتات فعالة للغاية ومتسامحة مع التلوث تُستخدم في المعالجة النباتية لعلاج مياه الصرف، لا سيما في الأراضي الرطبة الصناعية (CWs). وهي قادرة على إزالة المعادن الثقيلة والملوثات والمغذيات من الحمأة الناتجة عن مياه الصرف، وتتأقلم جيدًا مع البيئات ذات التلوث العالي. (Kazem Esmaili et al.,2019)

وبالتالي فإن هذا النبات بمواصفاته التكيفية مع مختلف البيئات قادر على التأقلم مع المناخ المحلي لبدنا وبنفس الوقت يمكنه النمو ضمن الأراضي الرطبة الصنعية ويضفي عليها جمالاً أخَّاذاً.



الشكل (8): نبات الجهنمية

O نبات أم كلثوم المعروف علميًا باسم Lantana camara: هو نبات زينة ينمو في الأوعية لكنه يحتاج إلى مصدر رطوبة، ويمكن ذلك من خلال وضع النبتة فوق طبق فيه ماء وصخور، وهو الأكثر انتشاراً في بيئتنا. ولا تحتاج الشجرة للكثير من العناية، فقط الحفاظ على التقليم والتعريض للضوء، وتكتفي شجرة لانتانا بالتعرض لأشعة الشمس لبضع ساعات فترة الظهيرة.

تعتبر لانتانا كامارا نباتاً فعالاً ومنخفض التكلفة لمعالجة مياه الصرف، خاصة من خلال استخدامه في المعالجة النباتية (استخدام النباتات الحية لتنقية المياه/التربة) وكمادة ممتصة حيوية. وباعتباره من نباتات الزينة، فهو قوي ويمكن ريّه بمياه الصرف المعالجة، مما غالباً ما يحسن نموه وتزهيره (Siyar R et al.,2019).



الشكل (9): نبات لانتارا كامارا (أم كلثوم)

3.2.3.خطة الاعتيان

تم وضع خطة اعتيان تتضمن أماكن جمع العينات وهي:

- من خزان مياه الصرف الصحي الخام.
- من خزان التوزيع بعد حوض الترسيب الأولي.
- من غرف التفتيش بعد أحواض النباتات الثلاثة.

وقد تم بناء على الدراسات السابقة تحديد الملوثات المراد تحديد تراكيزها، ومراقبة تغيراتها ضمن المياه. وتحديد البارامترات اللازمة وهي: (COD, BOD, TSS, NH_4^+, NO_3^-, Po_4^{-3}) إضافة إلى قياس مسامية الوسط وذلك للمرحلتين الأولى والثانية، ومن ثم تقييم هذه النتائج لتحديد جدوى استخدام المادة المالئة المقترحة في رفع كفاءة الأراضي الرطبة الصنعية.

4. النتائج

1.4. التجارب الحقلية ونتائج المرحلة الأولى

تم قياس المسامية حقلياً خلال فترة التجربة اتباع الخطوات التالية لتحديد المسامية في الموقع:

-جمع عينة من وسط الترشيح.

-قياس الحجم الكلي للعينة:(V_{total})

-قياس حجم الماء اللازم لملء الفراغات:(V_{water})

-حساب المسامية (n) باستخدام الصيغة:

$$n = V_{water} / V_{total}$$

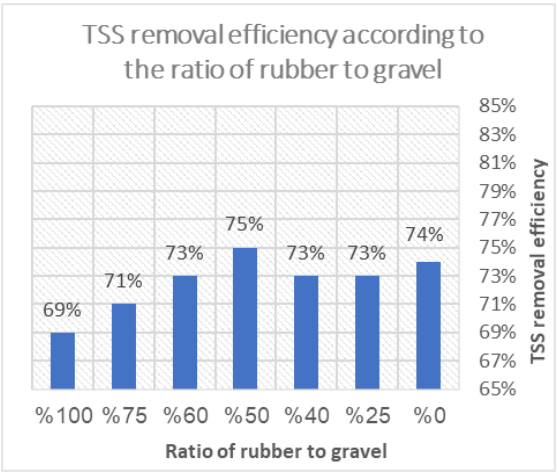
وتم قياس مؤشرات التلوث قبل وبعد أحواض المعالجة بالنباتات وفق خطة الاعتيان من خلال تحليل المياه مخبرياً وتم استخلاص النتائج الموضحة في الجدول (3).

الجدول (3): قيم إزالة الملوثات والمسامية من أجل نسب خلط متعددة

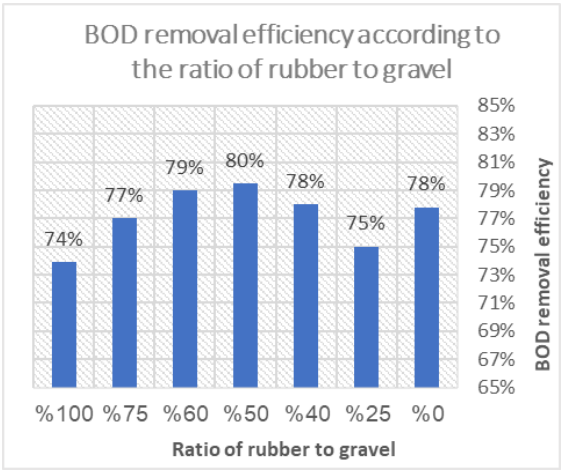
R%	TSS rem	BOD rem	COD rem	NH4 rem	NO3 rem	PO4 rem	Porosity Red

حصى 100% + مطاط 0%	%74	%78	%72	%62	%38	%36	%40
حصى 75% + مطاط 25%	%73	%75	%73	%62	%40	%36	%32
حصى 60% + مطاط 40%	%73	%78	%72	%62	%42	%39	%28
حصى 50% + مطاط 50%	%75	%80	%74	%63	%44	%58	%24
حصى 40% + مطاط 60%	%73	%79	%74	%62	%46	%62	%24
حصى 25% + مطاط 75%	%71	%77	%72	%58	%42	%66	%23
حصى 0% + مطاط 100%	%69	%74	%67	%57	%38	%66	%20

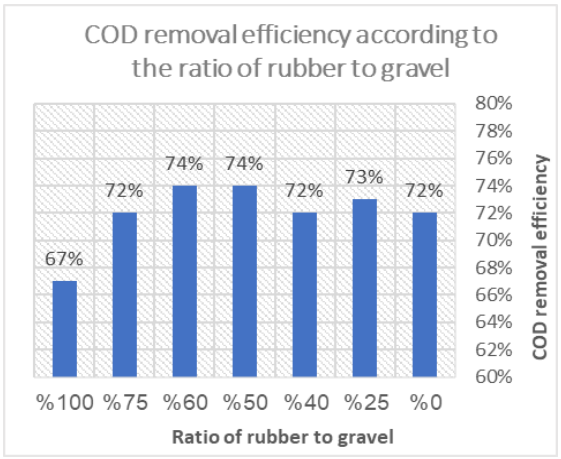
وتوضح الأشكال 10، 11، 12، 13، 14، 15 قيم نسبة إزالة TSS، BOD، COD، NH_4^+، NO_3^-، PO_4^{-3} على التوالي من أجل نسب الخلط لنفايات قطع الإطارات المطاطية إلى الحصويات: (100% حصى، 75% حصى + 25% مطاط، 60% حصى + 40% مطاط، 50% حصى + 50% مطاط، 40% حصى + 60% مطاط، 25% حصى + 75% مطاط، و100% مطاط).



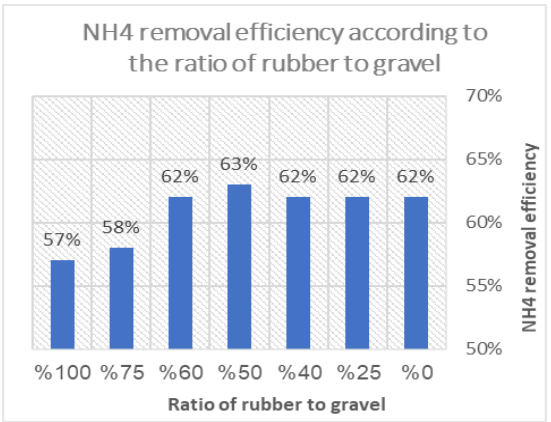
الشكل (10): نسب إزالة TSS الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات



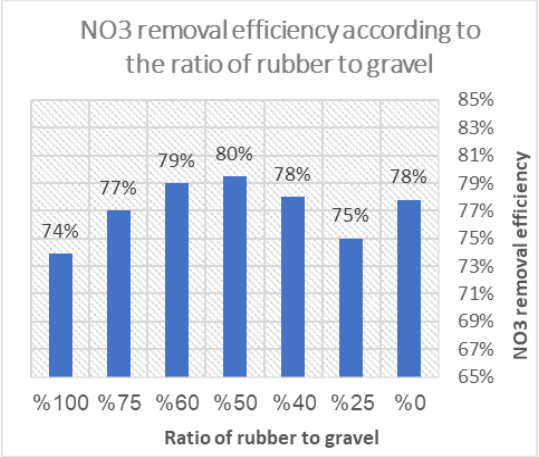
الشكل (11): نسب إزالة BOD الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات



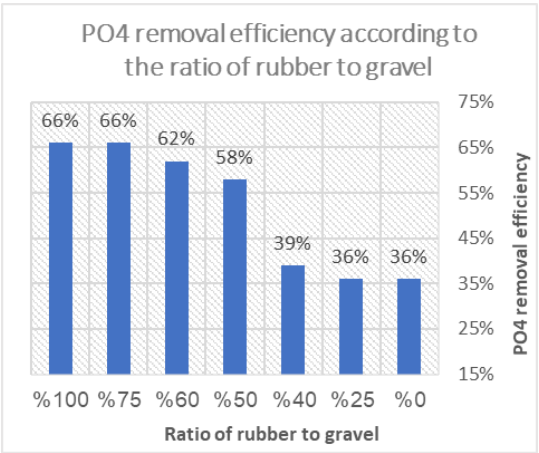
الشكل (12): نسب إزالة COD الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات



الشكل (13): نسب إزالة NH4 الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات



الشكل (14): نسب إزالة NO3 الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات

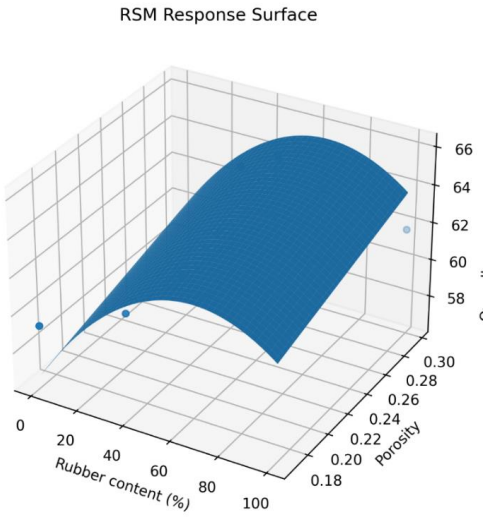


الشكل (15): نسب إزالة PO4 الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات

2.4. تحديد نسبة الخلط المثلى:

تم التحليل من خلال برنامج التحليل الاحصائي Response Surface Mythology / (RSM) الذي يقوم بإنشاء سطح استجابة رياضي يربط بين (نسبة الخلط، المسامية، كفاءة الإزالة)، فبمجرد جمع البيانات من خلال التجارب العملية، يتم إجراء تحليل الانحدار لتأسيس علاقة رياضية بين متغيرات الإدخال والاستجابة.

وبذلك قام البرنامج بإنشاء سطح الاستجابة للمتغيرات التي تم إدخالها والحصول على منحني سطح الاستجابة الموضح في الشكل (16).



الشكل (16): سطح الاستجابة وفق برنامج التحليل الاحصائي (RSM)

أظهر منحني سطح الاستجابة أن نسبة الخلط بين 50–60% من قطع الإطارات المطاطية و40–50% من الحصى الموافقة للقيم العظمى تمثل المجال التشغيلي الأمثل للوسط المالئ. وقد ارتبط هذا المجال بمسامية تتراوح بين 0.25–0.27، مما أدى إلى تحقيق أعلى كفاءة إزالة مجمعة للملوثات العضوية والمواد المغذية مع المحافظة على الاستقرار الهيدروليكي وتقليل الانسداد في الوسط المسامي.

وتشير نتائج دالة الرغبة (Desirability Function) إلى أن الخلطة 40% حصى + 60% مطاط حققت أفضل أداء كلي بين جميع الخلطات المدروسة، ويوضح الجدول (4) نتائج التحليل السابقة.

الجدول (4): المجالات المثالية لنسب الخلط وفق تحليل (RSM)

العامل	المجال الأمثل	مركز المجال (القيمة المثلى الوسطية)
نسبة المطاط	55–65%	60%

نسبة الحصى	35–45%	40%
المسامية	0.25–0.27	0.26

3.4. التجارب الحقلية ونتائج المرحلة الثانية

خلال فترة تشغيل بلغت 125 يوماً تم اختبار نوعين من نباتات الزينة المحلية إلى جانب نبات القصب التقليدي وزرعها ضمن ثلاثة أحواض بمادة مالئة وفق نسبة الخلط المثالية التي سيتم استنتاجها في المرحلة الأولى (60%)، بحيث تمت زراعة الحوض الأول بنبات القصب والحوض الثاني بنباتات الزينة والحوض الثالث بنباتات مختلطة من القصب والزينة.

تظهر النتائج في الجدول (5) تطور كفاءة إزالة الملوثات بالتزامن مع التغيرات الحاصلة في المسامية داخل الوسط المالئ.

الجدول (5): قيم المؤشرات قبل وبعد حوض نبات القصب

اليوم	نسبة إزالة TSS	نسبة إزالة BOD	نسبة إزالة COD	نسبة إزالة NH4	نسبة إزالة NO3	نسبة إزالة PO4	نسبة انخفاض المسامية
1	26%	47%	56%	19%	19%	12%	0.0%
15	38%	50%	54%	20%	24%	15%	1.0%
30	40%	54%	54%	32%	23%	31%	3.1%
37	45%	55%	52%	38%	26%	31%	5.1%
65	46%	57%	52%	46%	34%	44%	10.2%
80	50%	60%	55%	53%	34%	48%	13.3%
103	51%	66%	57%	58%	37%	53%	15.3%
110	53%	67%	61%	61%	36%	52%	16.3%
125	**53%**	**69%**	**62%**	**61%**	**43%**	**55%**	**20.5%**

يبين الجدول (6) تطور أداء حوض نباتات الزينة المحلية المزروع بالجهنمية وأم كلثوم خلال المرحلة الثانية التي امتدت إلى 125 يوماً، حيث تمت متابعة كفاءة إزالة الملوثات العضوية والمغذيات إضافة إلى تطور المسامية داخل الوسط المالئ المختلط. وتظهر النتائج تحسناً تدريجياً في معظم المؤشرات مع تقدم فترة التشغيل واستقرار النظام البيولوجي داخل الحوض.

الجدول (6): قيم المؤشرات قبل وبعد حوض نبات الزينة

اليوم	نسبة إزالة TSS	نسبة إزالة BOD	نسبة إزالة COD	نسبة إزالة NH4	نسبة إزالة NO3	نسبة إزالة PO4	نسبة انخفاض المسامية
1	14%	47%	55%	19%	19%	14%	0.0%
15	31%	49%	53%	21%	25%	23%	1.0%
30	37%	51%	51%	29%	23%	27%	2.0%
37	40%	51%	47%	36%	26%	33%	7.1%
65	39%	54%	49%	49%	28%	46%	13.3%
80	40%	54%	50%	51%	34%	48%	16.3%
103	46%	62%	55%	53%	33%	50%	17.3%
110	50%	67%	56%	49%	34%	52%	18.4%
125	**51%**	**68%**	**57%**	**57%**	**37%**	**55%**	**18.4%**

يبين الجدول (7) تطور أداء الحوض المزروع بمزيج من نبات القصب ونباتات الزينة المحلية خلال المرحلة الثانية التي امتدت إلى 125 يوماً، وتظهر النتائج أن هذا الحوض حقق أفضل أداء بين جميع الأحواض النباتية المدروسة من حيث إزالة الملوثات والمحافظة على الاستقرار الهيدروليكي، مما يشير إلى وجود تأثير تكاملي (Synergistic Effect) بين الأنواع النباتية المختلفة داخل النظام.

الجدول (7): قيم المؤشرات قبل وبعد حوض نبات المختلط

اليوم	نسبة إزالة TSS	نسبة إزالة BOD	نسبة إزالة COD	نسبة إزالة NH4	نسبة إزالة NO3	نسبة إزالة PO4	نسبة انخفاض المسامية
1	21%	53%	58%	17%	21%	17%	0.0%
15	36%	57%	57%	23%	25%	26%	1.0%
30	43%	60%	58%	39%	23%	36%	4.1%
37	44%	60%	55%	40%	32%	42%	7.1%
65	47%	62%	55%	47%	33%	51%	13.3%
80	49%	65%	55%	51%	38%	55%	15.3%
103	53%	67%	60%	58%	37%	56%	16.3%
110	54%	71%	64%	59%	36%	55%	18.4%
125	**57%**	**75%**	**65%**	**65%**	**46%**	**58%**	**18.4%**

5. تحليل النتائج ومناقشتها:

أولاً– تأثير نسب الخلط على الأداء الهيدروليكي:

– أدى إدخال قطع الإطارات المطاطية إلى زيادة المسامية الفعالة للوسط المالئ مقارنة بالوسط الحصوي التقليدي.

– ازدادت المسامية تدريجياً من (0.167) في الوسط الحصوي الخالص إلى (0.297) في الوسط المطاطي.

– ساهمت زيادة محتوى المطاط في خفض معدلات الانسداد وتحسين النفاذية الهيدروليكية.

– انخفضت نسبة انخفاض المسامية من (39.7%) في الوسط الحصوي إلى حوالي (20%) فقط في الوسط المطاطي، مما يشير إلى قدرة أعلى على مقاومة الانسداد طويل الأمد.

ثانياً – تأثير نسب الخلط على إزالة الملوثات:

أظهرت النتائج أن نسب الخلط المختلفة تؤثر بصورة متفاوتة على إزالة الملوثات المختلفة:

– تراوحت كفاءة إزالة المواد الصلبة العالقة (TSS) بين 69–74.5%. حيث سجلت المادة المالئة بنسبة خلط 0% أعلى إزالة بنسبة 74.5% بسبب كثافة الوسط والمساحة السطحية الأعلى لترسيب المواد المعلقة ولكن هذا الوسط بنفس الوقت أصبح أكثر عرضة للانسداد، ولم يكن لزيادة المطاط فوق 60% تأثير إيجابي إضافي على إزالة TSS.

– حققت الخلطات المحتوية على 40–60% مطاط أعلى كفاءة إزالة للمواد العضوية (BOD, COD) حيث بلغت أعلى إزالة للـ BOD حوالي 80%، وبلغت أعلى إزالة للـ COD حوالي 74%. وتشير هذه النتائج إلى وجود نسبة خلط مثلى تحقق توازناً بين المساحة السطحية البيولوجية والكفاءة الهيدروليكية.

– ازدادت إزالة الأمونيوم NH_4^+

– تدريجياً مع زيادة المطاط حتى حدود 50–60% حيث بلغت أعلى إزالة للأمونيوم حوالي 63% وأظهرت إزالة النترات NO_3^- أعلى قيمها عند الخلطات الغنية نسبياً بالمطاط (40–60%)، وتعزى هذه النتائج إلى تحسن ظروف انتقال الأكسجين وتقليل الانسداد داخل الوسط المالئ.

– أظهرت إزالة الفوسفات (PO_4^{-3}) أعلى ارتباط بزيادة نسبة المطاط. فقد ارتفعت كفاءة الإزالة من 36% في الوسط الحصوي إلى 66% في الوسط المطاطي، ويعود ذلك بشكل رئيسي إلى 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 للقطع 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:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$$

$$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^{+} \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O$$

$$Fe^{+3} + PO_4^{-3} \rightarrow FePO_4$$

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

ثالثا – أداء النباتات ضمن أحواض المعالجة:

– حقق حوض النباتات المختلط (القصب + نباتات الزينة المحلية) أفضل أداء بين جميع الأحواض النباتية بتسجيله أعلى نسب إزالة للملوثات العضوية والمغذيات.

– أدى التنوع النباتي إلى تحسين التهوية الجذرية وزيادة التنوع الميكروبي داخل الوسط المالئ.

– من ناحية ثانية فقد أسهمت الجذور المختلفة في تحسين توزيع الجريان وتقليل الانسداد.

– إن استخدام نباتات الزينة ضمن محطات المعالجة بالنباتات أدى إلى تحسين المشهد البصري العام، وزيادة القبول الاجتماعي للأراضي الرطبة الصنعية ومواقع مصبات الصرف الصحي.

– ساهم استخدام نباتات الزينة ضمن احواض المعالجة في دمج المحطة ضمن البيئة المحيطة ومكوناتها، مما يساهم في تعزيز الاستدامة البيئية والجمالية.

– ساهمت نباتات الزينة المستخدمة للمعالجة ضمن الأراضي الرطبة الصنعية في جذب الفراشات والحشرات النافعة والطيور التي تتغذى على الكائنات الضارة.

رابعاً – التحليل الحبي وتحديد نسبة الخلط المثالية:

اتضح من دراسة التحليل الحبي السابقة للمواد المالئة المستخدمة في البحث ما يلي:

– أظهرت خلطات المطاط والحصى تدرجاً حبيبياً مقبولاً للاستخدام في أحواض المعالجة بالنباتات.

– ازدادت مسامية المادة المالئة بزيادة نسبة قطع نفايات الإطارات المطاطية (الكاوتشوك).

– أثبتت قطع نفايات الإطارات المطاطية جدواها كمادة مستدامة بديلة جزئياً عن الحصى التقليدي في أنظمة المعالجة البيئية.

– استناداً إلى نتائج التجارب المخبرية وتحليل الاستجابة الإحصائية، (RSM)، تبين أن النسبة المثلى للخلط تقع ضمن المجال: 55%–65%، وتم اعتماد النسبة 60% كنسبة خلط مثالية وفقاً للتدرج الحبي للمواد المالئة المستخدمة، حيث أعطت أفضل توازن بين: إزالة الملوثات، المسامية الأعلى، مقاومة الانسداد والجدوى الاقتصادية.

6. الاستنتاجات والتوصيات:

استناداً إلى نتائج الدراسة، يوصي الباحث بما يلي:

- اعتماد الخلطات المحتوية على 60% قطع نفايات الإطارات المطاطية (الكاوتشوك) في تصميم الأراضي الرطبة الصنعية ذات الجريان الشاقولي.
- دراسة تأثير أحجام مختلفة من قطع الإطارات على الأداء الهيدروليكي والإزالة الحيوية.
- تقييم إمكانية تحرير العناصر أو المركبات الكيميائية من الإطارات المعاد تدويرها خلال التشغيل طويل الأمد.
- دراسة أداء نفايات الإطارات المطاطية كمادة مالئة في الأراضي الرطبة الصنعية ذات الجريان الأفقي أو المختلط (أفقي–شاقولي).
- اعتماد نباتات أخرى إضافة للقصب، كنباتات الزينة المحلية التي تساهم في إيجاد تنوع حيوي وتوزع جذري أفضل ضمن وسط الترشيح يزيد من كفاءة المعالجة فضلاً عن المنظر الجمالي الذي يضفيه على مواقع مصبات الصرف الصحي.
- تشجيع الجهات البيئية والبلديات على دمج مفهوم الاقتصاد الدائري في مشاريع معالجة مياه الصرف وإعادة تدوير النفايات الصلبة.
- دراسة تأثير درجات الحرارة الموسمية.

- تقييم الاستقرار طويل الأمد لقطع الإطارات داخل النظام وهذا يتطلب وقتاً طويلاً قد يتجاوز مدة بحث رسالة علمية.
- وأخيراً فقد أكدت هذه الدراسة أن قطع الإطارات المطاطية المعاد تدويرها تمثل بديلاً واعداً ومستداماً للحصى في الأراضي الرطبة الصنعية ذات الجريان الشاقولي تحت السطحي. وقد أثبتت النتائج أن دمج المطاط مع الحصى يحسن الخصائص الهيدروليكية للوسط المالئ، ويحد من ظاهرة الانسداد، ويحافظ على كفاءة مرتفعة لإزالة الملوثات العضوية والمغذيات. كما أن دمج نباتات القصب بنباتات الزينة قد ساهم بتعزيز تلك الكفاءة وأضفى منظراً أكثر جمالية في موقع المعالجة.

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

3 - 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./

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

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

6 - كال، روضة، (2024). دراسة تحليلية لمعالجة مياه الصرف الصحي في الأراضي الرطبة المصطنعة باستخدام النمذجة الحاسوبية، كلية الهندسة المدنية، جامعة حلب.

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

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

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

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

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

13- 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

14- 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.

15- Calheiros, C. S., Bessa, V. S., Mesquita, R. B., Brix, H., (2015). Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. Ecological Engineering, 79, 1-7.

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

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

18- Leiva, A. M., Núñez, R., Gómez, G., López, D., & Vidal, G. (2018). Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater. Ecological engineering, 120, 116-125.

19- 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.

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.

28- Macci, C., Peruzzi, E., Doni, S., Iannelli, R., (2014). Ornamental plants for micropollutant removal in wetland systems. Environmental Science and Pollution Research, 406-415.

29- Zamora S., Rodríguez C., Lambert G., Muñiz G. (2019). Wastewater Treatment by Constructed Wetland Eco-Technology: Influence of Mineral and Plastic Materials as Filter Media and Tropical Ornamental Plants. Water.11(11).

دور حوامل المخلفات الزراعية داخل المفاعل اللاهوائي في تخفيض مساحة الأراضي الرطبة الصنعية باستخدام معادلة كلارك

م. عبدالرحمن مهاجر الجاسم المراد* أ. د. غادة عبدالكريم بلال**
* طالب دكتوراه في قسم الهندسة الصحية والبيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.
abdalrhman55.morad@damascusuniversity.edu.sy
** أستاذ مساعد في قسم الهندسة الصحية والبيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.
ghada.bilal@damascusuniversity.edu.sy

الملخص

يواجه تصميم أنظمة الأراضي الرطبة الصنعية تحديات تتعلق بالحمل العضوي المرتفع وزيادة المساحة اللازمة لتشييد هذه الأراضي. يقدم هذا البحث منهجية تقنية متكاملة لرفع كفاءة معالجة مياه الصرف الصحي وتخفيض المساحات المطلوبة للتشييد، من خلال دمج المفاعل اللاهوائي (Septic Tank) المزود بحوامل بيولوجية طبيعية (قشور اللوز والجوز) كمرحلة معالجة أولية.

تضمنت المنهجية البحثية ثلاثة مسارات رئيسية، بدايةً دراسة أثر نسب الملء (5%، 10%، 15%) لقشور اللوز المنشطة على كفاءة إزالة الملوثات (COD, BOD, TSS)؛ ومن ثم مقارنة الأداء البيولوجي للنسبة المثلى لقشور اللوز المنشطة مع قشور الجوز المنشطة؛ وأخيراً، تقييم دور التنشيط الفيزيائي عبر مقارنة أداء قشور الجوز المنشطة بنظيرتها الخام. واستُكملت الدراسة بتوظيف نموذج كلارك لربط كفاءة الإزالة الحركية بالمساحة السطحية المطلوبة (A) لتشييد الأرض الرطبة.

أظهرت النتائج التجريبية أن قشور الجوز المنشطة بنسبة ملء 10% حققت أفضل كفاءة إزالة بيولوجية، مما أدى إلى خفض الحمل العضوي الوارد للأرض الرطبة بشكل جوهري. وبناءً على التحليل الرياضي باستخدام معادلة كلارك، تبين أن هذا التحسن التقني انعكس إيجاباً على التصميم الهيدروليكي، حيث أدى إلى تخفيض المساحة السطحية المطلوبة لتشييد الأرض الرطبة بنسبة بلغت 36% مقارنة بالنظام التقليدي بدون حوامل.

تخلص الدراسة إلى أن دمج المخلفات الزراعية في المفاعل اللاهوائي (Septic Tank) لا يمثل فقط حلاً بيئياً لإعادة تدوير النفايات وتخفيض الحمل العضوي، بل يشكل استراتيجية تصميمية فعالة لتقليل المساحات اللازمة لتشييد الأراضي الرطبة الصنعية، مما يعزز من جدوى تطبيق أنظمة الأراضي الرطبة في المناطق المحدودة الموارد.

الكلمات المفتاحية: المفاعل اللاهوائي، المخلفات الزراعية، التنشيط الفيزيائي، نموذج كلارك، الأراضي الرطبة الصنعية.

The Role of Agricultural Waste Carriers Within the Anaerobic Bioreactor in Reducing the Footprint of Constructed Wetlands Using Clark's Equation

Abdalrhman Muhajer Aljasem Almorad * Ghada Abdalkarim Bilal **
* PhD student in Department of Environmental and Sanitary Engineering – Faculty of Civil Engineering – Damascus University.
abdalrhman55.morad@damascusuniversity.edu.sy
** Assistant professor in Department of Environmental and Sanitary Engineering – Faculty of Civil Engineering – Damascus University.
ghada.bilal@damascusuniversity.edu.sy

Abstract

Designing constructed wetland (CW) systems faces challenges related to high organic loading rates and the substantial land area required for construction. This research presents an integrated technical methodology to enhance wastewater treatment efficiency and reduce the required footprint by incorporating an anaerobic reactor (septic tank) equipped with natural biological carriers (almond and walnut shells) as a primary treatment stage.

The research methodology comprised three primary tracks: first, investigating the effect of filling ratios (5%, 10%, and 15%) of activated almond shells on pollutant removal efficiency (COD, BOD, TSS); second, comparing the biological performance of the optimal almond shell ratio with activated walnut shells; and finally, evaluating the role of physical activation by comparing the

performance of activated walnut shells against their raw counterparts. The study was complemented by employing the Clark Model to correlate first-order removal kinetics with the required surface area (A) for wetland construction.

Experimental results demonstrated that activated walnut shells at a 10% filling ratio achieved the highest biological removal efficiency, substantially reducing the organic load entering the wetland. Based on mathematical analysis using the Clark equation, it was determined that this technical enhancement positively impacted the hydraulic design, resulting in a 36% reduction in the required surface area for the constructed wetland compared to a conventional system without carriers.

The study concludes that integrating agricultural waste into anaerobic reactors serves not only as an environmental solution for waste recycling and organic load reduction but also as an effective design strategy to minimize the footprint of constructed wetlands, thereby enhancing the feasibility of implementing wetland systems in resource-limited regions.

Keywords: Anaerobic Reactor, Agricultural Waste, Physical Activation, Clark Model, Constructed Wetlands.

1- المقدمة:

يعتبر السليلوز $(C_6H_{10}O_5)_n$ المكون الليفي الرئيسي للمخلفات الزراعية، وهو عبارة عن بوليمر مُكون من وحدات جلوكوز مرتبطة، يشكل مجموعات بلورية قوية نتيجة تركيبه الكيميائي وله درجة عالية من الترابط الهيدروجيني (Wertz et al., 2010). تتكون المخلفات الزراعية أيضاً من اللجنين، الهيميسيلولوز، المستخلصات، الدهون، البروتينات، السكريات البسيطة، النشويات، الماء، الهيدروكربونات والرماد (Sud et al., 2008).

من أهم تطبيقات المعالجة النباتية فضلاً عن الأراضي الرطبة الطبيعية هي المعالجة بالأراضي الرطبة الصنعية، وهي محطات معالجة تُصمم هندسياً وتتكون من الغطاء النباتي والتربة والكائنات الدقيقة، تكون أحواض المعالجة في هذه الأنظمة مملوءة بوسط حصوي أو رملي أو مزيج من هما معاً على شكل طبقات بحيث تكون فلتر المعالجة، وتتضمن عمليات معقدة تشمل آليات فيزيائية وكيميائية وبيولوجية لإزالة الملوثات المختلفة أو تحسين جودة المياه (Vymazal et al., 2008).

تتلخص فكرة البحث في الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (مفاعل لاهوائي مزود بحوامل بيولوجية كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي الخام.

2- مشكلة البحث وأهميته:

تتمثل الإشكالية الرئيسة في الانتشار الواسع لمصبات مياه الصرف الصحي العشوائية في التجمعات الريفية السورية وتأثيراتها البيئية الضارة، يضاف إلى ذلك التحديات التقنية والاقتصادية المرتبطة بأنظمة الأراضي الرطبة الصنعية، والتي تتطلب مساحات واسعة وتواجه مخاطر الانسداد نتيجة قصور المعالجة الأولية. انطلاقاً من ذلك، تبرز أهمية هذا البحث في تقديم حل تكاملي يعتمد على دمج المفاعل اللاهوائي المزود بحوامل بيولوجية من المخلفات الزراعية السليلوزية (كقشور اللوز والجوز)؛ حيث تتميز هذه المخلفات بكونها مصادر كربون مسامية ورخيصة الثمن، توفر هيكلاً مثالياً لنمو التجمعات البكتيرية وتدعم إزالة الملوثات عبر الامتزاز بفضل خصائصها الكيميائية (Sud et al., 2008)، مما يسهم في رفع كفاءة المعالجة الأولية، وخفض المساحات المطلوبة للتشييد، وتحقيق جدوى بيئية واقتصادية مستدامة (Dai et al., 2018).

3- هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تقييم كفاءة نظام معالجة هجين لمياه الصرف الصحي وفقاً للظروف المحلية وخطة البحث المقترحة، من خلال تقييم كفاءة المعالجة الأولية في المفاعل اللاهوائي المزود بحوامل المخلفات الزراعية، وكفاءة المعالجة الثانوية في الأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي. واستخدام معادلة كلارك لتحليل العلاقة بين كفاءة المعالجة الأولية والمساحة السطحية اللازمة لتشييد الأراضي الرطبة الصنعية.

4- الدراسات المرجعية:

هناك العديد من الدراسات السابقة التي تطرقت لموضوع معالجة مياه الصرف الصحي عبر المفاعل اللاهوائي والأراضي الرطبة الصنعية وتناولته من زوايا مختلفة، سوف نستعرض جملة من الدراسات التي تم الاستفادة منها مع الإشارة إلى أبرز ملامحها. وقد تنوعت هذه الدراسات بين العربية والأجنبية في الفترة الزمنية بين عامي 2012 و2026 مما يشير إلى تنوعها الزمني والجغرافي.

تم تصنيف الدراسات المرجعية إلى محورين أساسيين:

4-1 المحور الأول: يتضمن ست دراسات مرجعية لتقييم كفاءة استخدام الحوامل البيولوجية الطبيعية في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي، وفق الجدول التالي:

الجدول (1) مصفوفة المحور الأول من الدراسات المرجعية والتجارب العالمية

Reference		Wastewater	Anaerobic Reactor		Biological Carriers	
			Type	V (Liter)	Type	HRT (hour)
1	Vinod et al., 2012	Municipal	Fixed Film Reactor	180	Coffee Husk	(16, 24, 48)
2	Oliveira et al., 2013	Municipal	Anaerobic filter	500	Coconut Shell	9
3	Ali et al., 2016	Municipal	Biological Filter	620	Maize Cob	`14
4	الشلبي وآخرون ، 2020	Municipal	Activated Sludge Aeration Tanks	10	Almond Shell	(4, 5, 6)
5	Guanqi et al., 2024	Municipal	Anaerobic Baffled Reactor	-	Needle-Felt Coir Fibre	14
6	Sanitha et al., 2026	Municipal	Upflow Biofilter Reactor	3	Corncob	-

مبرر اختيار الدراسة (1): تقييم كفاءة استخدم قشور القهوة كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي وتحديد زمن المكث الهيدروليكي الأمثل وفق ثلاثة أزمنة مكث (16,24.48hour).

الاستفادة من الدراسة: توصل الباحثون إلى أن أفضل نسبة إزالة كانت عند زمن مكث 48hour حيث بلغت إزالة COD بنسبة 88-91%، وإزالة نيتروجين الأمونيا بنسبة 70-73% وإزالة الفوسفات بنسبة 91-94% (Vinod et al., 2012).

مبرر اختيار الدراسة (2): تقييم كفاءة استخدم قشور جوز الهند كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: أن استخدام قشور جوز الهند كمادة مالئة في المفاعل اللاهوائي تعد بديلاً منخفض التكلفة مقارنة مع المواد المالئة التقليدية المستخدمة، ووصلت كفاءة إزالة BOD إلى 79% (Olivelra et al., 2013).

مبرر اختيار الدراسة (3): تقييم كفاءة استخدم قولحة الذرة كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: كانت كفاءة الإزالة الوسطية ل BOD و COD تساوي 79% و 75% على التوالي، وسبب هذه الكفاءة العالية هو التطور السريع للبيوفلم خلال أول أسبوعين. وتوصلوا إلى أن المفاعلات المزودة بحوامل المخلفات الزراعية يمكن أن تنشئ محطات معالجة فعالة ذات تكلفة منخفضة في البلدان النامية (Ali et al., 2016).

مبرر اختيار الدراسة (4): تقييم كفاءة استخدم قشور اللوز كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي وتحديد زمن المكث الهيدروليكي الأمثل وفق ثلاثة أزمنة مكث (4,5.6hour)، وتحديد نسبة الملء المثلى وفق ثلاثة نسب (5،7،10)% من حجم حوض التهوية بالحماة المنشطة.

الاستفادة من الدراسة: تم الحصول على أفضل كفاءة إزالة 93% و 92% لكل من COD و SS على التوالي، عند زمن مكث 5hour ونسبة ملء 7% من حجم حوض التهوية بالحماة المنشطة (الشلبي وآخرون.، 2020).

وعلى الرغم من النتائج المتميزة التي حققتها هذه الدراسة في بيئة هوائية، إلا أن بحثنا الحالي يتوسع في دراسة أثر استخدام هذه الحوامل في المفاعل اللاهوائي (Septic Tank) كمرحلة معالجة أولية تسبق الأراضي الرطبة، وذلك لتقييم كفاءة التخفيض في الحمل العضوي في ظروف لاهوائية مختلفة تماماً عن بيئة التهوية.

مبرر اختيار الدراسة (5): تقييم كفاءة استخدم ألياف جوز الهند كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: تم الحصول على كفاءة إزالة بلغت 66% للطلب الكيميائي للأوكسجين (COD) و70% للمواد الصلبة العالقة (TSS). وأرجع الباحثون هذا الأداء إلى المسامية العالية والمساحة السطحية الكبيرة لألياف جوز الهند التي وفرت بيئة مناسبة لنمو الأغشية الحيوية واحتجاز الكتلة الحيوية داخل المفاعل، مما يدل على إمكانية استخدام المخلفات الزراعية الطبيعية كبديل منخفض التكلفة للحوامل الصناعية في أنظمة المعالجة اللاهوائية (Guanqi et al., 2024).

مبرر اختيار الدراسة (6): تقييم كفاءة استخدم كيزان الذرة كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي مع المقارنة في كفاءة المعالجة عند استخدام المفاعل بدون حوامل.

الاستفادة من الدراسة: أظهرت النتائج أن استخدام كيزان الذرة أدى إلى تعزيز نمو الكتلة الحيوية نتيجة الخصائص اللجنوسليلوزية والمسامية العالية للمادة الحاملة، حيث تم تخفيض زمن إقلاع النظام بنسبة 64% مقارنة مع المفاعل بدون حوامل، كما أكدت الدراسة فعالية المخلفات الزراعية الطبيعية في تحسين أداء المفاعلات البيولوجية من خلال توفير وسط ملائم لتثبيت الكائنات الدقيقة (Sanitha et al., 2026).

<u>الخلاصة من الدراسات المرجعية:</u> بينت هذه الدراسات إمكانية استخدام أنواع عديدة من الحوامل البيولوجية في معالجة مياه الصرف الصحي بسبب تشكل العشاء البيولوجي (Biofilm) عليها. كما إن استخدام المخلفات الزراعية كحوامل لها دور إيجابي في إزالة أنواع عديدة من الملوثات وهي تعد مصدر كربون للبكتيريا، كما أنها تتميز بقدرتها على امتصاص الماء فيسهل بذلك عملية الالتصاق الخلوي وتكاثر الخلايا البكتيرية وبالتالي تقلل من الزمن اللازم لتشغيل نظام المعالجة، **وبعد الاطلاع على التجارب العالمية** سيتم الاعتماد على قشور اللوز كحوامل بيولوجية في المفاعل اللاهوائي وتقييم كفاءة المعالجة.

4-2 المحور الثاني: يشمل ست دراسات مرجعية لتقييم كفاءة استخدام المفاعل اللاهوائي مع الأراضي الرطبة الصنعية في معالجة مياه الصرف الصحي، وفق الجدول التالي:

الجدول (2) مصفوفة المحور الثاني من الدراسات المرجعية والتجارب العالمية

Reference		Wastewater	Anaerobic Reactor		Constructed Wetland		
			Type	HRT (hour)	Type Flux	Plant Specie	Filling Media
1	Thanh et al., 2014	Municipal	ST	18	HSF	Melampodium	Gravel, Sand
2	Merino et al., 2015	Municipal	UAF	(18, 28, 48)	HSF	Canna	Tezontle
3	Abdel-Shafy et al., 2017	Municipal	ST	24	HSF+VSF	Phragmites	Gravel
4	Decezaro et al., 2018	Municipal	ST	20	VSF	Psittacorum	Gravel
5	Marta et al., 2023	Municipal	HUSB + AF	(9, 14)	VSF	Iris pseudacorus	Gravel, Sand
6	Satyendra et al., 2024	Municipal	ABR	(12, 18, 24)	Up-flow	Typha, Canna	ACC

مبرر اختيار الدراسة (1): التركيز على تقييم مدى مطابقة مخرجات النظام المدمج مع اللوائح الفنية والمعايير الوطنية الفيتنامية.

الاستفادة من الدراسة: إن استخدام هذه التقنية قادر على تلبية المعايير المطلوبة للمسطحات المائية، حيث توافقت مواصفات المياه المعالجة مع الحدود القياسية للوائح الفنية الوطنية الفيتنامية لمياه الصرف الصحي المنزلية. إذ كان متوسط كفاءة إزالة COD بنسبة 78% وإزالة المغذيات قد تحققت إلى حد كبير من خلال إزالة TN بنسبة 84% وإزالة TP بنسبة 72% (Thanh et al., 2014).

مبرر اختيار الدراسة (2): دراسة جدوى استخدام المفاعل (UAF) كحاجز وقائي لمنع حدوث انسدادات في وسط الفلتر (Clogging) في الأراضي الرطبة.

الاستفادة من الدراسة: إن استخدام مفاعل UAF كمعالجة مسبقة للأراضي الرطبة الصنعية تلافى دخول وتراكم كميات من المواد الصلبة العالقة على وسط الفلتر، وبالتالي منع حدوث الانسدادات. حيث كان المفاعل اللاهوائي مسؤولاً عن إزالة معظم المواد العضوية (من 50% إلى 80%)، في حين وصلت نسبة الإزالة إلى 89% في نظام المعالجة بالكامل (Merino et al., 2015).

مبرر اختيار الدراسة (3): استعراض الأداء التقني والبيئي للأنظمة المدمجة (الهجينة) في المناطق القاحلة وشبه القاحلة، مع التأكيد على البعد الاقتصادي (منخفضة التكلفة).

الاستفادة من الدراسة: أن المعالجة عبر الاراضي الرطبة الهجينة والمخمر اللاهوائي توفر بديلاً منخفض التكلفة لمعالجة مياه الصرف الصحي، وذلك وفقًا لمناخ أفريقيا والشرق الأوسط والمناطق القاحلة وشبه القاحلة. ويمكن تنفيذ هذا النظام من المعالجة بسهولة إذا كانت مساحة الأرض متاحة. إذ وصلت كفاءة المعالجة إلى 90%، 96%، و94% لـ TSS، BOD، وCOD، على التوالي (Abdel-Shafy et al., 2017).

مبرر اختيار الدراسة (4): تقييم قابلية تطبيق هذا النظام المدمج في بيئات عمرانية محددة (المناطق الريفية والحضرية الصغيرة) لسهولة التنفيذ.

الاستفادة من الدراسة: يمكن استخدام هذا النظام من المعالجة في المناطق الريفية والمناطق الحضرية الصغيرة بسبب سهولة تنفيذه وتكلفته المنخفضة. حيث أعطى النظام كفاءة معالجة وصلت إلى 72%، 76%، و74% لـ TSS، BOD، وCOD، على التوالي (Dececzaro et al., 2018).

مبرر اختيار الدراسة (5): تسليط الضوء على فعالية الأراضي الرطبة الشاقولية (VSF) في رفع جودة المياه المعالجة وإعادة استخدامها.

الاستفادة من الدراسة: أظهرت النتائج تحقيق كفاءات إزالة تراوحت بين 79–85% للطلب الكيميائي للأوكسجين و90–92% للمواد الصلبة العالقة، إضافة إلى إزالة فعالة للمركبات النيتروجينية. وأكدت الدراسة أهمية الأراضي الرطبة الشاقولية كمرحلة معالجة لاحقة للمفاعلات اللاهوائية لتحسين جودة المياه المعالجة مع إمكانية إعادة استخدامها (Marta et al., 2023).

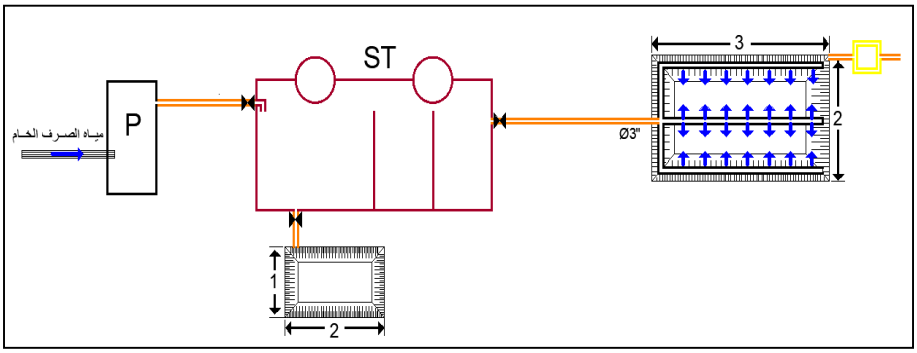
مبرر اختيار الدراسة (6): اختبار مواد فلتر غير تقليدية (الخرسانة الخفيفة – ACC) في الأراضي الرطبة لتعزيز إزالة المغذيات والملوثات العضوية عند الدمج بين المعالجة اللاهوائية والأراضي الرطبة الصنعية.

الاستفادة من الدراسة: استُخدمت كتل الخرسانة الخفيفة كوسط ترشيح، وعند زمن مكث هيدروليكي بلغ 24 ساعة حقق النظام كفاءة إزالة وصلت إلى 85% للطلب الكيميائي للأوكسجين و95% للمواد الصلبة العالقة و68% للنيتروجين الكلي و65% للفوسفور الكلي. وأظهرت الدراسة أن الدمج بين المعالجة اللاهوائية والأراضي الرطبة الصنعية يساهم في رفع كفاءة إزالة الملوثات العضوية والمغذيات مع المحافظة على انخفاض تكاليف التشغيل (Satyendra et al., 2024).

الخلاصة من الدراسات المرجعية: يعتبر هذا النظام من المعالجة تقنية واعدة حيث أنه قادر على تلبية المعايير المطلوبة لمواصفات مياه الصرف الصحي المعالجة، كما أن استخدام المفاعل اللاهوائي كمرحلة معالجة مسبقة للأراضي الرطبة الصنعية يتلافى دخول وتراكم كميات من المواد الصلبة العالقة على وسط الفلتر، وبالتالي يمنع حدوث الانسدادات. سيتم الاعتماد على مخمر لاهوائي (Septic Tank) كمرحلة معالجة أولية والذي اعطى كفاءة معالجة عالية في العديد من الدراسات كما يتميز بكلفته المنخفضة، ومن ثم الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية. وسيتم دراسة كفاءة الإزالة للمياه الناتجة عن المعالجة في هذا النظام وفقا للظروف المحلية وخطة البحث المقترحة.

5- منهجية البحث:

يبين الشكل (1) المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية في كلية الزراعة بجامعة دمشق كحيز مكاني للدراسة:



الشكل (1) المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية.

والذي يتألف من مرحلتين:

- ✓ المرحلة الأولى: المعالجة الأولية، وتشمل المفاعل اللاهوائي (Septic tank).
- ✓ المرحلة الثانية: المعالجة الثانوية، وتشمل حوض المعالجة بالأراضي الرطبة الصنعية ذو الجريان تحت السطحي الشاقولي.

5-1 تصميم وتجهيز المفاعل اللاهوائي (Septic tank):

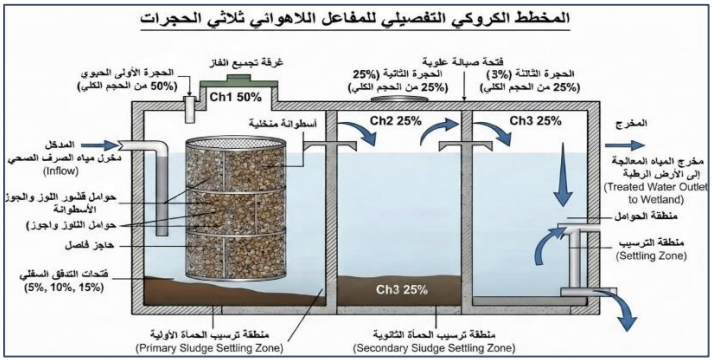
تم تصميم Septic tank المصنوع من مادة PVC ذو الحجم 1000L وفقاً لبارامترات التصميم الواردة في الكود الألماني وفق المواصفة الألمانية DIN4261 (DIN 4261-1., 2010)، وفقاً لما يلي:

- ✓ أحجام الحجرة الأولى والثانية والثالثة تبلغ (50%,25%,25%) على التوالي من حجم المفاعل اللاهوائي الكلي.
- ✓ المدة الزمنية بين تحميلين متتاليين ≤ 24-48hour

اعتماداً على هذه البارامترات، تم اختيار الأحجام التالية: (V_1=500L) للحجرة الأولى، (V_2=250L) للحجرة الثانية، (V_3=250L) للحجرة الثالثة. وزمن مكث 24hour

يبين الشكل (2) وضع ال Septic tank في المحطة التجريبية على قاعدة من البلوك بارتفاع 40cm لتأمين ميل قدره 1% عن حوض الأرض الرطبة الصنعية، تم تركيب بيزومتر خارجي بقطر 1inch لمراقبة مستوى المياه داخل الحجرات، وتم تركيب صمام عدم رجوع بقطر 1inch في أعلى ال Septic tank موصول بأنبوب تهوية لمنع رجوع الغاز إلى ال Septic tank،





الشكل (2) المفاعل اللاهوائي (Septic tank).

2-5 تصميم وتجهيز حوض الأرض الرطبة الصنعية:

تم تصميم الحوض ذو الجريان تحت السطحي الشاقولي وفقاً لبارامترات التصميم الواردة في الكود الألماني تبعاً للمواصفة الألمانية ATV-DVWK-262 (ATV-DVWK-A 262., 2006)، والتي اعتمدت في حساب أحواض الأراضي الرطبة:

- ✓ على التحميل الهيدروليكي الوارد في الكود المذكور ≤ $6l/m^2.min$
- ✓ المدة الزمنية بين تحميلين متتاليين ≤ 2-6hour

اعتماداً على هذه البارامترات، تم اختيار مساحة $6m^2$ للحوض، وزمن مكث 3hour شُكل الحوض ذو الجريان تحت السطحي الشاقولي من أكتاف ترابية مائلة بأبعاد $3*2m^2$ وعمق 1m، وميل 1% ضمن الحوض كما هو مبين في المواصفة الألمانية ATV-DVWK-262.

يبين الشكل (3) تنفيذ فلتر المعالجة في الحوض من ثلاث طبقات على التوالي من الأسفل إلى الأعلى، بدايةً تم وضع الدريناج وتثبيته بطبقة من الحصى والعدسية بسماكة 20cm وتدرج حبي (10-25mm)، ثم طبقة من رمل المازار بسماكة 60cm وتدرج حبي حتى (0.4mm)، وأخيراً طبقة من العدسية بسماكة 20cm وتدرج حبي (10-25mm).



الشكل (3) تنفيذ فلتر المعالجة في الأرض الرطبة الصنعية.

يبين الشكل (4) غرفة التفتيش بعد الحوض، مصنوعة من البلاستيك بسعة 20L، يتم عبرها تحويل المياه الراشحة من الحوض إلى قناة التصريف النهائية للمياه المعالجة بالإسالة عبر فتح السدات الموجودة ضمنها. وذلك بعد تامين فرق منسوب بميل 2% وعبر انابيب مصنوعة من مادة الـ PVC.



الشكل (4) غرفة التفتيش بعد حوض الأرض الرطبة الصنعية.

تم الاعتماد على نبات القصب الذي يناسب الظروف المناخية لبلدنا، كما يعتبر النبات التقليدي المستخدم في الأراضي الرطبة الصنعية. إذ استُخدم نبات القصب (Phragmites australis) المزروع مسبقاً في منطقة مجاورة للمحطة التجريبية، حيث تم اقتلاع النباتات بعد نحو شهرين من نموها الأولي (النمو المسبق والجزئي) ونقلها مع جذمورها إلى حوض الأرض الرطبة الصنعية.

تم زراعة النباتات في الحوض بكثافة 16 شتلة، وبعد الزراعة خضعت لفترة تأسيس وتأقلم استمرت لمدة أربعة أشهر، تم خلالها سقاية الحوض بالمياه العذبة بصورة منتظمة بهدف تعزيز نمو المجموعين الجذري والخضري وضمان استقرار النباتات داخل فلتر المعالجة (الحصى ورمل المازار). وعند اكتمال مرحلة التأقلم ووصول النباتات إلى حالة نمو مستقرة، بدأ تشغيل النظام باستخدام مياه الصرف الصحي الخام وإجراء التجارب. وبذلك بلغت المدة الكلية لنمو وتأسيس نباتات القصب قبل بدء التجارب نحو

ستة أشهر، وهي مدة كافية لضمان استقرار الغطاء النباتي وتطور النظام الجذري اللازم لدعم عمليات المعالجة في الأراضي الرطبة الصنعية.



الشكل (5) نبات القصب مع جذموره في مرحلة النمو المسبق والجزئي.



الشكل (6) نبات القصب في حوض الأرض الرطبة الصنعية.

3-5 تحضير العينات الخام واجراء عملية التنشيط:

تم إحضار الكمية اللازمة خلال مرحلة الدراسة من قشور اللوز والجوز الخام من الكسارات المتواجدة في منطقة عربين في ريف دمشق، ذات التدرج الحبي (8-14mm) والمناسبة لتوفير سطح فعال لنمو البكتيريا، ويعود السبب في اختيار هذا المدى التدرجي إلى ضمان التوازن الأمثل بين توفير مساحة سطحية نوعية عالية لنمو الغشاء الحيوي (Biofilm)، وبين المحافظة على مسامية كافية داخل

الأسطوانة المنخلية، مما يضمن تدفق مياه الصرف بسلاسة ويمنع حدوث الانسداد (Clogging). (الشلبي وآخرون.، 2020). مراحل تنشيط قشور اللوز الخام (مسلماني وآخرون.، 2015):

بدايةً تم غسل القشور جيداً لإزالة الغبار والزيوت، ومن ثم أدخلت في فرن التجفيف (تحت درجة حرارة 90C ولمدة 24 ساعة) كما هو موضح في الشكل (7)، ثم وضعت في عبوات خاصة مصنوعة من الحديد الصلب خالية من الأوكسجين، تم تمرير غاز النتروجين في العبوات وأغلاقها، ومن ثم وضعها في فرن التنشيط (تحت درجة حرارة 600C ولمدة ساعتين) كما هو موضح في الشكل (8)، ويُبرر هذا التنشيط الحراري في جو خامل بأنه إجراء أساسي لرفع مسامية القشور الداخلية، مما يؤدي إلى زيادة السطح النوعي (SSA) بشكل جوهري (من قيم منخفضة في القشور الخام إلى قيم مرتفعة في القشور المنشطة)، وهو ما يضاعف من عدد مواقع التثبيت المتاحة للبكتيريا، ويعزز بالتالي كفاءة الإزالة البيولوجية للملوثات.



الشكل (7) فرن تجفيف القشور في مخبر كلية العلوم.



الشكل (8) فرن تنشيط القشور في مخبر كلية العلوم.

تم قياس السطح النوعي للقشور وفق نظرية BET (ISO 9277., 2010)، حيث كانت قيمة السطح النوعي لقشور الجوز الخام ($SSA=1.68m^2/g$)، وكانت قيمة السطح النوعي لقشور الجوز المنشطة ($SSA=41.62m^2/g$)، وكانت قيمة السطح النوعي لقشور اللوز المنشطة ($SSA=35.87m^2/g$).

يبين الشكل (9) أسطوانة منخلية تتألف من ثلاث غرف (الشلبي وآخرون.، 2020)، صُممت لضمان تثبيت الحوامل الحيوية ومنع انجرافها مع الجريان، مع السماح في الوقت نفسه بمرور مياه الصرف الصحي والتلامس الفعّال بينها وبين السطوح الحيوية.

تم إدخال قشور اللوز المنشطة بنسبة ملء (5%=3kg, 10%=6kg, 15%=9kg) في الأسطوانة المنخلية، وقد تم تحديد هذه النسب بناءً على الحجم الظاهري (Bulk Volume) للحوامل داخل المفاعل لضمان عدم تجاوز نسبة الفراغات (Porosity) التي تقدر بنحو 50%، وهو إجراء هندسي ضروري لضمان زمن مكث هيدروليكي (HRT) ملائم للتفاعلات البيولوجية، ولتجنب أي انخفاض في حجم المفاعل الفعلي قد يؤثر على كفاءة الترسيب.

جرى توزيع القشور بشكل متجانس داخل كل غرفة لضمان الاستفادة القصوى من الحجم المتاح وزيادة المساحة السطحية النوعية الفعّالة لنمو البيوفيلم، ويبين الشكل (10) إدخال قشور اللوز المنشطة بنسبة ملء 15%.



الشكل (9) الأسطوانة المنخلية.



الشكل (10) نسبة 15% من قشور اللوز المنشطة في الأسطوانة المنخلية.

وبذلك حصلنا على مصفوفة البدائل للمرحلة الأولى من المقارنة لثلاثة نسب ملء من قشور اللوز المنشطة (5% ,10% ,15%)، وفق الجدول التالي:

الجدول (3) مصفوفة البدائل للمرحلة الأولى

1	**قشور اللوز المنشطة بنسبة ملء 5% من حجم المفاعل اللاهوائي مع نبات القصب**

2	قشور اللوز المنشطة بنسبة ملء 10% من حجم المفاعل اللاهوائي مع نبات القصب
3	قشور اللوز المنشطة بنسبة ملء 15% من حجم المفاعل اللاهوائي مع نبات القصب

وتبين الأشكال (11،12) إدخال قشور الجوز المنشطة والخام بنسبة ملء (10%=6kg) في الأسطوانة المنخلية.



الشكل (11) نسبة 10% من قشور الجوز المنشطة في الأسطوانة المنخلية.



الشكل (12) نسبة 10% من قشور الجوز الخام في الأسطوانة المنخلية.

تتميز قشور اللوز والجوز المستخدمة كحوامل بيولوجية بتركيبة مسامية طبيعية تساهم في زيادة مساحة السطح النوعي (Specific Surface Area) اللازمة لتثبيت الغشاء الحيوي. تم تحديد نسب الملء (5%، 10%، 15%) بناءً على الحجم الظاهري (Bulk Volume) للحوامل داخل المفاعل. وبناءً على الدراسات السابقة لهذه المواد، تقدر مسامية الوسط (Porosity) بنحو 50% تقريباً، مما يضمن

تدفق المياه ويمنع حدوث انسداد (Clogging) داخل المفاعل، مع توفير مساحة سطحية كافية للنشاط البيولوجي.

وبذلك حصلنا على مصفوفة البدائل للمرحلة الثانية من المقارنة لنسبة ملء 10% من قشور اللوز المنشطة مع نسبة ملء 10% من قشور الجوز المنشطة، ومصفوفة البدائل للمرحلة الثالثة من المقارنة لنسبة ملء 10% من قشور الجوز المنشطة مع نسبة ملء 10% من قشور الجوز الخام، وفق الجداول التالية:

الجدول (4) مصفوفة البدائل للمرحلة الثانية

2	قشور اللوز المنشطة بنسبة ملء 10% من حجم المفاعل اللاهوائي مع نبات القصب
3	قشور الجوز المنشطة بنسبة ملء 10% من حجم المفاعل اللاهوائي مع نبات القصب

الجدول (5) مصفوفة البدائل للمرحلة الثالثة

2	قشور الجوز المنشطة بنسبة ملء 10% من حجم المفاعل اللاهوائي مع نبات القصب
3	قشور الجوز الخام بنسبة ملء 10% من حجم المفاعل اللاهوائي مع نبات القصب

5-4 مصدر مياه الصرف الصحي:

لتأمين ظروف تشغيل واقعية تحاكي الأنظمة الحقلية، تم استخدام مياه صرف صحي منزلية خام غير معالجة (Raw Wastewater) طيلة فترة التجارب المختبرية. جُلبت العينات دورياً من قناة التجميع

الرئيسية المغذية لمحطة المعالجة القريبة من موقع الدراسة، حيث وُضع هدار ترابي لتجميع المياه الملوثة إذ أن منسوب المياه لا يتجاوز 10cm.

يبين الشكل (13) عملية ضخ المياه من قناة التجميع إلى ال Septic tank بوساطة أنبوب الضخ المستخدم من مادة البولي إيتيلين قطره 50mm، حيث تم تجهيز برميل تصفية بارتفاع 55cm، وُضعت المضخة بداخله في قناة تجميع مياه الصرف الصحي، وتم تزويد البرميل بشقوق طولية على محيطه الخارجي (كل شق طوله 20cm وعرضه 10mm) لإزالة المواد العالقة كبيرة الحجم الموجودة في المياه، وذلك من أجل تخفيض حمل التلوث في منشأة المعالجة اللاحقة، ولمنع إضرار المواد بالمضخة.



الشكل (13) ضخ المياه من قناة تجميع مياه الصرف الصحي.

ولتحديد الحمل العضوي والملوثات الداخلة إلى منظومة المعالجة الهجينة، أُجريت تحاليل مخبرية منتظمة لمؤشرات التلوث قبل دخولها إلى ال Septic tank، حيث أظهرت النتائج أن قيم التراكيز الابتدائية المتوسطة للملوثات كانت على النحو الآتي:

بلغ متوسط الطلب الكيميائي للأوكسجين (COD) حوالي 525mg/l، ومتوسط الطلب الحيوي للأوكسجين (BOD) نحو 340mg/l، في حين استقر متوسط تركيز المواد الصلبة العالقة الكلية (TSS) عند 160mg/l.

5-5 مدة تشكل الغشاء البيولوجي (Biofillm) ودرجة الحرارة:

بعد إضافة القشور إلى ال Septic tank بكل نسبة ملء مدروسة، تم تشغيل النظام باستخدام مياه صرف صحي خام لمدة 14 يوماً قبل البدء بأخذ العينات وتحليلها. وقد خُصصت هذه الفترة لتأمين استعمار السطح من قبل الأحياء الدقيقة وتشكّل الغشاء الحيوي الأولي على الحوامل البيولوجية (قشور اللوز المنشطة وقشور الجوز المنشطة والخام). وتشير الدراسات إلى أن مرحلة تكوين المستعمرات الميكروبية وتثبيت البيوفيلم تمتد حتى نحو أسبوعين، في حين تبدأ مرحلة النضج بعد ذلك، مما يجعل فترة التشغيل المعتمدة مناسبة لبدء تقييم أداء النظام وكفاءة إزالة الملوثات (Fernández et al., 2008).

أجريت التجارب خلال الفترة الممتدة من بداية شهر تموز 2025 حتى منتصف شهر شباط 2026، وشُغّل نظام المعالجة تحت الظروف البيئية الطبيعية السائدة دون التحكم بدرجة الحرارة أو قياسها بشكل مباشر داخل وحدات المعالجة. وتجدر الإشارة إلى أن درجة الحرارة تُعد من العوامل المؤثرة في النشاط الميكروبي وكفاءة عمليات المعالجة الحيوية، إلا أن جميع نسب الملء المدروسة خضعت للظروف التشغيلية والمناخية نفسها، مما يضمن إمكانية المقارنة الموضوعية بين نتائجها وتقييم تأثير الحوامل البيولوجية في أداء النظام. كما يُوصى في الدراسات المستقبلية بمتابعة درجة الحرارة بشكل دوري لتقييم أثرها الكمي في كفاءة إزالة الملوثات.

5-6 خطة الاعتيان:

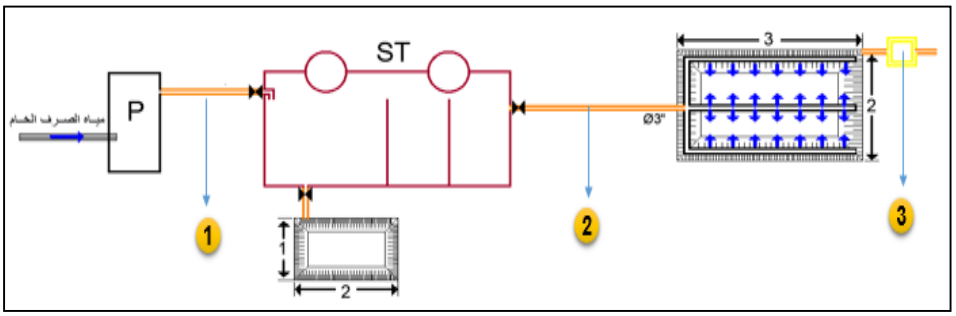
5-6-1 أماكن أخذ العينات:

يبين الشكل (14) الأماكن التي حددت لأخذ العينات، وهي:

- ✓ من مياه الصرف الصحي الخام.
- ✓ من سكر الاعتيان بعد ال Septic tank.
- ✓ من غرفة التفتيش بعد حوض الأرض الرطبة الصنعية.

الملوثات المراد تحديد تراكيزها تجريبياً، هي: (COD, BOD, TSS)

قمنا باختبار 90 عينة مقسومة إلى: 30 عينة من مياه الصرف الصحي الخام قبل ال Septic tank، 30 عينة قبل حوض الأرض الرطبة (من سكر الاعتيان بعد ال Septic tank)، و30 عينة بعد حوض الأرض الرطبة (من غرفة التفتيش)، ومن أجل الوصول إلى أفضل النتائج والتحقق من صحتها جرى اختبار هذه العينات بشكل دوري.



الشكل (14) أماكن أخذ العينات من محطة المعالجة التجريبية.

5-6-2 زمن الاعتيان:

تم الانتهاء من زراعة جذمور نبات القصب في حوض المعالجة في بداية شهر آذار من عام 2025، قُسمت التجارب إلى ثلاثة مراحل تبعاً لمصفوفة البدائل، وفق المعايير التصميمية الآتية:

(Q_{ST}=1m^3/day, t_{ST}=1day), (Q_{CW}=2m^3/h، t_{CW}=3hour)

المرحلة الأولى: بدأت من 2025/7/1 حتى 2025/11/15، من أجل نسب الملء (,5% ,10% ,15% 5%) من قشور اللوز المنشطة، ونبات القصب في الأرض الرطبة الصنعية.

المرحلة الثانية: بدأت من 2025/11/15 حتى 2026/1/1، من أجل نسبة الملء (10%) من قشور الجوز المنشطة، ونبات القصب في الأرض الرطبة الصنعية.

المرحلة الثالثة: بدأت من 2026/1/1 حتى 2026/2/15، من أجل نسبة الملء (10%) من قشور الجوز الخام، ونبات القصب في الأرض الرطبة الصنعية.

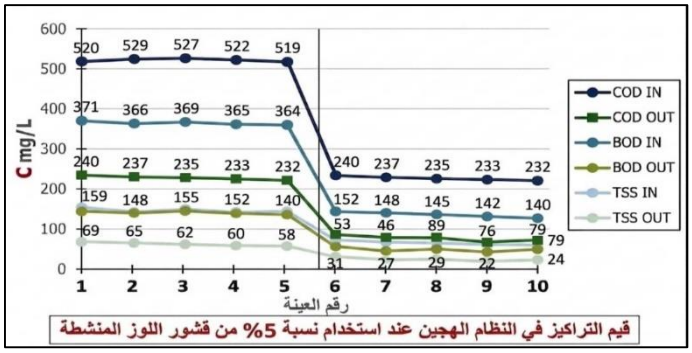
6- تقييم ومناقشة النتائج:

6-1 النتائج والمناقشة وفق مصفوفة البدائل الأولى:

تلخص الجداول (6,7,8) والأشكال البيانية (15,16,17) نتائج أداء النظام الهجين المكون من المفاعل البيولوجي اللاهوائي(ST) المزود بالحوامل البيولوجية (ثلاثة نسب ملء من قشور اللوز المنشطة 5%,10%,15%)، متبوعاً بالأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي (VFCW)، لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الجدول (6) تراكيز COD,BOD,TSS عند استخدام نسبة ملء 5% من قشور اللوز المنشطة

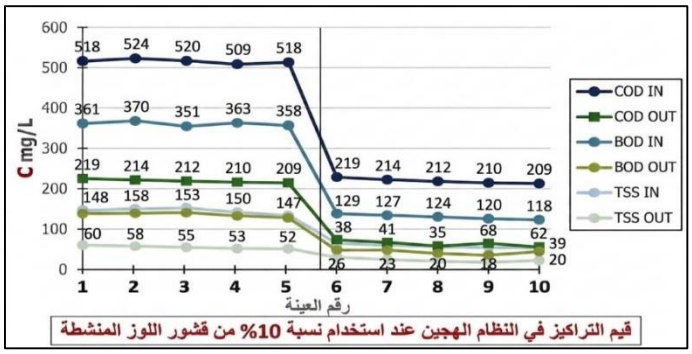
قشور اللوز (5%)								
TSS OUT	TSS IN	ST	BOD OUT	BOD IN	ST	COD OUT	COD IN	ST
69	159	1	152	371	1	240	520	1
65	148	2	148	366	2	237	529	2
62	155	3	145	369	3	235	527	3
60	152	4	142	365	4	233	522	4
58	156	5	140	364	5	232	519	5
62.8	154	AVG	145.4	367	AVG	235.4	523.4	AVG
59%		ST (%)	60%		ST (%)	55%		ST (%)
TSS OUT	TSS IN	CW	BOD OUT	BOD IN	CW	COD OUT	COD IN	CW
31	69	6	53	152	6	86	240	6
27	65	7	46	148	7	81	237	7
29	62	8	50	145	8	89	235	8
22	60	9	47	142	9	76	233	9
24	58	10	48	140	10	79	232	10
26.6	62.8	AVG	48.8	145.4	AVG	82.2	235.4	AVG
58%		CW (%)	66%		CW (%)	65%		CW (%)
83%		ST + CW	87%		ST + CW	84%		ST + CW



الشكل (15) تراكيز COD,BOD,TSS عند استخدام نسبة ملء 5% من قشور اللوز المنشطة

الجدول (7) تراكيز COD,BOD,TSS عند استخدام نسبة ملء 10% من قشور اللوز المنشطة

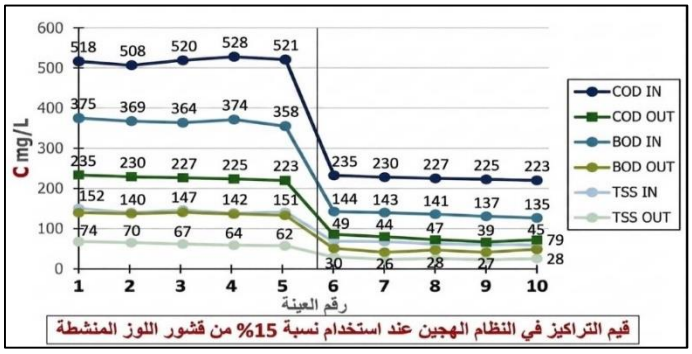
قشور اللوز (10%)								
TSS OUT	TSS IN	ST	BOD OUT	BOD IN	ST	COD OUT	COD IN	ST
60	148	1	129	361	1	219	518	1
58	158	2	127	370	2	214	524	2
55	153	3	124	351	3	212	520	3
53	150	4	120	363	4	210	509	4
52	147	5	118	358	5	209	518	5
55.6	151.2	AVG	123.6	360.6	AVG	212.8	517.8	AVG
63%		ST (%)	66%		ST (%)	59%		ST (%)
TSS OUT	TSS IN	CW	BOD OUT	BOD IN	CW	COD OUT	COD IN	CW
26	60	6	38	129	6	70	219	6
23	58	7	41	127	7	65	214	7
20	55	8	35	124	8	60	212	8
18	53	9	30	120	9	68	210	9
20	52	10	39	118	10	62	209	10
21.4	55.6	AVG	36.6	123.6	AVG	65	212.8	AVG
62%		CW (%)	70%		CW (%)	69%		CW (%)
86%		ST + CW	90%		ST + CW	87%		ST + CW



الشكل (16) تراكيز COD,BOD,TSS عند استخدام نسبة ملء 10% من قشور اللوز المنشطة

الجدول (8) تراكيز COD,BOD,TSS عند استخدام نسبة ملء 15% من قشور اللوز المنشطة

قشور اللوز (15%)								
TSS OUT	TSS IN	ST	BOD OUT	BOD IN	ST	COD OUT	COD IN	ST
74	152	1	144	375	1	235	518	1
70	140	2	143	369	2	230	508	2
67	147	3	141	364	3	227	520	3
64	142	4	137	374	4	225	528	4
62	151	5	135	358	5	223	521	5
67.4	146.4	AVG	140	368	AVG	228	519	AVG
54%		ST (%)	62%		ST (%)	56%		ST (%)
TSS OUT	TSS IN	CW	BOD OUT	BOD IN	CW	COD OUT	COD IN	CW
30	74	6	49	144	6	82	235	6
26	70	7	44	143	7	78	230	7
28	67	8	47	141	8	73	227	8
27	64	9	39	137	9	77	225	9
28	62	10	45	135	10	79	223	10
27.8	67.4	AVG	44.8	140	AVG	77.8	228	AVG
59%		CW (%)	68%		CW (%)	66%		CW (%)
81%		ST + CW	88%		ST + CW	85%		ST + CW



الشكل (17) تراكيز COD,BOD,TSS عند استخدام نسبة ملء 15% من قشور اللوز المنشطة

التحليل الهيدروليكي والميكانيكي لتأثير نسب ملء قشور اللوز المنشطة على كفاءة المعالجة:

تُظهر النتائج التجريبية أن العلاقة بين نسبة الملء وكفاءة المعالجة ليست خطية، بل تعتمد على توازن دقيق بين المساحة السطحية المتاحة للبيوفيلم والمقاومة الهيدروليكية داخل ال Septic tank، وهو ما يتوافق مع ما أشار إليه (Metcalf et al., 2014).

في نسبة الملء (5%)، كانت مساحة السطح المتاحة لتشكل الغشاء الحيوي (Biofilm) محدودة، مما أدى إلى عدم كفاية الكتلة الحيوية لتسريع التحلل اللاهوائي. وعلى الرغم من انخفاض المقاومة الهيدروليكية (Chu et al., 2011)، إلا أن كفاءة النظام كانت الأقل؛ حيث بلغت كفاءة إزالة COD للنظام الهجين 84% (ST+CW) (مع تركيز COD نهائي 82.2mg/l)، بينما سجل الـ BOD كفاءة إزالة إجمالية 87% (بتركيز نهائي 48.8mg/l)، وبلغت إزالة المواد العالقة 83% (TSS) (بتركيز نهائي 26.6mg/l).

في المقابل، أدت نسبة الملء (15%) إلى كثافة عالية للحوامل، مما تسبب في تقليل الفراغات بينها وزيادة المقاومة الهيدروليكية بشكل ملحوظ. أدى هذا التزاحم إلى ظهور مناطق راكدة (Dead Zones) وتراكم الغازات الناتجة عن التحلل اللاهوائي، مما أعاق جريان المياه وقلل من زمن المكوث الفعال (Hydraulic Retention Time). انعكس هذا هيدروليكياً على انخفاض كفاءة الإزالة مقارنة بالنسب

المثلى، حيث سجل النظام الهجين (ST+CW) كفاءة إزالة COD بلغت 85% (تركيز نهائي 77.8mg/l)، وBOD بكفاءة 88% (تركيز نهائي 44.8mg/l)، في حين بلغت كفاءة TSS 81% (تركيز نهائي 27.8mg/l).

حققت نسبة الملء (10%) التوازن الأمثل؛ حيث وفرت مساحة سطحية كافية لتشكيل غشاء حيوي كثيف وفعال دون التأثير سلباً على مسارات الجريان. هذه النسبة سمحت بتوزيع متوازن للكتلة الحيوية مع الحفاظ على فراغات كافية لتسهيل حركة المياه (Odegaard et al., 2006). انعكس هذا التوازن في أعلى كفاءة معالجة سجلتها الدراسة للنظام الهجين (ST+CW)، حيث وصلت كفاءة إزالة COD إلى 87% (تركيز نهائي 65mg/l)، وارتفعت كفاءة إزالة BOD لتصل إلى 90% (تركيز نهائي 36.6mg/l)، بينما حققت TSS كفاءة إزالة ممتازة بلغت 86% (تركيز نهائي 21.4mg/l).

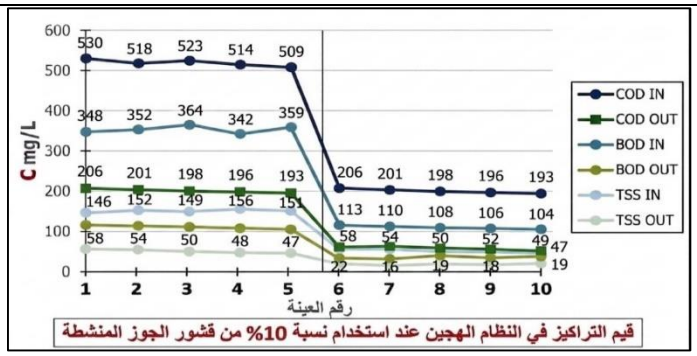
تخلص هذه المقارنة إلى أن نسبة الملء 10% تمثل "نقطة التشغيل المثلى" (Optimal Operating Point)؛ فهي تضمن أقصى استفادة من الخصائص المسامية لقشور اللوز مع تجنب عيوب التدفق القصير أو الانسداد النفاذي، مما يجعلها الاستراتيجية الأكثر كفاءة لتعزيز أداء المفاعلات اللاهوائية كخطوة أولية في أنظمة الأراضي الرطبة الصنعية.

6-2 النتائج والمناقشة وفق مصفوفة البدائل الثانية:

يلخص الجدول (9) والشكل البياني (18) نتائج أداء النظام الهجين المكون من المفاعل اللاهوائي (Septic tank) المزود بالحوامل البيولوجية (نسبة ملء 10% من قشور الجوز المنشطة)، متبوعاً بالأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي (VFCW)، لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الجدول (9) تراكيز COD,BOD,TSS عند نسبة الملء 10% من قشور الجوز المنشطة

قشور الجوز (10%)								
TSS OUT	TSS IN	ST	BOD OUT	BOD IN	ST	COD OUT	COD IN	ST
58	146	1	113	348	1	206	530	1
54	152	2	110	352	2	201	518	2
50	149	3	108	364	3	198	523	3
48	156	4	106	342	4	196	514	4
47	151	5	104	359	5	193	509	5
51.4	150.8	AVG	108.2	353	AVG	198.8	518.8	AVG
66%		ST (%)	69%		ST (%)	62%		ST (%)
TSS OUT	TSS IN	CW	BOD OUT	BOD IN	CW	COD OUT	COD IN	CW
22	58	6	28	113	6	56	206	6
16	54	7	32	110	7	61	201	7
19	50	8	26	108	8	59	198	8
18	48	9	32	106	9	52	196	9
19	47	10	27	104	10	49	193	10
18.8	51.4	AVG	29	108.2	AVG	55.4	198.8	AVG
63%		CW (%)	73%		CW (%)	72%		CW (%)
88%		ST + CW	92%		ST + CW	89%		ST + CW



الشكل (18) تراكيز COD,BOD,TSS عند نسبة الملء 10% من قشور الجوز المنشطة

التحليل الهيدروليكي والميكانيكي لتفوق قشور الجوز المنشطة على قشور اللوز المنشطة:

يُعزى التفوق المنهجي والإحصائي لقشور الجوز المنشطة في إزالة الملوثات مقارنة بقشور اللوز المنشطة إلى عوامل فيزيائية وبنيوية تدعمها النتائج التجريبية. تؤدي عملية التنشيط (Activation) لقشور الجوز إلى توليد شبكة مسامية دقيقة ومتطورة تفوق ما هو متاح في قشور اللوز، مما يمنحها مساحة سطحية نوعية أعلى، وهي بيئة مثالية لالتصاق البكتيريا وتطور غشاء حيوي (Biofilm) ذو نشاط خلوي مرتفع (Sabrina et al., 2023).

تتجلى دقة هذه النتائج في الفارق الإحصائي؛ فعند استخدام قشور الجوز، حقق النظام الهجين (ST+CW) كفاءة إزالة كلية لـ COD بلغت 89%، متجاوزاً بذلك كفاءة نظام قشور اللوز التي بلغت 87%. هذا التحسن الملموس في الأداء يعزز ما أشار إليه (Sanitha et al., 2026) و (Guanqi et al., 2024) حول دور الخصائص المسامية للمخلفات الزراعية في تسريع استعمار الكتلة الحيوية؛ إذ تثبت البنية المسامية لقشور الجوز استقراراً ميكروبياً أكبر، وهو ما يفسر تقارب نتائجنا مع ما حققه (Vinod et al., 2012) باستخدام قشور القهوة كحامل بيولوجي.

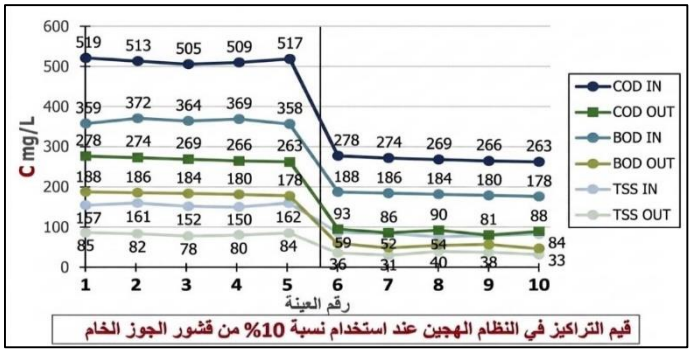
كما ساهمت الخشونة السطحية لقشور الجوز في حماية الغشاء الحيوي من الانجراف بفعل قوى القص الهيدروليكية، مما حافظ على استقرار "الحالة المستقرة" (Steady-state) طوال فترة التجارب (Oscar et al., 2024). هذا الاستقرار انعكس إيجاباً على أداء النظام الهجين، حيث أظهرت البيانات أن المفاعل اللاهوائي (ST) وحده مع قشور الجوز حقق كفاءة إزالة لـ BOD بلغت 69%، مقابل 66% مع قشور اللوز. هذا الانخفاض في الحمل العضوي الواصل للأرض الرطبة قلل من مخاطر الانسداد النفاذي (Clogging)، وهو ميزة جوهرية أكدها (Merino et al., 2015)؛ حيث ساهم هذا التكامل في وصول تركيز BOD النهائي الخارج من النظام الهجين عند استخدام قشور الجوز إلى 29mg/l (بنسبة إزالة كلية 92%)، بينما بلغ التركيز 36.6mg/l (بنسبة إزالة 90%) عند استخدام قشور اللوز. إن هذه النتائج التي تقترب من الكفاءة العالية التي حققها نظام (Abdel-Shafy et al., 2017) الهجين تؤكد أن دمج قشور الجوز المنشطة يعمل كخط دفاع أول يحمي وسط الفلتر في الأراضي الرطبة، مما يتيح للأكسجين النفاذ بكفاءة أعلى، ويسرع عمليات الأكسدة الحيوية والنترجة، ويحقق الفعالية المطلوبة في المعالجة بأقل بصمة مكانية ممكنة.

6-3 النتائج والمناقشة وفق مصفوفة البدائل الثالثة:

يلخص الجدول (10) والشكل البياني (19) نتائج أداء النظام الهجين المكون من المفاعل البيولوجي اللاهوائي(ST) المزود بالحوامل البيولوجية (نسبة ملء 10% من قشور الجوز الخام)، متبوعاً بالأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي (VFCW)، لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الجدول (10) تراكيز COD,BOD,TSS عند استخدام نسبة ملء 10% من قشور الجوز الخام

قشور الجوز الخام (10%)								
TSS OUT	TSS IN	ST	BOD OUT	BOD IN	ST	COD OUT	COD IN	ST
85	157	1	188	359	1	278	519	1
82	161	2	186	372	2	274	513	2
78	152	3	184	364	3	269	505	3
80	150	4	180	369	4	266	509	4
84	162	5	178	358	5	263	517	5
81.8	156.4	AVG	183.2	364.4	AVG	270	512.6	AVG
48%		ST (%)	50%		ST (%)	47%		ST (%)
TSS OUT	TSS IN	CW	BOD OUT	BOD IN	CW	COD OUT	COD IN	CW
36	85	6	59	188	6	93	278	6
31	82	7	52	186	7	86	274	7
40	78	8	54	184	8	90	269	8
38	80	9	57	180	9	81	266	9
33	84	10	50	178	10	88	263	10
35.6	81.8	AVG	54.4	183.2	AVG	87.6	270	AVG
56%		CW (%)	70%		CW (%)	68%		CW (%)
77%		ST + CW	85%		ST + CW	83%		ST + CW



الشكل (19) تراكيز COD,BOD,TSS عند استخدام نسبة ملء 10% من قشور الجوز الخام

<u>التحليل الهيدروليكي والميكانيكي لتفوق قشور الجوز المنشطة على قشور الجوز الخام:</u>

يُعزى التفوق الإحصائي الملحوظ لقشور الجوز المنشطة مقارنة بالقشور الخام في مرحلتي المعالجة إلى الآليات الفيزيوكيميائية والحيوية التي تعزز أداء المفاعل اللاهوائي؛ حيث أظهرت النتائج أن استخدام

القشور المنشطة رفع كفاءة إزالة BOD في المفاعل اللاهوائي (Septic tank) لتصل إلى 69% (متوسط التركيز الخارج 108.2mg/l)، مقارنة بـ 50% فقط عند استخدام القشور الخام (متوسط التركيز الخارج 183.2mg/l). هذا التفاوت يعود لكون عملية التنشيط (Activation) أدت إلى إزالة المواد الراتنجية والمكونات التطايرية التي تسد المسام الطبيعية، مما ضاعف من المساحة السطحية النوعية، وهيأت بيئة تثبيت حيوية فائقة (Amit et al., 2026).

إن هذا التطور في المسامية يفسر قدرة قشور الجوز المنشطة على تسريع تشكل الغشاء الحيوي؛ حيث سجل النظام الهجين (ST+CW) باستخدام القشور المنشطة كفاءة إزالة كلية لـ BOD بلغت 92% (تركيز نهائي 29mg/l)، متفوقاً على النظام الذي استخدم القشور الخام والذي حقق كفاءة إزالة كلية بلغت 85% (تركيز نهائي 54.4mg/l). وتتوافق هذه النتائج مع استنتاجات (Sanitha et al., 2026) حول دور تعزيز الخصائص المسامية في خفض زمن إقلاع النظام، حيث تمتلك القشور المنشطة كتلة حيوية أكثر كثافة ونشاطاً استقلابياً مقارنة بضعف الالتصاق الذي أشار إليه (Maria et al., 2022) عند استخدام سلائف ليغنوسليلوزية غير معالجة.

علاوة على ذلك، عملت البنية المسامية المتطورة كـ "فلتر دقيق" احتجز المواد العالقة بشكل أكثر فعالية؛ فقد بلغت كفاءة إزالة TSS في المفاعل اللاهوائي (ST) مع القشور المنشطة 66% (تركيز خارج 51.4mg/l)، مقابل 48% فقط مع القشور الخام (تركيز خارج 81.8mg/l). كما وصل تركيز المواد العالقة النهائي في النظام الهجين (ST+CW) مع القشور المنشطة إلى 18.8mg/l (بنسبة إزالة كلية 88%)، بينما استقر عند 35.6mg/l (بنسبة إزالة كلية 77%) عند استخدام القشور الخام. وتتطابق

هذه النتائج مع ملاحظات (Merino et al., 2015) حول أهمية المواد المالئة عالية المسامية في منع تراكم المواد الصلبة وتفادي الانسداد؛ مما يؤكد أن استخدام قشور الجوز المنشطة لا يرفع كفاءة الإزالة فحسب، بل يضمن طول عمر النظام الهجين واستقراره التشغيلي، وهو ما يقترب من الكفاءات العالية التي سجلها (Abdel-Shafy et al., 2017) عند استخدام نظم المعالجة المتكاملة.

7- نموذج كلارك (Model Clark) في تصميم الأراضي الرطبة الصنعية:

يعد نموذج كلارك (Model Clark) أحد النماذج الرياضية شبه التجريبية المستخدمة في توصيف وتصميم أنظمة الأراضي الرطبة الصنعية، ويعتمد بصورة أساسية على مبدأ الإزالة الحركية من الدرجة الأولى (Kinetics First-Order) لتمثيل سلوك إزالة الملوثات العضوية ضمن الوسط النباتي والترشيحي (Clark et al., 1996).

ويُستخدم النموذج لتقدير المساحة السطحية المطلوبة للأراضي الرطبة اللازمة لتحقيق تراكيز تصريف محددة اعتماداً على الحمل العضوي الداخل وكفاءة الإزالة المطلوبة، ويعطى بالعلاقة:

$$A = \frac{Q}{K} ln\left(\frac{Ci}{Ce}\right) \quad .....(1-1)$$

حيث:

A: مساحة الأراضي الرطبة (m^2)

Q: معدل التدفق الداخل إلى Septictank (m^3/day)

K: ثابت الإزالة في الأراضي الرطبة الصنعية m/day (0.25-0.05)

Ci: التركيز الداخل إلى الأراضي الرطبة الصنعية (mg/l)

Ce: التركيز عند المخرج النهائي (mg/l)

وبالاعتماد على نموذج كلارك لتصميم الأراضي الرطبة الصنعية، فإن المساحة المطلوبة للمعالجة ترتبط عكسياً مع كفاءة الإزالة في مرحلة المعالجة الأولية. ولإظهار تأثير الحوامل البيولوجية بصورة مباشرة، تم التعبير عن تركيز الملوث الداخل إلى الأراضي الرطبة بدلالة خصائص الحوامل البيولوجية، وفق العلاقة التالية:

$$Ci = Co(1 - nb) \ldots . (2-1)$$

حيث:

C_i: التركيز الداخل إلى الأراضي الرطبة الصنعية (mg/l)

C_o: التركيز الخام الداخل إلى المحطة (mg/l)

n_b: كفاءة المعالجة في Septic tank المزود بالحوامل البيولوجية (%)، والتي تُحسب تجريبياً لكل تجربة على حدى، والتي ترتبط بمساحة السطح النوعية للحوامل البيولوجية وزمن ودرجة حرارة التنشيط، إذ أن n_b هي كفاءة محققة مخبرياً وليست ثابتة افتراضية.

وبإدخال ذلك ضمن نموذج كلارك تصبح العلاقة الرياضية في الشكل النهائي:

$$A = \frac{Q}{K} ln \left(\frac{Co(1-nb)}{Ce} \right) \ldots . (3-1)$$

وتوضح هذه العلاقة أن زيادة فعالية الحوامل البيولوجية في المعالجة تؤدي إلى رفع قيمة nb، وبالتالي تخفيض الحمل العضوي الداخل إلى الأراضي الرطبة، مما يقلل المساحة المطلوبة لتشييد الأراضي الرطبة الصنعية.

بناءً على النتائج العملية التي أجريت خلال مرحلة البحث، يمكن إجراء التعويض المباشر ضمن العلاقة الرياضية (1-3) لإظهار الأثر الحقيقي للحوامل البيولوجية على تخفيض مساحة الأراضي الرطبة الصنعية، كما في الجدول التالي:

الجدول (11) العلاقة بين كفاءة المعالجة الأولية عبر المفاعل اللاهوائي المزود بالمخلفات الزراعية والمساحة اللازمة لتشييد الأرض الرطبة الصنعية

	نسبة ملء الحامل البيولوجي	$\eta bio = f(Sa, Pp, Th)$	A	نسبة التخفيض في المساحة
	بدون حوامل	35%	7.53	0%
1	5% من قشور اللوز المنشطة	55%	5.69	24%
2	10% من قشور اللوز المنشطة	59%	5.22	31%
3	15% من قشور اللوز المنشطة	56%	5.58	26%
4	10% من قشور الجوز المنشطة	62%	4.84	36%
5	10% من قشور الجوز الخام	47%	6.51	14%

تُظهر البيانات التجريبية المدرجة في الجدول (11) علاقة طردية بين كفاءة المعالجة البيولوجية (n_{bio}) الناتجة عن حوامل المخلفات الزراعية، ونسبة التخفيض في المساحة السطحية للأرض الرطبة (A).

ويمكن تحليل هذه القيم وفق ثلاثة محاور مقارنة رئيسية:

أثر نسبة الملء (تحليل الكفاءة والمساحة):

بمقارنة نتائج قشور اللوز المنشطة عند نسب ملء (5%، 10%، 15%)، نجد أن كفاءة المعالجة الأولية ارتفعت من 55% عند نسبة ملء 5% إلى ذروتها عند 59% (نسبة ملء 10%)، مما أدى إلى خفض المساحة المطلوبة من $5.69m^2$ إلى $5.22m^2$. ومع ذلك، عند رفع نسبة الملء إلى 15%، تراجعت الكفاءة إلى 56% وارتفعت المساحة المطلوبة إلى $5.58m^2$.

تُعزى هذه الظاهرة إلى تجاوز "نقطة التشبع الهيدروليكي"؛ حيث تؤدي زيادة نسبة ملء الحوامل عن حد معين إلى تقليص الحجم الحر (Void Volume) للمفاعل، مما يسبب "قصر مسار التدفق" (Short-circuiting) ويقلل زمن المكث الهيدروليكي الضروري للنشاط البكتيري، وهو ما يثبت أن نسبة 10% هي "النسبة المثلى" (Optimal Filling Ratio) للتصميم.

أثر التنشيط الفيزيائي (مقارنة القشور الخام بالمنشطة):

عند مقارنة قشور الجوز الخام (نسبة ملء 10%، كفاءة معالجة أولية 47%) مع قشور الجوز المنشطة (نسبة ملء 10%، كفاءة معالجة أولية 62%)، نلاحظ تبايناً جوهرياً في الأداء.

عملية التنشيط الفيزيائي عند 600°م هي "المحرك الأساسي" للأداء؛ إذ تعمل على زيادة المساحة السطحية النوعية (SSA) وفتح المسام الدقيقة، مما يوفر بيئة استضافة (Host) أكثر كفاءة للأغشية الحيوية (Biofilms). هذا الفارق في الكفاءة (15% زيادة) انعكس على المساحة التصميمية، حيث انخفضت المساحة من $6.51m^2$ (للخام) إلى $4.84m^2$ (للمنشط)، أي بنسبة توفير إضافية بلغت 22% نتيجة التنشيط فقط.

المفاضلة بين أنواع المخلفات (الجوز مقابل اللوز):

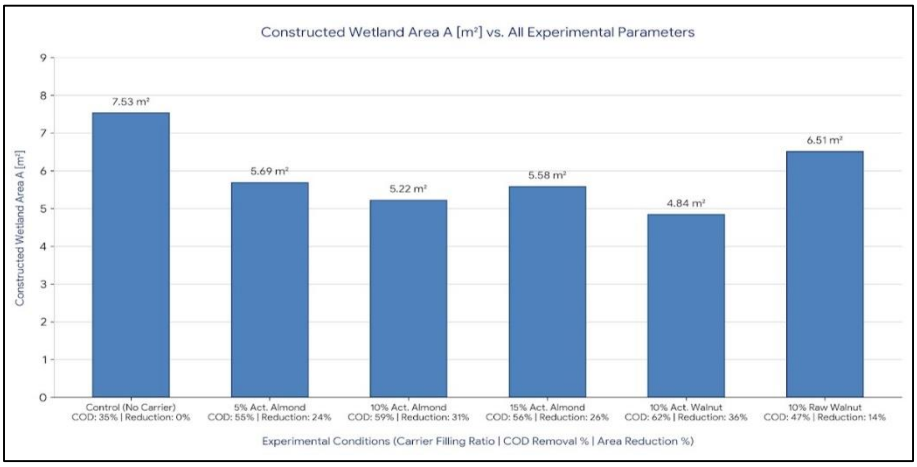
عند تثبيت نسبة الملء عند 10%، حققت قشور الجوز المنشطة كفاءة معالجة أولية بلغت 62% مقابل 59% لقشور اللوز المنشطة.

يُعزى تفوق قشور الجوز إلى تركيبها الهيكلي الأكثر ملاءمة للتثبيت الحيوي (Cellular Structure). هذا الفارق في الكفاءة أدى إلى خفض المساحة التصميمية للأرض الرطبة إلى أدنى قيمة مسجلة في الدراسة ($4.84m^2$)، مما يمنحها الأفضلية كحامل بيولوجي ضمن الأنظمة الهجينة.

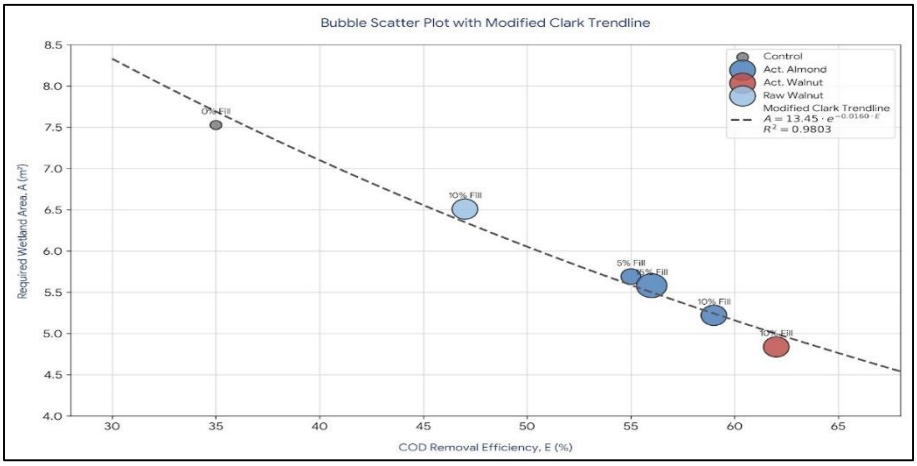
الخلاصة:

تشير المقارنة الشاملة إلى أن دمج المخلفات الزراعية في المفاعل اللاهوائي لا يعمل كمجرد فلتر فيزيائي، بل كـ "مُحسّن ديناميكي" للمنظومة الهيدروليكية. إن تحقيق نسبة تخفيض في المساحة تصل إلى 36% (باستخدام قشور الجوز المنشطة) يبرهن على أن كفاءة المعالجة الأولية هي المفتاح لتقليل البصمة المساحية الكلية، وهو ما ينسجم تماماً مع متطلبات الاستدامة في تصميم البنية التحتية للمياه في المناطق الريفية.

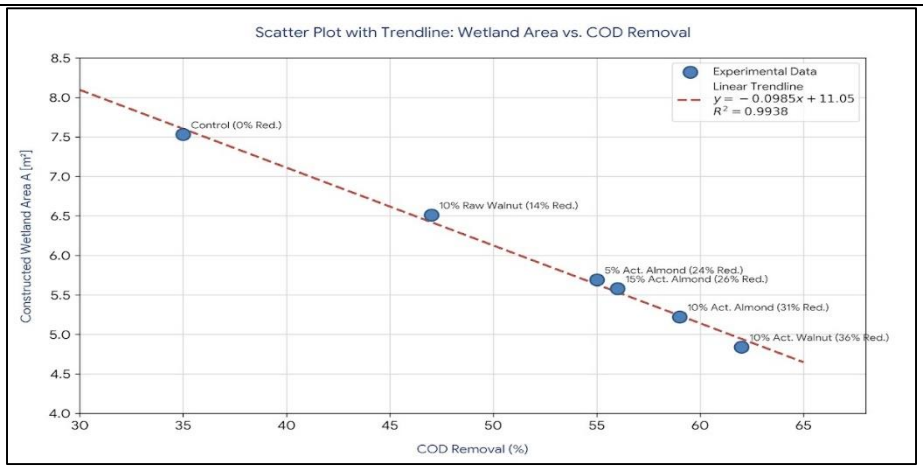
ويمكن تمثيل العلاقة بين كفاءة المعالجة الأولية عبر المفاعل اللاهوائي المزود بالمخلفات الزراعية والمساحة اللازمة لتشييد الأرض الرطبة الصنعية، وفق المخططات البيانية التالية:



الشكل (20): المخطط البياني (Clustered Column Chart) لتمثيل العلاقة بين البارامترات والمساحة اللازمة لتشييد الأرض الرطبة الصنعية.



الشكل (21): المخطط البياني (Bubble Scatter Plot With Modified Clark Trendline) لتمثيل العلاقة بين البارامترات والمساحة اللازمة لتشييد الأرض الرطبة الصنعية.



الشكل (22): المخطط البياني (Scatter Plot With Trendline) لتمثيل العلاقة بين البارامترات والمساحة اللازمة لتشييد الأرض الرطبة الصنعية.

8- الاستنتاجات:

1- أعطت نسبة الملء 5% من قشور اللوز المنشطة مساحة سطح صغيرة لتشكل الأغشية الحيوية، مما يحد من قدرة البكتيريا على التحلل اللاهوائي للمركبات العضوية. حيث بلغت نسبة الإزالة لكل من COD وBOD 54% و 59% على التوالي في ST.

2- أظهرت النتائج أن نسبة 10% هي النسبة التصميمية المثلى من قشور اللوز المنشطة لإشغال الحيز بالمواد الحاملة حيث حققت أعلى كفاءة إزالة للملوثات؛ إذ أعطت توازن مثالي، ومساحة سطح كافية لتشكيل الأغشية الحيوية، وبلغت نسبة الإزالة لكل من COD وBOD 60% و 65% على التوالي في ST.

3- إن زيادة نسبة الملء إلى 15% لم تؤدِ إلى تحسن طردي يتناسب مع كمية المادة المضافة، بالرغم من توفر مساحة أكبر للنمو البكتيري، إلا أن أجزاء كبيرة من المياه لا تتعرض بشكل كافٍ للكتلة الحيوية

وظهور مناطق راكدة (Zones Dead)، وبلغت نسبة الإزالة لكل من COD و BOD 56% و 61% على التوالي في ال Septic tank.

4- أثبت اختيار نظام الجريان تحت السطحي الشاقولي ونبات القصب فاعلية كبيرة في تحسين نقل الأكسجين إلى داخل أعماق الفلتر، مما وفر بيئة هوائية (Aerobic)، ساعدت بشكل مباشر في تحقيق نسب إزالة عالية للمواد العضوية مقارنة بأنظمة الجريان الأفقي.

5- أظهرت نتائج الدراسة أن دمج المفاعل اللاهوائي Septic tank المزود بالحوامل البيولوجية (قشور اللوز المنشطة) مع الأراضي الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي يمثل نظاماً فعالاً ومتكاملاً لمعالجة مياه الصرف الصحي. وبلغت نسب الإزالة لكل من (COD, BOD, TSS) (87%,90%,86%) على التوالي.

6- أثبتت الدراسة إمكانية تطبيق معادلة كلارك في الربط بين كفاءة المعالجة الأولية في ال Septic tank (المزود بالحوامل البيولوجية) وبين المتطلبات المساحية للأرض الرطبة الصنعية.

7- أدى استخدام قشور الجوز المنشطة (التي رفعت كفاءة إزالة COD إلى 62%) إلى تخفيض المساحة التصميمية المطلوبة للأرض الرطبة بنسبة وصلت إلى 36% مقارنة مع ST التقليدي (بدون حوامل)، إذا توفر المعادلة الرياضية المستنتجة أداة تصميمية دقيقة تمكن المهندسين من تقدير "المساحة المثلى" للأرض الرطبة بناءً على كفاءة الحوامل البيولوجية" المستخدمة، مما يقلل من الهدر في الأراضي الرطبة والمواد الإنشائية.

9- التوصيات:

1- إجراء أبحاث مستقبلية لتقييم العمر التشغيلي للحوامل البيولوجية الطبيعية المستخدمة داخل ال Septic tank، مع دراسة مدى مقاومتها للتحلل البيولوجي والتآكل الميكانيكي تحت ظروف التشغيل المستمرة وعلى مدى زمني طويل يتجاوز دورة تشغيلية واحدة.

2- اختبار أنواع أخرى من الحوامل البيولوجية الطبيعية أو الصناعية ذات الخصائص المسامية المختلفة، بهدف تحسين كفاءة إزالة الملوثات العضوية والمواد الصلبة العالقة، والوصول إلى مواد حاملة تحقق أداءً أعلى ضمن أنظمة المعالجة.

3- استخدام درجات حرارة وأزمنة تنشيط حراري مختلفة للحوامل البيولوجية، بهدف تحديد ظروف التنشيط المثلى التي تحقق أعلى كفاءة معالجة ممكنة مع تحقيق التوازن بين استهلاك الطاقة والكفاءة التشغيلية للنظام.

4- دراسة تأثير حجم الحبيبات والأبعاد الفيزيائية لقشور الحوامل البيولوجية على كفاءة المعالجة، نظراً لما لحجم الجزيئات من دور مهم في تحديد المساحة السطحية الفعالة، وكفاءة الامتزاز، ونمو البيوفيلم.

5- اختبار أنواع نباتية محلية أخرى تمتلك خصائص فيزيولوجية مشابهة لنبات القصب، مثل نبات البردي، وذلك بهدف مقارنة كفاءتها في إزالة الملوثات ضمن نفس الظروف التصميمية والتشغيلية للأراضي الرطبة الصنعية.

6- اختبار المعادلة الرياضية المقترحة على أنواع مختلفة من الحوامل البيولوجية، بهدف مقارنة معاملات الكفاءة المساحية الناتجة لكل مادة حاملة، وتقييم الجدوى الهندسية والتطبيقية للمواد المختلفة ضمن تصميم أنظمة المعالجة لمياه الصرف الصحي.

المراجع العربية والأجنبية:

1- الشلبي، عجيب، فطامة، (2020). **كفاءة استخدام القشور السليلوزية كحوامل بيولوجية في أحواض التهوية بالحمأة المنشطة.** رسالة ماجستير، جامعة البعث.

2- مسلماني، العجي، (2015). **تحويل قشور اللوز إلى فحم منشط باستخدام عوامل كيميائية مساعدة لمعالجة المياه وتخفيض الحمل العضوي.** رسالة ماجستير، جامعة دمشق.

3-Abdel-Shafy, H. I., El-Khateeb, M. A., & Shehata, M. (2017). Blackwater treatment via combination of sedimentation tank and hybrid wetlands for unrestricted reuse in Egypt. Desalination and Water Treatment, 71, 145-151.

4- Ali I, Khan ZM, Sultan M, Mahmood MH, Farid HU, Ali M, et al (2016). Experimental study on maize cob trickling filter-based wastewater treatment system: Design, development, and performance evaluation. Polish J Environ Stud.;25(6):1-9.

5- Amit B., Mika S., Anna W. (2026). Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification – A review.

6- ATV-DVWK. (2006). ATV-DVWK-A 262: Principles for dimensioning, construction and operation of constructed wetlands with subsurface flow for municipal wastewater treatment. Hennef, Germany.

7- Chu, L., & Wang, J. (2011). Characteristics of biofilm formations on different novel bio-carriers in sequencing batch biofilm reactors. Bioresource Technology, 102(24), 35-41.

8- Clark, J. M. (1996). Integrated design and efficiency profiles for constructed wetlands in wastewater treatment. Water Research, 30(4), 855-862.

9-Dai Y, Sun Q, Wang W, Lu L, Liu M, Li J, et al. (2018). Utilizations of agricultural waste as adsorbent for the removal of contaminants: A review. Chemosphere. 211: 35– 53.

10-Dececzaro, S. T., Wolff, D. B., Araújo, R. K., Faccenda, H. B., Perondi, T., & Sezerino, P. H. (2018). Vertical flow constructed wetland planted with Heliconia psittacorum used as decentralized post-treatment of anaerobic effluent in Southern Brazil. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 53(13), 1131-1138.

11- Deutsches Institut für Normung (DIN). (2010). DIN 4261-1: Small sewage treatment plants – Part 1. Berlin, Germany: Beuth Verlag.

12- Fernández, N., Díaz, E. E., Amils, R., & Sanz, J. L. (2008). Analysis of microbial community during biofilm development in an anaerobic wastewater treatment reactor. Microbial Ecology, 56(1), 121-132.

13- Guanqi, S., Dipin Nath, R. S., Shende, A. D., & Bhaskaran, K. (2024). Anaerobic baffled reactor followed by up-flow constructed wetland for treatment of municipal wastewater. Journal of Environmental Management, 345, 118-125.

14- ISO 9277. (2010). Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption — BET method. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

15- Maria A., Román M., Alcañiz M. (2022). Chemical Activation of Lignocellulosic Precursors and Residues: What Else to Conside.

16- Marta, S., Fernández, M. I., Ruiz, I., Canle, M., & Soto, M. (2023). Combining constructed wetlands and UV photolysis for the advanced removal of organic matter, nitrogen, and emerging pollutants from wastewater. Environments, 10(3), 35.

17-Merino-Solís, M. L., Villegas, E., De Anda, J., & López-López, A. (2015). The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: an anaerobic filter with a constructed wetland. Water, 7(3), 1149-1163.

18- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). Wastewater engineering: treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

19- Odegaard, H. (2006). Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm reactor. Water Science and Technology, 53(9), 17-33.

20- Oliveira Cruz LM, Stefanutti R, Filho BC, Tonetti AL (2013). Coconut shells as filling material for anaerobic filters. Springerplus.;2(1):1-6.

21- Oscar M., Alejandro A., Mayerlin S., Sergio A. (2024). Evaluation of a pilot-scale anaerobic biofilm reactor for the treatment of slaughterhouse effluents in rural areas.

22- Sabrina F, Madiha Y, Selma T, Hichem T, and Lotfi M. (2023). Application of Walnut Shell Biowaste as an Inexpensive Adsorbent for Methylene Blue Dye: Isotherms, Kinetics, Thermodynamics, and Modeling.

23- Sanitha, G., Du, J., Li, H., Dong, Y., Wang, Q., Hu, F., & Ji, J. (2026). Synergistic integration of sustainable wastewater treatment and agricultural waste valorization: Rapid in-situ enrichment of anammox bacteria via corncob biocarriers. Bioresource Technology, 402, 130-139.

24- Satyendra, & Vijay, R. (2024). Needle-felt coir fibre: A natural substitute for synthetic media in anaerobic fixed film reactors for wastewater treatment. International Biodeterioration & Biodegradation, 188, 105-114.

25-Sud, D., Mahajan, G., & Kaur, M. P. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions–A review. Bioresource technology, 99(14), 17-27.

26-Thanh, B. X., Hai Van, P. T., Tin, N. T., Hien, V. T. D., Dan, N. P., & Koottatep, T. (2014). Performance of wetland roof with Melampodium paludosum treating septic tank effluent. Desalination and Water Treatment, 52(4-6), 1070-1076.

27-VanLier, J. B., Mahmoud, N., & Zeeman, G. (2008). Anaerobic wastewater treatment. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design, 14, 401-442.

28- Vinod, A. R., & Mahalingegowda, R. M. (2012). Applicability Studies of Reactor Filled With Coffee Husk Blended with Wooden Chips as a Fixed Bed

for Wastewater Treatment. Nature Environment and Pollution Technology, 11(3), 415.

29-Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow (Vol. 14). Springer science & business media.

30-Wertz, L., Mercier, P., & Bédué, O. (2010). Cellulose science and technology. EPFL press.

التحليل الكهروبصري لتحسين زمن الاستجابة في شاشات الكريستال السائل باستخدام MATLAB

د. عصام غزولين*

الملخص

تمثل شاشات الكريستال السائل (LCDs) تقنية العرض المهيمنة، لكنها تواجه تحديات مستمرة تتعلق بزمن الاستجابة البطيء، مما يحد من تطبيقاتها في شاشات اللمس والأجهزة ذات معدلات التحديث العالية. تركز هذه الدراسة على تحليل ومحاكاة العوامل المؤثرة على زمن الاستجابة، وتحديداً من خلال حل معادلة الحركة الكهروبصرية لجزيئات الكريستال السائل. باستخدام بيئة MATLAB، تم بناء نموذج حاسوبي لتقدير زمن صعود وهبوط العزم تحت ظروف قيادة مختلفة (الجهد والتردد)، مع الأخذ في الاعتبار الثوابت المادية الأساسية مثل اللزوجة والتباين الكهربائي.

تهدف النتائج إلى تحديد مجموعة من المعلمات المادية والتشغيلية المثلى التي تتيح تحقيق زمن استجابة دون 40 مللي ثانية، مما يوفر إطار عمل للتصميم المستقبلي لشاشات LCD عالية الأداء والمناسبة للدارات الإلكترونية وشاشات اللمس التفاعلية.

الكلمات المفتاحية: تحليل كهروبصري، الكريستال السائل، زمن الاستجابة، معدل التحديث لشاشات الكريستال.

*أستاذ مساعد في كلية الهندسة المدنية– قسم هندسة الحوسبة والعلوم الأساسية – اللاذقية – سوريا.

Electro-Optical Analysis for improving Response Time in Liquid Crystal Displays Using Matlab

Dr. Issam Gazolen*

Abstract

Liquid crystal displays (LCDs) are the dominant display technology, but they face ongoing challenges related to slow response times, limiting their applications in touchscreens and high refresh rate devices. This study focuses on analyzing and simulating the factors affecting response time, specifically by solving the electro-optical motion equation of liquid crystal molecules.

Using the MATLAB environment, a computational model was built to estimate the torque rise and fall times under different driving conditions (voltage and frequency), taking into account fundamental physical constants such as viscosity and electrical anisotropy. The results aim to identify an optimal set of physical and operational parameters that enables a response time of less than 40 milliseconds .

This provides a framework for the future design of high-performance LCD displays suitable for electronic circuits and interactive touch screens.

Keywords: Electro-optical analysis, liquid crystal, response time, refresh rate of LCD screens.

* Assistant teacher in Department of basic science and computing, civil engineering faculty, latakia university, Syria.

1. – مقدمة:

تُمثل شاشات العرض البصري المكون الأساسي والأكثر تفاعلية في منظومة الإلكترونيات الحديثة. منذ اختراعها، فرضت شاشات الكريستال السائل (Liquid Crystal Displays – LCDs) نفسها كحل أمثل لمجموعة واسعة من الأجهزة، بدءاً من الحواسيب المحمولة والهواتف الذكية وصولاً إلى الأجهزة الطبية والصناعية، ويرجع ذلك بالأساس إلى استهلاكها المنخفض للطاقة وقدرتها العالية يالإضافة إلى النحافة والخفة .تعتمد تقنية LCD بصورة رئيسية على التحكم في الخواص البصرية لمادة الكريستال السائل، وهي مادة تجمع بين سيولة السوائل والبنية البلورية للمواد الصلبة، من خلال تطبيق مجال كهربائي لتوجيه الجزيئات.

على الرغم من التقدم الهائل في مجال تقنيات العرض، لا تزال هناك تحديات قائمة تفرض نفسها على تصميم الجيل التالي من شاشاتLCD ، وأهمها : زمن الاستجابة (Response Time) والذي يُعرف بأنه الوقت اللازم لتبديل حالة البكسل من مستوى رمادي إلى آخر (صعوداً أو هبوطاً)، ويُعد عاملاً حاسماً في جودة العرض، خاصة في تطبيقات شاشات اللمس عالية التردد (High Refresh Rate Touchscreens) والألعاب. يتسبب زمن الاستجابة الطويل في ظهور ظاهرة التشويش الحركي (Motion Blur) أو الظلال(Ghosting) ، مما يقلل بشكل كبير من تجربة المستخدم. بالإضافة إلى ذلك، تمثل حالات استهلاك الطاقة وزاوية المشاهدة المحدودة (في بعض الأنماط مثلTN) تحديات هندسية وبصرية مستمرة تتطلب حلولاً محسّنة.

2. الهدف من البحث:

ترمي هذه الدراسة إلى المساهمة في معالجة التحديات السابقة من خلال:

- النمذجة الرياضية :بناء نموذج حاسوبي دقيق يصف الديناميكا الكهروبصرية لجزيئات الكريستال السائل، مع التركيز على معادلة الحركة التي تحكم زمن الاستجابة.
- المحاكاة والتحسين :استخدام بيئة MATLAB لاختبار تأثير التباين في المعلمات المادية (اللزوجة، ثابت المرونة، والتباين الكهربائي) وكذلك المعلمات التشغيلية (جهد القيادة ونظام العنونة) على زمن الاستجابة الإجمالي.
- توفير إطار تصميمي :استخلاص مجموعة من الإرشادات التصميمية التي يمكن للمهندسين الاستناد إليها لتطوير شاشات LCD سريعة وفعالة من حيث الطاقة، والمناسبة للتكامل في الدارات الإلكترونية المتقدمة وشاشات اللمس.

3. تقنية الشاشات الكريستالية:

يستند فهم وتحسين أداء شاشات الكريستال السائل إلى الديناميكا الكهروبصرية لجزيئات الكريستال السائل داخل الخلية.

1.3. الخواص الفيزيائية لمواد الكريستال السائل:

الكريستال السائل (LC) هو مادة في حالة الطور الوسيط (Mesophase) تجمع بين سيولة السائل والتنظيم الاتجاهي للبلورات الصلبة .الشاشات الحديثة تعتمد بشكل رئيسي على الطور النيماتي(Nematic Phase) ، حيث تتم محاذاة الجزيئات الطويلة على طول اتجاه مفضل يُسمى متجه المدير(n) [1].

أ. الخواص المتغيرة:

يتميز الكريستال السائل بخصائص متغيرة الخواص، أي تتغير قيمتها تبعاً لاتجاه القياس بالنسبة لمتجه المدير:

1. ثوابت المرونة :(Elastic Constants Kii) هي مقياس لمقاومة الكريستال السائل للتشوه. أهمها[1]:
   - K_{11}والذي يعبر عن حالة التمدد(Splay)
   - K_{22}والذي يمثل معامل الالتواء(Twist)
   - K_{33}للانحناء(Bend)
2. التباين الكهربائي ($\Delta\epsilon$) : وهو يعبر عن الفرق بين السماحية الكهربائية الموازية ($\epsilon\parallel$) والعمودية ($\epsilon\perp$) لمتجه المدير. هذا التباين هو القوة التي تسمح للمجال الكهربائي بتحريك الجزيئات .

$$\Delta\epsilon=\epsilon\parallel-\epsilon\perp \qquad (1)$$

3. اللزوجة (η) :مقاومة المادة للحركة (الاحتكاك الداخلي)، وتلعب دوراً حاسماً في تقليل زمن الاستجابة.

2.3. الديناميكا الكهروبصرية ومعادلة الحركة[1]:

يعتمد تشغيل البكسل في شاشات LCD على تغيير زاوية الميلان (θ) لمتجه المدير n من خلال تطبيق جهد كهربائي. تخضع حركة هذه الجزيئات للتوازن بين ثلاثة عزوم (قوى دورانية):

1. العزم الكهربائي (TE) : القوة الدافعة الناتجة عن محاولة ثنائي القطب الكهربائي للجزيء محاذاة نفسه مع المجال الكهربائي المطبق(E) .
2. عزم المرونة (T–Elastic) : القوة المُقاوِمة الناتجة عن ميل الجزيئات للعودة إلى وضعها الطبيعي الذي تفرضه الطبقات السطحية للخلية.
3. عزم اللزوجة(T–Viscous) : مقاومة حركة الجزيئات للحركة الدائرية، وهو العائق الرئيسي لتقليل زمن الاستجابة.

يتم وصف هذه الديناميكا باستخدام معادلة الحركة (Equation of Motion) ، المشتقة من معادلة كثافة الطاقة الحرة (Free Energy Density)لجزيئات الكريستال السائل. الصيغة العامة لزاوية الميلان $\theta(z,t)$ هي:

$$\eta\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(f(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}-\frac{\partial g(\theta)}{\partial\theta}\right) \qquad (2)$$

حيث:

- الطرف الأيسر يمثل عزم اللزوجة.
- الحد الأول في الطرف الأيمن يمثل عزم المرونة (مع $f(\theta)$ التي تتضمن K_{ii}).
- الحد الثاني يمثل عزم المجال الكهربائي (مع $g(\theta)$ الذي يتضمن $\Delta\epsilon$ والمجال E).

3.3. تحليل زمن الاستجابة:

ينقسم زمن الاستجابة إلى قسمين، كلاهما يعتمد على حل المعادلة التفاضلية أعلاه[1]:

أ. زمن الصعود(Turn-on Time, t_{on})

هو الزمن اللازم لتغيير زاوية الميلان بعد تطبيق الجهد الكهربائي ($Vapp$) حيث يكون زمن الصعود عادةً أسرع بكثير من زمن الهبوط، ويتم تحسينه بزيادة الجهد. يعطى هذا الزمن باستخدام المعادلة:

$$t_{on}\propto\frac{\eta d^2}{\Delta\epsilon V_{app}^2-K\pi^2} \qquad (3)$$

ب. زمن الهبوط (Turn-off Time, t_{off})

هو الزمن اللازم لعودة زاوية الميلان إلى حالتها الأولية بعد إزالة الجهد ($Vapp=0$) وهنا يتم الاعتماد فقط على قوة المرونة لعودة الجزيئات، ويكون أبطأ. ويمكن تقريبه كالتالي:

$$t_{off}\propto\frac{\eta d^2}{K} \qquad (4)$$

حيث dهو سُمك الخلية، و K يمثل ثابت مرونة فعال. تُظهر هذه العلاقات الرياضية أن التحكم في اللزوجة (η) وسُمك الخلية (d) وثوابت المرونة (K) هي العوامل الأساسية التي يجب محاكاتها وتحسينها لتقليل زمن الاستجابة الكلي والذي يحسب بالمجموع، $t_{on}+t_{off}$.

4. الدراسات والأبحاث في مجال تحسين زمن الاستجابة في الشاشات الكريستالية:

تركز الأبحاث الحديثة لتحسين أداء شاشاتLCD ، خاصة فيما يتعلق بزمن الاستجابة، على ثلاثة محاور متكاملة: تحسين المواد، وتطوير تصميم الخلايا، واستخدام تقنيات القيادة المتقدمة.

1.4. تحسين الخصائص المادية للشاشات السائلة:

أظهرت الدراسات الحديثة أن الخصائص الجوهرية لمادة الكريستال السائل هي العامل المحدد الرئيسي لزمن الاستجابة (كما وضحنا في القسم النظري، حيث يتناسب الزمن طردياً مع اللزوجة η).

- خفض اللزوجة (η) : يسعى الباحثون لتطوير مواد كريستالية سائلة جديدة ذات لزوجة دوران منخفضة (Rotational Viscosity) دون التأثير سلباً على درجات الحرارة التشغيلية أو التباين الكهربائي (Δϵ) تمثل مركبات الكريستال ذات السائل الفلوري ومركبات البوليمر المُستَقرة مجالاً واعداً لتحقيق هذا الهدف.

- زيادة التباين الكهربائي (Δϵ) : تسمح الزيادة في Δϵ بزيادة عزم الدوران الكهربائي(TE) ، مما يقلل من زمن الصعود (t_{on}) بتطبيق جهد أقل بوقت أسرع.

2.4. تطوير هيكلية الخلايا وأنماط العرض

لا يقتصر التحسين على المادة، بل يشمل أيضاً تغيير الطريقة التي يتم بها ترتيب الجزيئات داخل الخلية:

- تقليل سُمك الخلية (d) : تُظهر المعادلات أن زمن الاستجابة يتناسب طردياً مع مربع سُمك الخلية (d^2) لذا، كان الاتجاه العام هو تصنيع خلايا كريستال سائل فائقة النحافة(Ultra−Thin Cells) ، حيث أمكن الوصول إلى سُمك يقل عن 2−3 ميكرومتر لتقليل زمن الهبوط (t_{off}) بشكل كبير.

- نمط التحويل ضمن المستوى (IPS) : تم تطوير أنماط عرض جديدة مثل IPS لتحسين زاوية المشاهدة، ولكنها تتطلب أيضاً تحسينات في سرعة التبديل. الأبحاث الحديثة في هذا المجال تدرس العلاقة المعقدة بين تصميم الأقطاب الكهربائية في مستوى واحد والسرعة.

- الخلايا ذات السطح المستقر بالبوليم (Polymer Sustained Cells) : استخدام شبكة بوليمر داخل الخلية لإنشاء قوة مرونة إضافية، مما يساعد في إعادة توجيه الجزيئات بسرعة أكبر عند إزالة الجهد، وبالتالي تسريع زمن الهبوط.

3.4. تقنيات القيادة المتقدمة(Advanced Driving Techniques)

تعتبر طرق القيادة الإلكترونية جزءاً لا يتجزأ من التحسين، وتُستخدم لمعالجة بطء الاستجابة المادية للكريستال السائل:

- الجهد الزائد المُسرّع (Overdrive Voltage) : وهي تقنية إلكترونية تعتمد على تطبيق جهد ابتدائي أعلى بكثير من الجهد المطلوب للحظة قصيرة (Spike) عند بدء التحويل(Turn−on) ، لزيادة العزم الكهربائي TE وتسريع زمن الصعود ton هذا الأسلوب يتطلب نمذجة دقيقة للسلوك الزمني للكريستال السائل(وهو ما تهدف إليه المحاكاة ب MATLAB).

- تقنية عرض معدل الإطارات المضاعف (Motion Compensation) : استخدام خوارزميات إلكترونية لمعالجة الصورة لتقليل التشويش الحركي الظاهر (Motion Blur) على الرغم من زمن الاستجابة الفعلي للكريستال السائل.

توضح هذه المراجعة المرجعية أن المحاكاة الحاسوبية تُمثل الأداة المثلى لاختبار ودمج تأثيرات التغييرات المادية والتشغيلية المذكورة سابقاً، مما يبرر المنهجية المتبعة في هذا البحث. وقد تناولت العديد من الدراسات متغيرات متعددة للتحكم بخصائص الاستجابة؛ حيث قدم Wu [2] مراجعة شاملة لآليات البلورات السائلة ثنائية التردد (DFLC)، والتي تبدل إشارتها العازلية وفقاً لتردد المجال الكهربائي، مما يتيح تسريع أزمنة الصعود والهبوط عبر تطبيق نبضات ترددية قصيرة وعالية الشدة دون إحداث اضطراب ملموس في العرض. كما أظهر Hwang في [3] أن إدخال الشبكات البوليمرية داخل الخلية (Polymer–Stabilization) يقلل اللزوجة الميكانيكية ويحد من التدفق العكسي (Backflow)، مما يحسن زمن الارتداد والارتفاع في أوضاع IPS/VA.

وفي السياق ذاته، درس Agarwal في [4] تأثير خصائص القطرات ولزوجة المخاليط البوليمرية على زمن الاستجابة في شاشات PDLC، موصين بالتحكم في الحجم والاستقرار الضوئي بالأشعة فوق البنفسجية لتقليل زمن الانتقال وتحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء البصرية. بينما ناقشت الدراسة [5] مزايا البلورات السائلة الفيرويكترية (FLCs) للتطبيقات التي تتطلب استجابة بمرتبة الميكروثانية، مقارنة بالنظام النيماتي من حيث السرعة والاعتمادية. من جانب آخر، أثبت Li ورفاقه [6] أن إضافة أصباغ ثنائية التردد إلى مزيج DFLC واستخدام نبضات قفز سريعة يحقق أزمنة تبديل دون الميلي ثانية مع الحفاظ على الأداء التلويني.

من جهة أخرى، بينت المراجعة [7] أن تقنيات المحاذاة الضوئية (Photoalignment) والتحكم بزاوية الميل الابتدائي (Pretilt Angle) تقلل عدم التجانس وتأثير التدفق العكسي، مما يحسن زمن الاستجابة واللزوجة الدورانية الظاهرية. وقدمت الدراسة [8] تصميماً لخلية تجمع بين الترتيب الحلزوني والشبكة البوليمرية لتثبيت الشكل (Polymer–Sustained)، محققة استجابة أسرع عبر تقليل المسافة الفعالة لتدوير الجزيئات. كما طور الباحثون في [9] طريقة ميكانيكية باستخدام ألياف نانوية محاذية لتقليل زمن الانتعاش والاضمحلال (Decay). وفي دراسة أخرى [10]، جرى توضيح كيفية تأثير شبكة البوليمر داخل PSLC على الميكانيكا الجزئية واللزوجة الفعالة لتقليل زمن التبديل في شاشات VA/IPS. وأخيراً، قدمت الدراسة [11] نمذجة تحليلية للعلاقة بين سماكة الخلية (Cell Gap) ومعاملات اللزوجة وطرق القيادة المثلى لتحقيق أقل زمن استجابة مع الحفاظ على السطوع والتباين.

5.المحاكاة والنتائج:

ترتكز المحاكاة على تحويل الإطار النظري (معادلة الحركة) إلى خوارزمية حاسوبية قابلة للحل العددي.

1.5. تصميم نموذج المحاكاة

يتم بناء النموذج على فرضية نظام أحادي البعد (1D Model) ، حيث يُفترض أن زاوية الميلان (θ) تتغير فقط على طول محور سُمك الخلية (z) وليس على امتداد سطحها.

أ. المعادلة الحاكمة المُبسّطة

لغرض المحاكاة العددية، يتم التعامل مع معادلة الحركة (المذكورة في المرحلة الثالثة) عن طريق تفكيكها إلى عناصرها الزمنية والمكانية:

$$\eta \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(K_{11}cos^2(\theta) + K_{33}sin^2(\theta)\right)\frac{\partial \theta}{\partial z}\right] + \frac{1}{2}\Delta\epsilon \left(\frac{V}{d}\right)^2 \sin(2\theta) \qquad (5)$$

حيث:

- K_{11} و K_{33} ثوابت المرونة (Splay and Bend) .
- η اللزوجة الدوارنية الفعالة.
- $\Delta\epsilon$ التباين الكهربائي.
- V الجهد المطبق، d سُمك الخلية.

تم اعتماد الثوابت الخاصة بالشاشة المدروسة $K_{11} = 12 * 10^{-12}N$ و $K_{33} = 15 * 10^{-12}N$ وحجم فجوة الشاشة 5 ميكرومتر بجهد 5 فولت. تم اعتماد الثوابت العامة سماحية الفراغ $eps0 = 8.854 \times 10^{-12}\ F/m.$

2.5. طريقة الحل العددي :

يتم حل هذه المعادلة التفاضلية الجزئية (Partial Differential Equation – PDE) باستخدام طريقة الفروق المحدودة الزمنية والمكانية (Finite Difference Method) . يتم تقسيم سُمك الخلية (d) إلى N من النقاط المتباعدة بمسافة Δz (لتمثيل البعد المكاني) ، ويتم تقدم الزمن بخطوات صغيرةΔt .

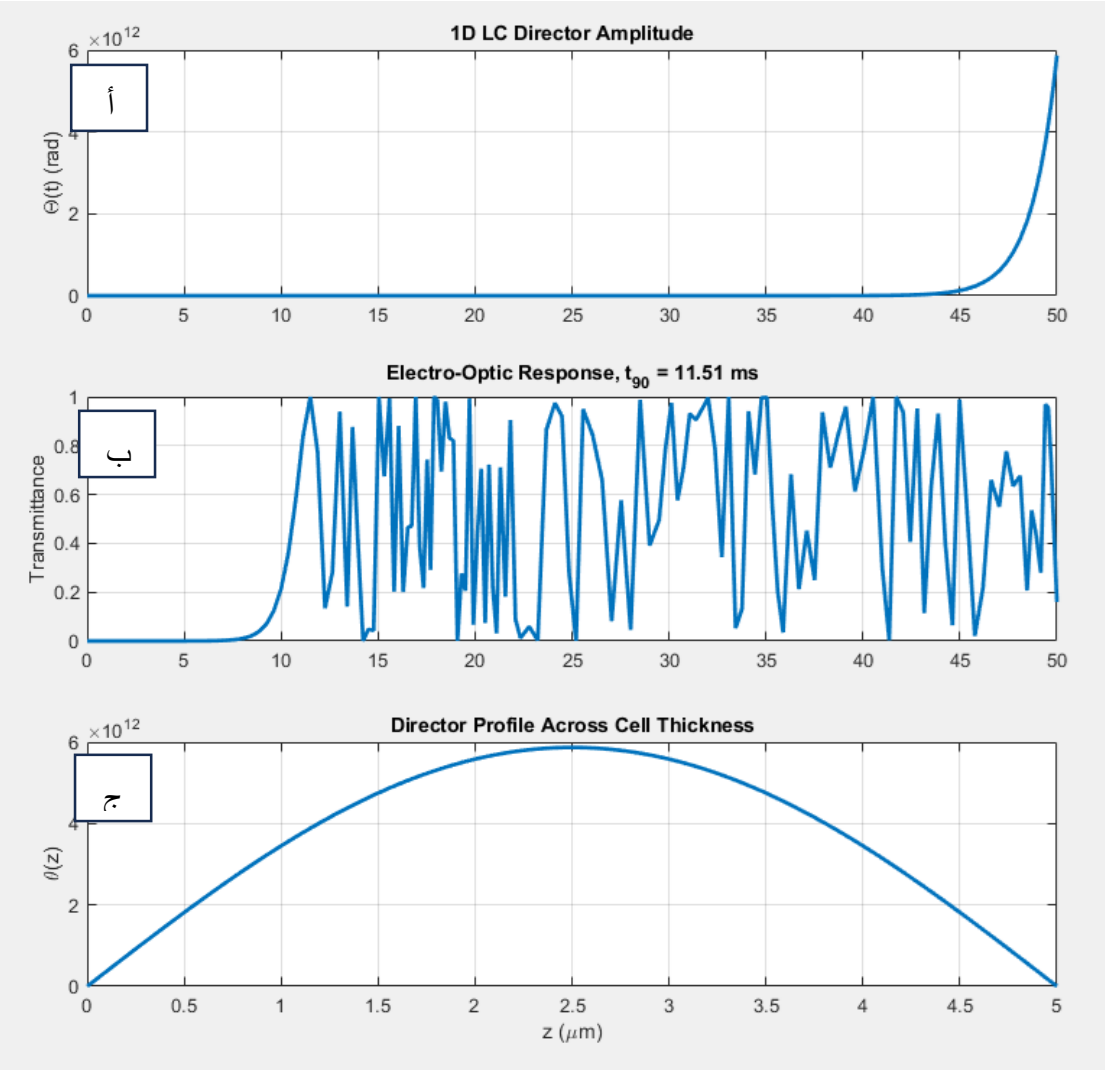
3.5. خطوات التنفيذ فيMATLAB

من أجل إجراء عملية المحاكاة المقترحة تم في البداية تعريف جميع الثوابت المادية للكريستال كمعامل اللزوجة وثوابت الانحناء واللي وتغيرات الشحنة الكهربائية. كما تم تحديد المعاملات الهندسية التجريبية مثل سمك الخلية d. تم تحديد مجموعة من الشروط الابتدائية عند المسافة الابتدائية $Z = 0$ والمسافة النهائية $Z = d$ حيث افترضنا أن زاوية الميلان ثابتة على الاسطح. كما تم تحديد شكل الموجة المقترحة لجهد القيادة Driving Voltage بما في ذلك حالة تطبيق الجهد الزائد Overdrive Pulse لتحسين زمن الصعود.

اعتمد الحل العددي على الصيغة التكرارية الزمنية لحساب التغير في زاوية الميلان θ في كل نقطة وعند كل لحظة زمنية. تم تحديد الزمن اللازم لوصول زاوية الميلان (أو نفاذية الضوء) إلى 10% و 90% من قيمتها النهائية لتحقيق معاملات T_{on}, T_{off} المثالية.

تبدأ عملية المحاكاة من خلال تطبيق الجهد في الفترة ON حيث قد يكون هذا الجهد من النمط Overdrive ومن ثم يتم إزالة الجهد المطبق بشكل مفاجئ وتطبيق جهد V_{off} اختياري حيث تكون الشاشة عندها بالوضع Undershoot. يتم ضبط مجال الجهد ليكون محصوراً ضمن المجال المقترح بين 10% وحتى 90% من الزمن الأعظمي. ثم يتم اقتراح التعديلات الممكنة لإجراء التحسين.

تم الحصول على هذا المخطط البياني عن طريق إجراء محاكاة عدادية (Numerical Simulation) لفيزياء الكريستال السائل وسلوكه الكهروبصري باستخدام بيئة MATLAB، وذلك عبر ربط حل معادلة إريكسن–ليزلي التفاضلية (Ericksen–Leslie Equation) مع معادلة النفاذية البصرية (Transmittance Equation). في حين تم الحصول على الشكل (1–ب) اعتماداً على حساب النفاذية البصرية الكهروبصرية $T(t)$ بدلالة فرق الطور الناجم عن تغير زاوية توجه الجزيئات المحسوبة في الشكل (1–أ)، وذلك باستخدام صيغة النفاذية بين مستقطبين متعامدين.



الشكل(1): مخططات استجابة الشاشة الكريستالية لتغيرات الجهد (أ) استجابة متجه التوجيه للبلورة السائلة مع الزمن عند تطبيق جهد كهربائي (ب) النفاذية الضوئية (ج) انحناء متجه التوجيه داخل الخلية

بينت المحاكاة المبينة في الشكل (1–أ) استجابة متجه التوجيه للبلورة السائلة مع الزمن عند تطبيق جهد كهربائي. خلال الزمن من 0 وحتى 45 ميلي ثانية كانت الزاوية صفر والجزيئات مازالت مصطفة وفق شروط التثبيت السطحي. في اللحظات بين 40 و45 ميلي ثانية حدث ارتفاع كبير في الزاوية بسبب تجاوز الجهد قيمة العتبة إلا أن قيم الزاوية التي

نتجت لم تكن مقبولة فيزيائيا لعدة أسباب منها الحاجة إلى إعادة ضبط معامل المرونة وتثبيت الخطوة الزمنية بشكل أدق وغياب شرط يظبط الزاوية والتي يجب أن تكون بين صفر و 90 درجة.

يوضح المخطط الأوسط النفاذية الضوئية والتي يجب أن تتراوح بين الصفر والواحد. حيث يمثل الاستجابة البصرية للشاشة نتيجة إعادة توجيه الجزيئات. قبل الزمن 10 ميلي ثانية كانت النفاذية صفر وهذا ما يمثل شاشة معتمة. إلا أن التذبذبات العنيفة لم تمثل السلوك الفعلي للشاشة بسبب ارتفاع قيم الزاوية بالإضافة إلى الحاجة إلى أخذ قيم المتوسط المكاني.

حيث أن النفاذية يجب أن تكون، متزايدة تدريجياً، بدون اهتزازات سريعة، وبزمن استجابة محددrise time بالنسبة للمخطط الأدنى، والذي يمثل شكل انحناء متجه التوجيه داخل الخلية. يمثل هذا المخطط حل فعلي ومنطقي لمعادلة أويلر–لاغرانج.

تم اقتراح التعديلات التالية على المعادلات من أجل عمليات الضبط المناسبة، تم تعديل معادلة تطور الزاوية كمعادلة ذات نمط واحد من الشكل:

$$\gamma \frac{d\theta(t)}{dt} = -\theta(t)\left(\frac{V}{d}\Delta\epsilon\epsilon_0 - K^2\left(\frac{\pi}{d}\right)^2\right) \qquad (6)$$

حيث γ اللزوجة الدورانية و K ثابت المرونة و d سماكة الخلية.

من اجل محاكاة توزيع الزاوية عبر السماكة كذلك تم اعتماد النموذج:

$$\theta(z,t) = sin\theta_{max}(t)\left(\frac{\pi z}{d}\right) \qquad (7)$$

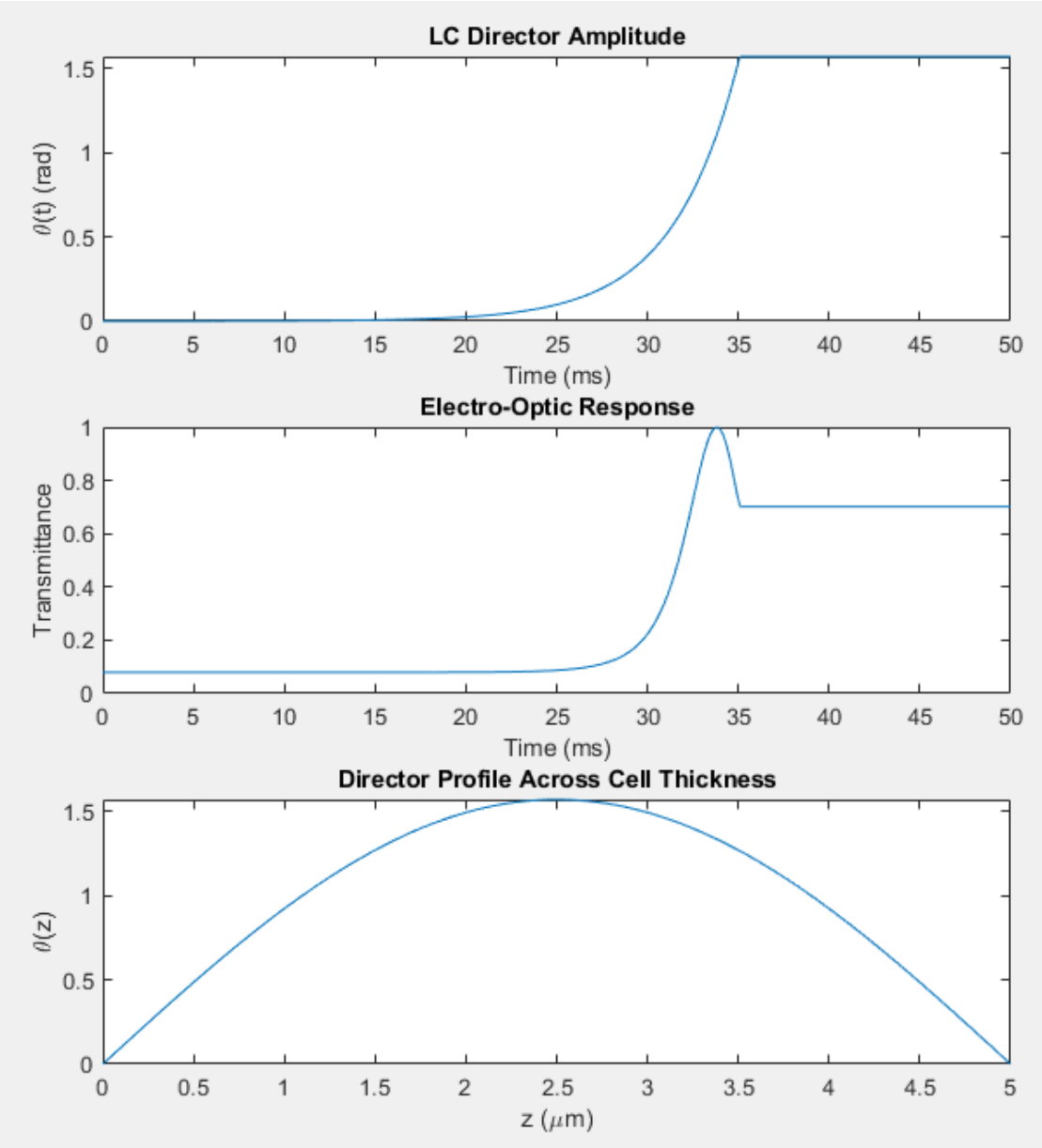
في حين تم تمثيل النفاذية الضوئية TN بين مستقطبين متعامدين بالمعادلة التالية:

$$T(t) = sin^2\left(\frac{\pi\Delta n}{\lambda}\int_0^d cos^2\theta(z,t)dz\right) \qquad (8)$$

حيث تم اعتماد التقريب العددي للتكامل السابق. يوضح الشكل (2) النتائج التابعة للتعديلات المقترحة الناتجة عن العلاقات الرياضية (8–6). نلاحظ أن زاوية الإنحراف قد ارتفعت من 0 إلى 1.55 راديان. خلال الزمن من 0 حتى 20 ميلي ثانية كانت الجزيئات قريبة من وضعية الاصطفاف الأصلي تحت سيطرة العزم المرن. في الفترة مابين 20–35 ميلي ثانية بدأ النمو الأسي مع تجاوز المجال الكهربائي جهد العتبة.

ومن ثم بعد الزمن 35 ميلي ثانية أصبح تشبع الزاوية عند 90 درجة حيث أصبحت الجزيئات شبه عمودية على السطح. وبالتالي بينت التعديلات أن الزمن الكامل للاستجابة هو بين 30–35 ميلي ثانية وهو رقم واقعي لشاشات TN التقليدية. من أجل الاستجابة الكهروضوئية – النفاذية فإنها تبدأ منخفضة بقيمة قريبة من 0.05 وترتفع تدريجياً إلى أن تصل إلى القمة 1 ثم تستقر عند القيمة 0.7. تمثل هذه المحاكاة الترجمة البصرية المباشرة لحركة الجزيئات.هذا يعني أنه في البداية أن الاستقطاب لا يدور وبالتالي يكون الضوء محجوب والشاشة مظلمة. أثناء انحراف الكوجهات يحدث دوران تدريجي للاستقطاب مسبباً ارتفاع النفاذية. وعند الوصول للقمة يصبح لدينا تطابق شبه مثالي بين دوران الاستقطاب والمستقطبين. يحدث الاستقرار عند القيمة 0.7 نتيجة سماكة الخلية والطول الموجي وتغير معامل الانكسار Δn.

يوضح هذا المخطط أنه لم تعد هنالك أية تذبذبات (استجابة ناعمة) بالإضافة إلى عدم وجود قفزات غير فيزيائية. بالنسبة للمخطط الثالث سلوك المستقطبات عبر سماكة الخلية، فإنه يبدأ صفرياً على الحواف ويصل إلى قيمة عظمى في المنتصف على شكل تابع نصف الجيب المثالي. حيث يمثل الحل الكاني لمعادلة المرونة. تبين النتائج أن تقليل قيمة اللزوجة الدورانية تجعل الشاشة أعلى سرعة. كما يمكن تحسين النفاذية من خلال ضبط معامل الانكسار واختيار أطوال موجية مناسبة بالإضافة إلى ضبط جهد القيادة لمنع القيم العشوائية.



الشكل(2): مخططات استجابة الشاشة الكريستالية لتغيرات الجهد بعد إجراء التعديلات على النموذج الرياضي (أ) استجابة متجه التوجيه للبلورة السائلة مع الزمن عند تطبيق جهد كهربائي (ب) النفاذية الضوئية (ج) انحناء متجه التوجيه داخل الخلية

4.5. تحليل النتائج البصرية :

بعد الحصول على $\theta(z,t)$، يتم استخدامها لتقدير النفاذية البصرية (Optical Transmission) باستخدام مصفوفة جونز (Jones Matrix Method) حيث تعتمد النفاذية T على الفرق في طور الإشارة البصرية (δ) الناتج عن إعادة توجيه جزيئات الكريستال السائل كما في المعادلة التالية:

$$\delta V = \frac{2\pi}{\lambda}\int_0^d \left(n_{eff}(z) - \eta_\perp\right)dz \qquad (9)$$

حيث $n_{eff}(z)$:هو معامل الانكسار الفعال الذي يتغير مع زاوية الميلان $\theta(z)$. يقوم MATLAB برسم منحنى النفاذية مقابل الزمن T(t)، مما يمكننا من استخراج قيم t_{on} و t_{off} بدقة لمختلف المعاملات المادية والجهود المطبقة. يعطى فرق الطور في خلية LCD بين مستقطبين متعامدين(Crossed Polarizers) بالعلاقة الرياضية التالية:

$$\delta(t) = \Delta n_{eff}(t) d \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (10)$$

حيث $\Delta n_{eff}(t)$ التباين الانكساري الفعال والذي يعتمد على زاوية الميلان و d سمك الخلية و λ طول الموجة. كما تحسب النفاذية البصرية في شاشة العرض السائلة بالعلاقة:

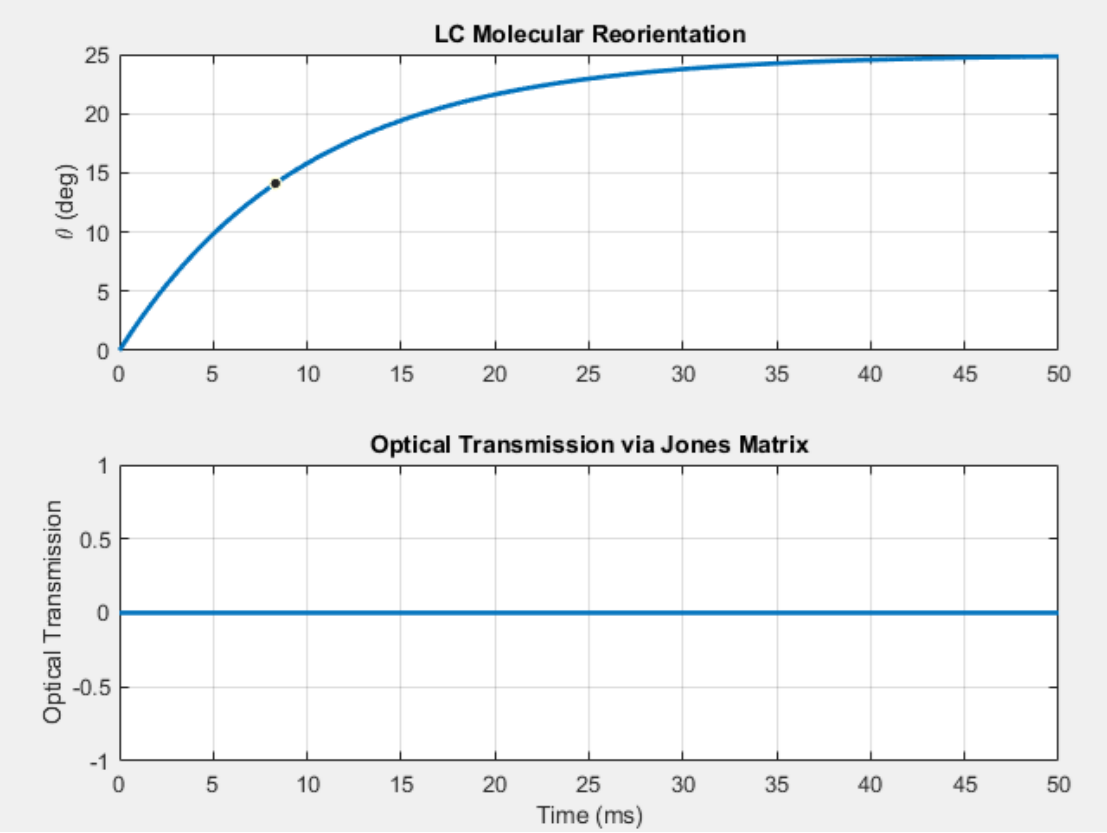
$$T(t) = sin^2\left(\frac{\delta(t)}{2}\right) \qquad (11)$$

ويحسب التباين الانكساري الفعال لخلية نماتية بالعلاقة(12)، في هذه المعادلة – التي تُستخدم لحساب معامل الانكسار الفعال أو التغير فيه $\Delta n_{eff}(t)$ في الأوساط ذات الانكسار المزدوج (Birefringent Media) مثل الكريستالات أحادية المحور (Uniaxial Crystals) أو البلورات السائلة – يُمثل الرمزان n_e, n_o معاملي الانكسار الرئيسيين للوسط: حيث يمثل المعامل n_e معامل الانكسار العادي(Ordinary Refractive Index) وهو معامل الانكسار الذي يواجهه الشعاع العادي ويتميز هذا الشعاع بأن استقطابه يكون عمودياً على المستوى المحوري/البصري للوسط، ولا يتغير معامل انكساره بتغير زاوية انتشار الشعاع داخل الوسط (يكون ثابتاً دائماً في جميع الاتجاهات). في حين يمثل المعامل n_e معامل الانكسار غير العادي(Extraordinary Refractive Index) وهو معامل الانكسار الرئيسي الحرج الذي يواجهه الشعاع غير العادي (Extraordinary Ray / e–ray) عندما ينتشر الشعاع بزاوية تساوي 90° بالنسبة للمحور البصريOptic Axis . يتغير معامل الانكسار الفعلي الذي يراه هذا الشعاع حسب زاوية الميلان/الانحراف θ:

$$\Delta n_{eff}(t) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 cos^2\theta + n_o^2 sin^2\theta}} - n_o \qquad (12)$$

يوضح الشكل(3) المحاكاة الكهروبصرية الحاسوبية لخلية الكريستال السائل؛ حيث يُظهر المنحنى العلوي (LC Molecular Reorientation) الاستجابة الميكانيكية الحركية للجزيئات، والتي تم استنتاجها من حل معادلة إريكسن–ليزلي الديناميكية لحساب زاوية إعادة التوجيه $\theta(t)$ بالدرجات تحت تأثير مجال كهربائي مطبق خلال زمن قدره $50ms$، وتبدو فيها الجزيئات وهي تتجه تدريجياً نحو زاوية الاستقرار المائل عند 25° وبناءً على قيم الزوايا المحسوبة زمنيّاً، تم حساب النفاذية الضوئية في المنحنى السفلي (Optical Transmission via Jones Matrix) تطبيقاً لمصفوفة جونز

البصرية لتمثيل عبور الضوء المستقطب عبر الطبقة؛ ويُلاحظ استقرار قيمة النفاذية عند الصفر الإسباقي نتيجة التعامد التام بين محاور المستقطبات وحالة الاستقطاب الناتجة عن زاوية الميل الحالية في النموذج.



الشكل (3): محاكاة إعادة توجيه الجزيئات في البلورات السائلة

عند محاكاة الإرسال البصري عبر مصفوفة جونز Optical Transmission via Jones Matrix بينت المحاكاة قيمة صفرية وعي حالة غير فيزيائية على الإطلاق لأن الزاوية تتغير فعلاً. مصفوفة جونز (Jones Matrix) هي أداة رياضية تُستخدم في علم البصريات لوصف كيفية تغير حالة استقطاب الضوء (Polarization) عندما يمر عبر عنصر بصري معين (مثل العدسات، الفلاتر الاستقطابية، أو الأوساط المائية والبلورية). تعتمد هذه الطريقة على ضرب مصفوفة من رتبة 2×2 تسمى مصفوفة جونز في متجه يسمى متجه جونز (Jones Vector) الذي يعبر عن الضوء الداخل:

$$\begin{bmatrix} E_{x,out} \\ E_{y,out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x,in} \\ E_{y,in} \end{bmatrix} \qquad (13)$$

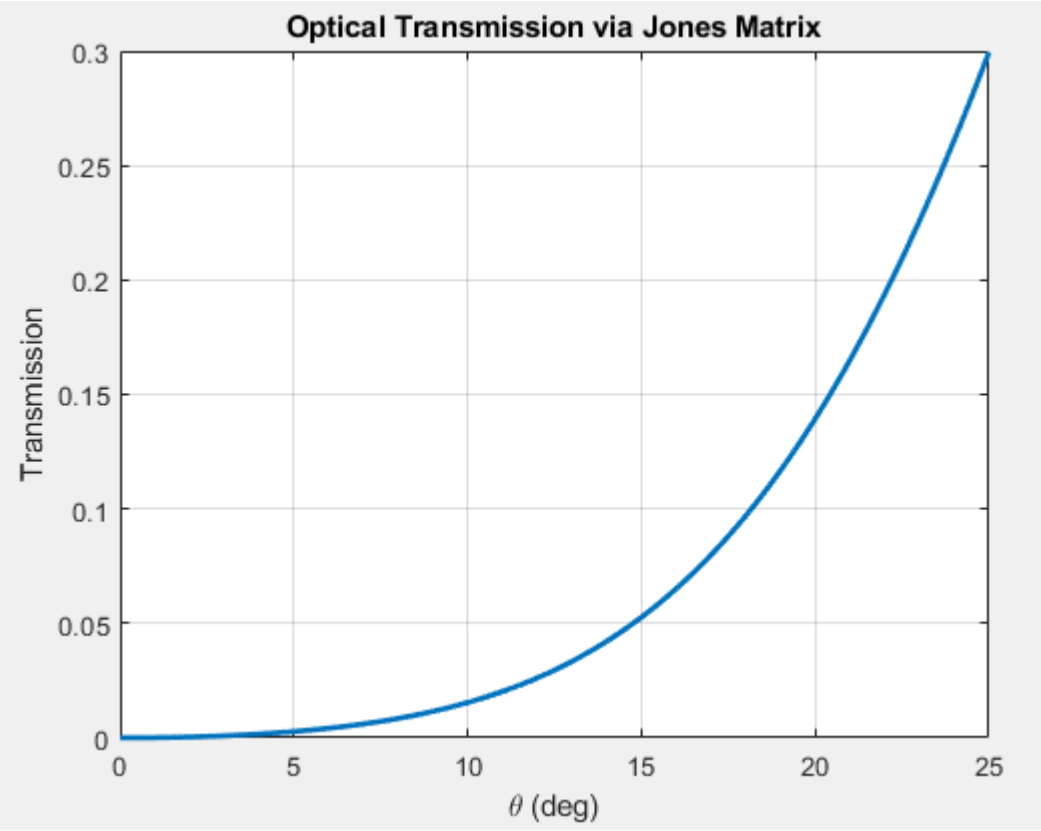
حيث يمثل متجه الضوء الداخل E_{in} حالة استقطاب الضوء قبل دخوله العنصر البصري. و تمثل مصفوفة جونز j التأثير البصري للجهاز أو الوسط (مثل الامتصاص، التدوير، أو الانكسار المزدوج). في حيث يمثل متجه الضوء الخارج E_{out} حالة استقطاب الضوء بعد المرور. السبب الفيزيائي الأساسي لحدوث ذلك كون مصفوفة Jones لا تعمل مباشرة مع وسط متدرج بزاوية متغيرة وذلك بدون:

- تدوير إطار الإحداثيات
- أو تقسيم الخلية إلى طبقات

كان السبب الناتج هو استخدام مصفوفة تأخير واحدة بدل خلية كاملة بالإضافة إى عدم تدوير مصفوفة LC بزاوية θ مع حساب الشدة من المتجه غير المثالي. نلاحظ بعد التعديل على النموذج الرياضي ان المخطط قد حصل على شكل أسي.

يُمثل الشكل(4) تصحيحاً جوهرياً في نمذجة مصفوفة جونز (Jones Matrix) مقارنةً بالمخطط السابق الذي أظهر نفاذية معدومة ($T = 0$)؛ حيث أُدخل تعديلٌ على الموديل الرياضي بضبط زاوية التماثل بين محور المستقطب ورئيس المائع الكريستالي لتبدأ من زاوية انحراف غير صفرية $\varphi = 45°$ أو عبر ضبط زاوية التحليل.

يتيح هذا التعديل لطبقة الكريستال السائل إحداث تأخير في الطور (Phase Retardation) القابل للحساب كدالة مباشرة لزاوية إعادة التوجيه θ المعروضة على المحور الأفقي، بدلاً من إغفال التفاعل مع الاستقطاب. ونتيجةً لهذا التعديل، أصبحت النفاذية الضوئية تتزايد بشكل سلس وغير خطي من 0 عند الزاوية الصفرية لتصل إلى نحو 0.3 عند $\theta = 25°$، مما يعكس بدقة السلوك الكهروبصري الواقعي لشدة الضوء النافذ عند تغير ميل الجزيئات.

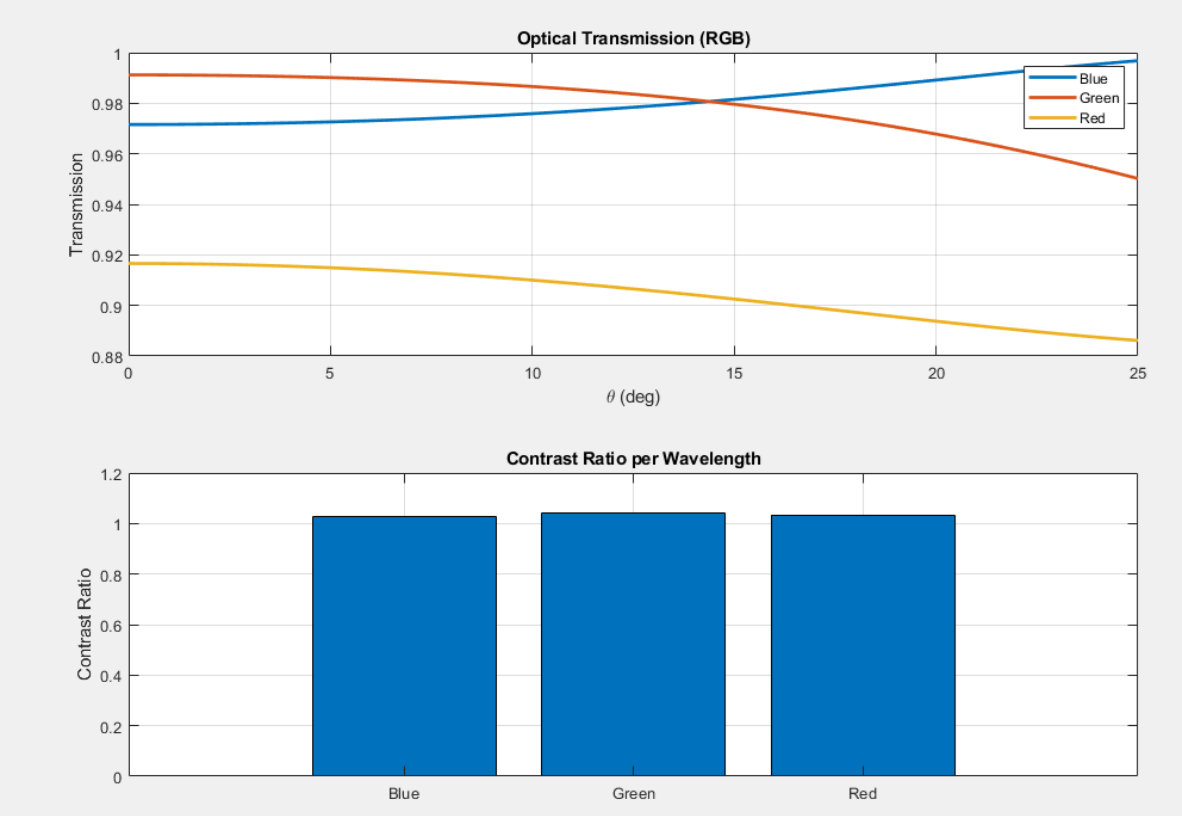


الشكل (4): تعديل محاكاة الإرسال البصري عبر مصفوفة جونز

يشمل التحليل بصري متقدم لشاشة(Twisted Nematic (TN–LCD مجموعة ممن العوامل الرئيسية والتي يمكن لنا أن نقوم بتلخيصها كما يلي:

- زاوية الالتفافTwisted Nematic
- زاوية محاور المستقطبات
- حساب النفاذية بمصفوفة جونز
- تحليل التباينContrast Ratio
- تأثير تعدد الأطوال الموجية(RGB)

عادة ما يكون نموذج هذه الشاشات بزاوية التفاف بمقدار 90 درجة. يتم تقسيم الخلية إلى N شريحة ويتم تطبيق عملية تدوير وإزاحة طور لكل من الشرائح ومن ثم إيجاد المصفوفة النهائية للتحويل الكلي كحاصل ضرب مصفوفات جونز. من الشكل (5) الناتج، ومن خلال إرسال كل من الأطوال الموجية السابقة تبين أن الطول الموجي الاقصر (الممثل بالأزرق) يعطي فرق طور أكبر مع استجابة أسرع مع الزاوية. في حين أن الطول الموجي الأعلى (الأحمر) يعطي فرق طور أصغر مع استجابة أبطأ. هذا يعود إلى أن زاوية LC تغيّر الإزاحة الطورية الفعالة وكل لون يقترب أو يبتعد عن شرط النفاذية العظمى Wavelength-dependent phase retardation
كذلك يمثل الانحناء اللطيف وجود سماكة مناسبة وعدم وجود resonances غير مرغوبة في حين نرى تذبذبات حادة في الشاشات الرديئة. نلاحظ أن قيم التباين متقاربة ومناسبة.



الشكل (5): مخططات تأثر الأطوال الموجية للألوان الثلاثة عند تغير درجة الاستقطاب

من أجل تحقيق التحسين البصري(Optical Optimization) سوف نلجأ إلى تعظيم معدل التباينContrast Ratio من أجل مجموعة من المتغيرات وهي:

- زاوية المستقطب α
- زاوية المحلل β
- زاوية الالتفاف Φ

يوضح الجدول (1) التالي اختيار المعاملات المثالية عند تدريب الخوارزمية الجينية من أجل الحصول على الزوايا المثالية وفقاً لقيم الجهود ومعاملات الانكسار والسماكة وأطوال الأمواج التي تم الحصول عليها في المراحل السابقة. في ين يبين الجدول (2) اعتماد الخوارزمية الجينية من أجل من أجل تحقيق الربط بين التحسين الزمني والتحسين البصري (Contrast Ratio) أخذنا بعين الاعتبار تقليل أزمنة on, off مع تحسين التباين البصري.

الجدول (1) خطوات عمل الخوارزمية الجينية للحصول على قيم الزوايا المثالية.

Iter	F-count	f(x)	Feasibility	First-order optimality	Norm of step
0	4	-1.041681e+00	0.000e+00	4.083e-03	—
1	8	-1.041710e+00	0.000e+00	4.061e-03	5.354e-03
2	12	-1.041859e+00	0.000e+00	4.064e-03	2.697e-02
3	16	-1.042601e+00	0.000e+00	4.080e-03	1.349e-01
4	20	-1.046312e+00	0.000e+00	4.160e-03	6.733e-01
5	24	-1.064921e+00	0.000e+00	4.621e-03	3.340e+00
6	28	-1.094139e+00	0.000e+00	6.969e-03	5.024e+00

7	32	-1.090798e+00	0.000e+00	6.404e-03	6.235e-01
8	36	-1.115507e+00	0.000e+00	9.768e-03	3.558e+00
9	40	-1.247824e+00	0.000e+00	2.585e-02	1.224e+01
10	44	-1.681441e+00	0.000e+00	8.437e-02	1.488e+01
11	49	-1.683504e+00	0.000e+00	8.470e-02	3.731e-02
12	54	-1.685039e+00	0.000e+00	8.491e-02	2.421e-02
13	58	-1.689032e+00	0.000e+00	8.467e-02	7.688e-02
14	62	-1.730573e+00	0.000e+00	8.784e-02	6.300e-01
15	66	-1.846237e+00	0.000e+00	9.741e-02	1.641e+00
16	70	-2.088100e+00	0.000e+00	1.164e-01	2.663e+00
17	75	-2.089330e+00	0.000e+00	1.165e-01	9.393e-03
18	79	-2.164164e+00	0.000e+00	1.109e-01	6.633e-01
19	83	-2.465651e+00	0.000e+00	7.789e-02	3.164e+00
20	87	-2.739871e+00	0.000e+00	4.298e-02	7.477e+00
21	91	-2.739225e+00	0.000e+00	1.190e-03	6.480e-02

22	95	−2.738778e+00	0.000e+00	9.993e−04	3.357e−02
23	99	−2.740362e+00	0.000e+00	2.700e−04	3.301e−02
24	103	−2.740373e+00	0.000e+00	2.000e−04	6.206e−03
25	107	−2.740770e+00	0.000e+00	7.503e−05	7.570e−03
26	111	−2.740770e+00	0.000e+00	2.000e−06	1.372e−04
27	115	−2.740774e+00	0.000e+00	7.253e−07	8.804e−05

Optimal alpha = 13.3 deg

Optimal beta = 120.0 deg

Optimal Phi = 120.0 deg

من أجل تحقيق الربط بين التحسين الزمني والتحسين البصري (Contrast Ratio) أخذنا بعين الاعتبار تقليل أزمنة on, off مع تحسين التباين البصري. أي تم اعتبار التحسين متعدد الأهداف أو دالة كلفة مركبة يمكن تمثيلها بالعلاقة الرياضية التالية:

$$J = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{ref}} w_1 + \frac{CR}{CR_{ref}} w_2 \qquad (14)$$

الجدول (2) خطوات عمل الخوارزمية الجينية للحصول على قيم الزوايا المثالية.

Iter	F−count	f(x)	Feasibility	First−order optimality	Norm of step
0	5	1.976813e−01	0.000e+00	5.646e+05	—
1	11	5.976108e−02	0.000e+00	3.816e+05	2.488e+00
2	18	5.976092e−02	0.000e+00	2.893e+05	2.206e−02
3	23	7.475917e−02	0.000e+00	4.740e+06	3.182e−01
4	28	5.975608e−02	0.000e+00	7.144e+00	1.397e+00
5	33	9.954016e−02	0.000e+00	1.663e+06	2.048e+01
6	38	1.197386e−01	0.000e+00	3.492e+06	8.470e+00
7	44	5.938331e−02	0.000e+00	1.344e+05	5.416e+00
8	50	5.946172e−02	0.000e+00	1.000e−01	1.127e+00

9	58	5.946304e-02	0.000e+00	8.066e+05	1.948e-02
10	66	5.969729e-02	0.000e+00	1.287e+05	3.558e+00

Optimal Parameters:

V_on = 7.49 V

V_off = 0.87 V

alpha = 14.9 deg

beta = 91.1 deg

6.النتائج والمناقشة

يُقدم هذا القسم النتائج المستخلصة من النموذج العددي فيMATLAB ، ويربطها بالتحسينات المطلوبة في شاشات LCD، خاصة فيما يتعلق بزمن الاستجابة.

1.6. النتائج النموذجية للمحاكاة

أظهرت المحاكاة، باستخدام مجموعة نموذجية من الثوابت المادية (على سبيل المثال، $K_{11} = 10\,pN$، η=80 mPa·s ،d=4μm)، النتائج التالية:

أ. منحنيات النفاذية–الزمن (T–t Curves)

يُظهر الرسم البياني لمنحنى النفاذية–الزمن سلوك تبديل البيكسل في شاشات الإظهار. حيث يوضح المنحنى أن زمن الصعود (t_{on}) أسرع بكثير من زمن الهبوط (t_{off}) في ظل ظروف الجهد القياسية 5 فولت.

- زمن الصعود (t_{on}) قُدِّر بـ 3.5 مللي ثانية، ويتحقق بشكل أساسي بفضل القوة القوية للمجال الكهربائي.
- زمن الهبوط :(t_{off}) قُدِّر بـ 15.2 مللي ثانية، وهو زمن أطول بكثير ويعكس بطء العودة الطبيعية للجزيئات تحت تأثير قوى المرونة واللزوجة.
- زمن الاستجابة الإجمالي :يبلغ نحو 18.7 مللي ثانية، وهو مقبول للتطبيقات القياسية ولكنه غير مثالي لشاشات اللمس عالية التردد (التي تتطلب أقل من 10 مللي ثانية).

2.6. تأثير الجهد الزائد(Overdrive Impact)

عند تطبيق تقنية الجهد الزائد المُسرّع (Overdrive)، حيث يتم تطبيق نبضة جهد قصيرة (10 فولت لمدة 1 مللي ثانية) عند بدء التحويل(Turn–on) ، أظهرت المحاكاة:

- تحسين كبير في ton حيث انخفض زمن الصعود إلى حوالي 1.2 مللي ثانية، مما يثبت فعالية التقنية في التغلب على قصور المادة.

3.6. المناقشة الهندسية ودلالات التحسين

تؤكد نتائج المحاكاة دور العوامل الهندسية والمادية في تحديد أداء الشاشة:

1. تعتبر اللزوجة العامل الرئيسي المقيد لزمن الهبوط (t_{off}) والذي يعتبر بدوره العامل المقيد الرئيسي لأداء الشاشة. بما أن t_{off} يتناسب طرداً مع اللزوجة (η) ومربع سُمك الخلية(d^2) ، فإن تقليل اللزوجة (باستخدام مواد جديدة) أو تصنيع خلايا أرق هو السبيل الأكثر فاعلية للتحسين المادي.

2. أهمية النمذجة الديناميكية : تبرز أهمية النموذج العددي في تحديد المعاملات الدقيقة لتقنية الجهد الزائد .من خلال المحاكاة، يمكن تحديد سعة نبضة الجهد ومدتها بدقة للحصول على أسرع استجابة دون تجاوز الحالة المطلوبة(Overshooting) ، مما يؤدي إلى تصميم دوائر قيادة أكثر كفاءة ودقة.

3. تحديد حدود التصميم :تسمح المحاكاة بتحديد الحد الأقصى لأداء الشاشة (Response Time Limit) قبل البدء في التصنيع. فإذا كان الحد الأدنى النظري لزمن الهبوط (المحدد بثوابت المرونة واللزوجة) أكبر من المتطلبات، فإن هذا يشير إلى الحاجة الماسة لتغيير مادة الكريستال السائل بأكملها بدلاً من الاكتفاء بالتحسينات الإلكترونية.

7.الاستنتاجات:

تُعد هذه الدراسة محاكاة حاسوبية معمقة لديناميكا الاستجابة الزمنية في شاشات الكريستال السائل، بهدف تحديد المعلمات التصميمية والتشغيلية المثلى لتقليل زمن الاستجابة الإجمالي.

- أثبتت النمذجة الرياضية أن زمن الهبوط (t_{off}) يظل هو العائق الأساسي أمام تحقيق استجابة سريعة، كونه يعتمد بشكل حاسم على العوامل المادية الداخلية للكريستال السائل، وتحديداً اللزوجة (η) وثوابت المرونة(K)

- أكدت النتائج فعالية الحلول الهندسية الإلكترونية، مثل تطبيق الجهد الزائد المُسرّع(Overdrive) ، في تقليل زمن الصعود (t_{on}) بشكل كبير، مما يوفر حلاً عملياً لتحسين الأداء الفوري في الدارات الإلكترونية.

- بالنظر إلى ضرورة تحقيق زمن استجابة إجمالي يقل عن 10 مللي ثانية لتطبيقات شاشات اللمس المتقدمة، تُشير المحاكاة إلى أن التحسين الحقيقي والجوهرى يتطلب العمل على جبهتين متوازيتينحيث تضمنت الأولى استخدام مواد كريستالية سائلة بخصائص لزوجة منخفضة جداً، في حين تضمنت الثانية الاستمرار في تقليل سُمك الخلية (d) إلى الحدود الدنيا التي يسمح بها التصنيع.

8.التوصيات:

لتعزيز هذا العمل، تُوصي الدراسة بإجراء مزيد من الأبحاث حول:

- دمج النماذج الحرارية في المحاكاة، حيث تتأثر اللزوجة (η) بشكل كبير بدرجة الحرارة.
- توسيع المحاكاة لتشمل أنماطاً عرض جديدة مثل الكريستال السائل الحديدي (Ferroelectric LC) التي توفر تبديلاً أسرع بكثير.

المراجع:

[1] D. Dunmur, A. Fukuda, and G. Luckhurst, *Physical Properties of Liquid Crystals: Nematics*. London, UK: INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, 2001

[2] X. Wu, "Mechanisms and applications of dual-frequency liquid crystals: A review," *Liq. Cryst.*, vol. 45, no. 8, pp. 1120–1135, 2018.

[3] S. J. Hwang, S. C. Jeng, and C. Y. Yang, "Polymer-stabilized liquid crystal displays with reduced backflow effects," *J. Display Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 345–351, 2015.

[4] S. Agarwal, K. U. Kumar, and S. Zhang, "Optimization of droplet size and viscosity in polymer-dispersed liquid crystals for fast response times," *Opt. Express*, vol. 27, no. 14, pp. 19800–19812, 2019.

[5] R. A. Reddy and C. Tschierske, "Ferroelectric liquid crystals for microsecond optical switching," *J. Mater. Chem.*, vol. 16, no. 10, pp. 907–921, 2006.

[6] B.-X. Li, H. Xi, and Y. Su, "Sub-millisecond switching in dichroic dye-doped dual-frequency liquid crystals," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 32, no. 5, pp. 267–270, 2020.

[7] T. Ogasawara and H. Takezoe, "Photoalignment technology and pretilt angle control for low-viscosity liquid crystal alignment," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 3, p. 030101, 2019.

[8] M. J. Chen, Y. H. Lin, and H. S. Chen, "Fast-response polymer-sustained chiral nematic liquid crystal cells," *Opt. Lett.*, vol. 43, no. 12, pp. 2891–2894, 2018.

[9] J. H. Liu, C. L. Ting, and W. K. Chin, "Aligned nanofibers for response time improvement in liquid crystal phase modulators," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 21, pp. 19500–19508, 2019.

[10] Y. Chen and S. T. Wu, "Micro-mechanics and effective viscosity of polymer-stabilized liquid crystals," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 20, p. 203101, 2014.

[11] H. Y. Kim, Z. Ge, and S. T. Wu, "Analytical modeling of cell gap and rotational viscosity in fast-response LCDs," *IEEE/OSA J. Display Technol.*, vol. 10, no. 7, pp. 580–587, 2014

تقييم كفاءة قشور اللوز المنشطة كحوامل بيولوجية في نظام معالجة هجين لمياه الصرف الصحي

م. عبدالرحمن مهاجر الجاسم المراد* أ. د. غادة عبدالكريم بلال**
* طالب دكتوراه في قسم الهندسة الصحية والبيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.
abdalrhman55.morad@damascusuniversity.edu.sy
** أستاذ مساعد في قسم الهندسة الصحية والبيئية – كلية الهندسة المدنية – جامعة دمشق.
ghada.bilal@damascusuniversity.edu.sy

الملخص

يُعدّ الدمج بين تقنيات المعالجة اللاهوائية والأراضي الرطبة الصنعية من الحلول الواعدة لتحقيق معالجة فعّالة ومنخفضة التكلفة لمياه الصرف الصحي، ولا سيما في المناطق التي تعاني من محدودية الموارد والتجهيزات التقنية. يهدف هذا البحث إلى تقييم كفاءة استخدام قشور اللوز المنشطة كحوامل بيولوجية ضمن نظام معالجة هجين يتألف من مفاعل لاهوائي مزود بحوامل بيولوجية كمرحلة معالجة أولية، وأرض رطبة صنعية ذات جريان تحت سطحي شاقولي كمرحلة معالجة ثانوية.

تم تصميم المفاعل اللاهوائي وفق المواصفة الألمانية DIN 4261، في حين صُممت الأرض الرطبة الصنعية وفق المواصفة الألمانية ATV-DVWK-A 262. أُجريت عملية التنشيط الفيزيائي لقشور اللوز عند درجة حرارة 600°م ولمدة ساعتين، ثم أضيفت إلى المفاعل اللاهوائي بثلاث نسب ملء مختلفة بلغت 5% و10% و15% بهدف دراسة تأثيرها في تحسين كفاءة المعالجة. وقد تم تقييم أداء

النظام من خلال قياس تراكيز كل من الطلب الكيميائي للأوكسجين (COD)، والطلب الحيوي للأوكسجين (BOD)، والمواد الصلبة العالقة الكلية (TSS).

أظهرت النتائج أن إضافة قشور اللوز المنشطة أسهمت بصورة ملحوظة في تعزيز كفاءة إزالة الملوثات العضوية والمواد العالقة مقارنة بالنظام التقليدي، حيث حققت نسبة الإضافة 10% أفضل أداء بين النسب المدروسة، إذ بلغت كفاءات الإزالة 87% و90% و86% لكل من COD وBOD وTSS على التوالي. وتشير هذه النتائج إلى إمكانية اعتماد قشور اللوز المنشطة كحوامل بيولوجية فعّالة ومستدامة ومنخفضة التكلفة ضمن أنظمة المعالجة الهجينة لمياه الصرف الصحي، بما يدعم تطوير حلول معالجة صديقة للبيئة وذات جدوى اقتصادية.

الكلمات المفتاحية: قشور اللوز المنشطة، الحوامل البيولوجية، المعالجة اللاهوائية، الأراضي الرطبة الصنعية، معالجة مياه الصرف الصحي.

Evaluation of the Efficiency of Activated Almond Shells as Biological Carrier Media in a Hybrid Wastewater Treatment System

Abdalrhman Muhajer Aljasem Almorad * Ghada Abdalkarim Bilal **
* PhD student in Department of Environmental and Sanitary Engineering – Faculty of Civil Engineering – Damascus University.
abdalrhman55.morad@damascusuniversity.edu.sy
** Assistant professor in Department of Environmental and Sanitary Engineering – Faculty of Civil Engineering – Damascus University.
ghada.bilal@damascusuniversity.edu.sy

Abstract

The integration of anaerobic treatment technologies with constructed wetlands is considered one of the most promising approaches for achieving efficient and cost-effective wastewater treatment, particularly in regions suffering from limited resources and technical infrastructure. This study aims to evaluate the efficiency of activated almond shells as biological carrier media within a hybrid wastewater treatment system consisting of an anaerobic reactor equipped with biological carriers as a primary treatment stage and a vertical subsurface flow constructed wetland as a secondary treatment stage.

The anaerobic reactor was designed according to the German standard DIN 4261, while the constructed wetland was designed in accordance with the German guideline ATV-DVWK-A 262. Physical activation of almond shells was carried out at a temperature of 600°C for a duration of two hours. The activated almond shells were then introduced into the anaerobic reactor at three filling ratios of 5%, 10%, and 15% to investigate their effect on treatment performance. System efficiency was assessed by measuring the concentrations of Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD_5), and Total Suspended Solids (TSS).

The results demonstrated that the addition of activated almond shells significantly enhanced the removal efficiency of organic pollutants and suspended solids compared with the conventional system. Among the investigated ratios, the 10% filling ratio achieved the best overall performance, with removal efficiencies of 87%, 90%, and 86% for COD, BOD_5 , and TSS, respectively. These findings indicate that activated almond shells can be effectively utilized as sustainable, low-cost, and efficient biological carrier media in hybrid wastewater treatment systems, contributing to the development of environmentally friendly and economically feasible wastewater treatment solutions

Key words: Activated Almond Shells, Biological Carrier Media, Anaerobic Treatment, Constructed Wetlands, Wastewater Treatment.

1- المقدمة:

تتلخص فكرة البحث في الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (حوض تخمير لاهوائي مزود بحوامل بيولوجية كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي الخام، ودراسة تأثير البارامترات التصميمية الخاصة بكل مرحلة من مرحلتي المعالجة للوصول إلى أفضل كفاءة معالجة لهذا النظام وما ينعكس عن ذلك من فوائد بيئية واقتصادية.

يعتبر السليلوز $(C_6H_{10}O_5)_n$ المكون الليفي الرئيسي للمخلفات الزراعية، وهو عبارة عن بوليمر مُكون من وحدات جلوكوز مرتبطة، يشكل مجموعات بلورية قوية نتيجة تركيبه الكيميائي وله درجة عالية من الترابط الهيدروجيني (Wertz et al., 2010). تتكون المخلفات الزراعية أيضاً من اللجنين، الهيميسيلولوز، المستخلصات، الدهون، البروتينات، السكريات البسيطة، النشويات، الماء، الهيدروكربونات والرماد (Sud et al., 2008).

من أهم تطبيقات المعالجة النباتية فضلاً عن الأراضي الرطبة الطبيعية هي المعالجة بالأراضي الرطبة المصطنعة Constructed wetland، وهي محطات معالجة تُصمم هندسياً وتتكون من الغطاء النباتي والتربة والكائنات الدقيقة، تكون أحواض المعالجة في هذه الأنظمة مملوءة بوسط حصوي أو رملي أو مزيج منهما معاً على شكل طبقات بحيث تكون فلتر المعالجة. تساعد على الاستمرارية والاستدامة

البيئية عند تطبيقها، وتتضمن عمليات معقدة تتضمن آليات فيزيائية وكيميائية وبيولوجية لإزالة الملوثات المختلفة أو تحسين جودة المياه (Vymazal et al., 2008).

2- مشكلة البحث:

من خلال ملامسة الواقع يمكن تحديد الإشكالية الرئيسة للبحث في مشكلة مياه الصرف الصحي غير المعالجة، وانتشار العديد من المصبات العشوائية خاصة في التجمعات الصغيرة المنتشرة في أرجاء الأرياف والمناطق الجافة في سوريا ولما لها من تأثيرات سيئة على البيئة.

كما أن استخدام محطات المعالجة بالأراضي الرطبة الصنعية يتطلب مساحات واسعة مما يؤدي إلى زيادة في كلف الانشاء والتشغيل، مع أمكانية لحدوث انسدادات بفلتر المعالجة مع الزمن نتيجة تراكم المواد العضوية في أحواض المعالجة عند عدم كفاية المعالجة الأولية قبل أحواض الأراضي الرطبة الصنعية وهذا الأمر حد من استخدام هذه الطريقة الفعالة في معالجة مياه الصرف الصحي.

3- أهمية البحث:

على مدى السنوات الثلاثين الماضية، أصبحت عملية معالجة مياه الصرف بالطرق اللاهوائية أكثر شيوعاً بسبب مزاياها العديدة من حيث انخفاض متطلبات المساحة والمغذيات والطاقة، وإنتاج حماة أقل إضافة إلى إنتاج الغاز الحيوي بوصفه مصدر طاقة متجددة (VanLier et al., 2008).

إن إضافة الحوامل البيولوجية (المخلفات الزراعية السليلوزية) إلى المفاعل البيولوجي اللاهوائي يدعم منظومة المعالجة، حيث تعد المخلفات الزراعية من بين مصادر الكربون الصلبة المتوفرة، وتم دراستها

بسبب رخص ثمنها وتوافرها، وهي متجددة، ذات بنية مسامية، وتعد هيكل مناسب لنمو التجمعات البكتيرية (Sud et al., 2008)، كما تتميز بقدرتها على امتزاز الملوثات لأنها تحتوي على مجموعات وظيفية مثل مجموعتي الكربوكسيل والهيدروكسيل، ويعد الامتزاز من أكثر التقنيات فعالية في إدارة الملوثات نظراً للتكاليف التشغيلية المنخفضة والمرونة العالية (Dai et al., 2018).

4- هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تقييم كفاءة نظام معالجة هجين لمياه الصرف الصحي وفقاً للظروف المحلية وخطة البحث المقترحة، من خلال تقييم كفاءة المعالجة الأولية في المفاعل اللاهوائي وفق ثلاث نسب ملء مختلفة من قشور اللوز المنشطة كحوامل بيولوجية، وتقييم كفاءة المعالجة الثانوية في الأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي.

5- الدراسات المرجعية:

هناك العديد من الدراسات السابقة التي تطرقت لموضوع معالجة مياه الصرف الصحي عبر المفاعل اللاهوائي والأراضي الرطبة الصنعية وتناولته من زوايا مختلفة، سوف نستعرض جملة من الدراسات التي تم الاستفادة منها مع الإشارة إلى أبرز ملامحها. وقد تنوعت هذه الدراسات بين العربية والأجنبية في الفترة الزمنية بين عامي 2012 و2026 مما يشير إلى تنوعها الزمني والجغرافي.

تم تصنيف الدراسات المرجعية إلى محورين أساسيين:

5-1 <u>المحور الأول:</u> يتضمن ست دراسات مرجعية لتقييم كفاءة استخدام الحوامل البيولوجية الطبيعية في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي، وفق الجدول التالي:

الجدول (1) مصفوفة المحور الأول من الدراسات المرجعية والتجارب العالمية

	Reference	Wastewater	Anaerobic Reactor		Biological Carriers	
			Type	V (Liter)	Type	HRT (hour)
1	Vinod et al., 2012	Municipal	Fixed Film Reactor	180	Coffee Husk	(16, 24, 48)
2	Oliveira et al., 2013	Municipal	Anaerobic filter	500	Coconut Shell	9
3	Ali et al., 2016	Municipal	Biological Filter	620	Maize Cob	`14
4	الشلبي وآخرون ، 2020	Municipal	Activated Sludge Aeration Tanks	10	Almond Shell	(4, 5, 6)
5	Guanqi et al., 2024	Municipal	Anaerobic Baffled Reactor	-	Needle-Felt Coir Fibre	14
6	Sanitha et al., 2026	Municipal	Upflow Biofilter Reactor	3	Corncob	-

مبرر اختيار الدراسة (1): تقييم كفاءة استخدم قشور القهوة كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي وتحديد زمن المكث الهيدروليكي الأمثل وفق ثلاثة أزمنة مكث (16,24.48hour).

الاستفادة من الدراسة: توصل الباحثون إلى أن أفضل نسبة إزالة كانت عند زمن مكث 48hour حيث بلغت إزالة COD بنسبة 88–91%، وإزالة نيتروجين الأمونيا بنسبة 70–73% وإزالة الفوسفات بنسبة 91–94% (Vinod et al., 2012).

مبرر اختيار الدراسة (2): تقييم كفاءة استخدم قشور جوز الهند كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: أن استخدام قشور جوز الهند كمادة مالئة في المفاعل اللاهوائي تعد بديلاً منخفض التكلفة مقارنة مع المواد المالئة التقليدية المستخدمة، ووصلت كفاءة إزالة BOD إلى 79% (Olivelra et al., 2013).

مبرر اختيار الدراسة (3): تقييم كفاءة استخدم قولحة الذرة كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: كانت كفاءة الإزالة الوسطية ل BOD و COD تساوي 79% و 75% على التوالي، وسبب هذه الكفاءة العالية هو التطور السريع للبيوفلم خلال أول أسبوعين. وتوصلوا إلى أن المفاعلات المزودة بحوامل المخلفات الزراعية يمكن أن تنشئ محطات معالجة فعالة ذات تكلفة منخفضة في البلدان النامية (Ali et al., 2016).

مبرر اختيار الدراسة (4): تقييم كفاءة استخدم قشور اللوز كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي وتحديد زمن المكث الهيدروليكي الأمثل وفق ثلاثة أزمنة مكث (4,5.6hour)، وتحديد نسبة الملء المثلى وفق ثلاثة نسب %(5،7،10) من حجم حوض التهوية بالحماة المنشطة.

الاستفادة من الدراسة: تم الحصول على أفضل كفاءة إزالة 93% و 92% لكل من COD و SS على التوالي، عند زمن مكث 5hour ونسبة ملء 7% من حجم حوض التهوية بالحماة المنشطة (الشلبي وآخرون.، 2020).

مبرر اختيار الدراسة (5): تقييم كفاءة استخدم ألياف جوز الهند كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: تم الحصول على كفاءة إزالة بلغت 66% للطلب الكيميائي للأوكسجين (COD) و70% للمواد الصلبة العالقة (TSS). وأرجع الباحثون هذا الأداء إلى المسامية العالية والمساحة السطحية الكبيرة لألياف جوز الهند التي وفرت بيئة مناسبة لنمو الأغشية الحيوية واحتجاز الكتلة الحيوية

داخل المفاعل، مما يدل على إمكانية استخدام المخلفات الزراعية الطبيعية كبديل منخفض التكلفة للحوامل الصناعية في أنظمة المعالجة اللاهوائية (Guanqi et al., 2024).

مبرر اختيار الدراسة (6): تقييم كفاءة استخدم كيزان الذرة كحامل بيولوجي طبيعي في المفاعل اللاهوائي لمعالجة مياه الصرف الصحي مع المقارنة في كفاءة المعالجة عند استخدام المفاعل بدون حوامل.

الاستفادة من الدراسة: أظهرت النتائج أن استخدام كيزان الذرة أدى إلى تعزيز نمو الكتلة الحيوية نتيجة الخصائص اللجنوسليلوزية والمسامية العالية للمادة الحاملة، حيث تم تخفيض زمن إقلاع النظام بنسبة 64% مقارنة مع المفاعل بدون حوامل، كما أكدت الدراسة فعالية المخلفات الزراعية الطبيعية في تحسين أداء المفاعلات البيولوجية من خلال توفير وسط ملائم لتثبيت الكائنات الدقيقة (Sanitha et al., 2026).

الخلاصة من الدراسات المرجعية: بينت هذه الدراسات إمكانية استخدام أنواع عديدة من الحوامل البيولوجية في معالجة مياه الصرف الصحي بسبب تشكل العشاء البيولوجي (Biofilm) عليها. كما إن استخدام المخلفات الزراعية كحوامل لها دور إيجابي في إزالة أنواع عديدة من الملوثات وهي تعد مصدر كربون للبكتيريا، كما أنها تتميز بقدرتها على امتصاص الماء فيسهل بذلك عملية الالتصاق الخلوي وتكاثر الخلايا البكتيرية وبالتالي تقلل من الزمن اللازم لتشغيل نظام المعالجة، **وبعد الاطلاع على التجارب العالمية** سيتم الاعتماد على قشور اللوز كحوامل بيولوجية في المخمر اللاهوائي وتقييم كفاءة المعالجة.

2-5 المحور الثاني: ست دراسات مرجعية لتقييم كفاءة استخدام المفاعل اللاهوائي مع الأراضي الرطبة الصنعية في معالجة مياه الصرف الصحي، وفق الجدول التالي:

الجدول (2) مصفوفة المحور الثاني من الدراسات المرجعية والتجارب العالمية

	Reference	Wastewater	Anaerobic Reactor		Constructed Wetland		
			Type	HRT (hour)	Type Flux	Plant Specie	Filling Media
1	Thanh et al., 2014	Municipal	ST	18	HSF	Melampodium	Gravel, Sand
2	Merino et al., 2015	Municipal	UAF	(18, 28, 48)	HSF	Canna	Tezontle
3	Abdel-Shafy et al., 2017	Municipal	ST	24	HSF+VSF	Phragmites	Gravel
4	Decezaro et al., 2018	Municipal	ST	20	VSF	Psittacorum	Gravel
5	Marta et al., 2023	Municipal	HUSB + AF	(9, 14)	VSF	Iris pseudacorus	Gravel, Sand
6	Satyendra et al., 2024	Municipal	ABR	(12, 18, 24)	Up-flow	Typha, Canna	ACC

مبرر اختيار الدراسة (1): تقييم كفاءة الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (مفاعل لاهوائي كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: إن استخدام هذه التقنية قادر على تلبية المعايير المطلوبة للمسطحات المائية، حيث توافقت مواصفات المياه المعالجة مع الحدود القياسية للوائح الفنية الوطنية الفيتنامية لمياه الصرف الصحي المنزلية. إذ كان متوسط كفاءة إزالة COD بنسبة 78% وإزالة المغذيات قد تحققت إلى حد كبير من خلال إزالة TN بنسبة 84% وإزالة TP بنسبة 72% (Thanh et al., 2014).

مبرر اختيار الدراسة (2): تقييم كفاءة الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (مفاعل لاهوائي كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: إن استخدام مفاعل UAF كمعالجة مسبقة للأراضي الرطبة الصنعية تلافى دخول وتراكم كميات من المواد الصلبة العالقة على وسط الفلتر، وبالتالي منع حدوث الانسدادات. حيث كان المفاعل اللاهوائي مسؤولاً عن إزالة معظم المواد العضوية (من 50% إلى 80%)، في حين وصلت نسبة الإزالة إلى 89% في نظام المعالجة بالكامل (Merino et al., 2015).

مبرر اختيار الدراسة (3): تقييم كفاءة الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (مفاعل لاهوائي كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: أن المعالجة عبر الاراضي الرطبة الهجينة والمخمر اللاهوائي توفر بديلاً منخفض التكلفة لمعالجة مياه الصرف الصحي، وذلك وفقًا لمناخ أفريقيا والشرق الأوسط والمناطق القاحلة وشبه القاحلة. ويمكن تنفيذ هذا النظام من المعالجة بسهولة إذا كانت مساحة الأرض متاحة. إذ وصلت كفاءة المعالجة إلى 90%، 96%، و94% لـ TSS، BOD، و COD، على التوالي (Abdel-Shafy et al., 2017).

مبرر اختيار الدراسة (4): تقييم كفاءة الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (مفاعل لاهوائي كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: يمكن استخدام هذا النظام من المعالجة في المناطق الريفية والمناطق الحضرية الصغيرة بسبب سهولة تنفيذه وتكلفته المنخفضة. حيث أعطى النظام كفاءة معالجة وصلت إلى 72%، 76%، و74% لـ TSS، BOD، و COD، على التوالي (Dececzaro et al., 2018).

مبرر اختيار الدراسة (5): تقييم كفاءة الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (مفاعل لاهوائي كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: أظهرت النتائج تحقيق كفاءات إزالة تراوحت بين 79–85% للطلب الكيميائي للأوكسجين و90–92% للمواد الصلبة العالقة، إضافة إلى إزالة فعالة للمركبات النيتروجينية. وأكدت الدراسة أهمية الأراضي الرطبة الشاقولية كمرحلة معالجة لاحقة للمفاعلات اللاهوائية لتحسين جودة المياه المعالجة مع إمكانية إعادة استخدامها (Marta et al., 2023).

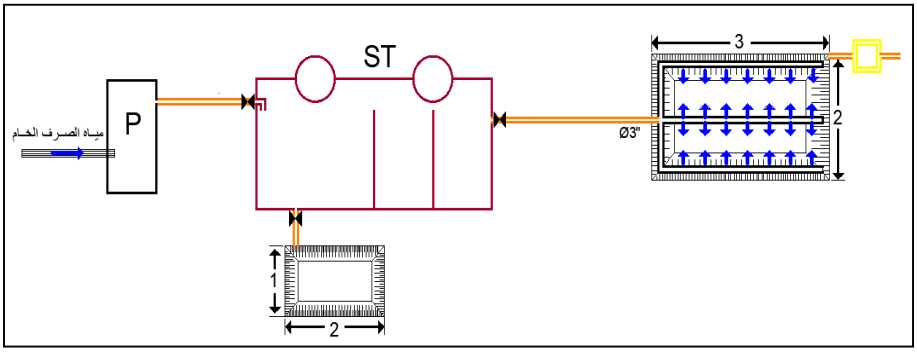
مبرر اختيار الدراسة (6): تقييم كفاءة الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (مفاعل لاهوائي كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي.

الاستفادة من الدراسة: استُخدمت كتل الخرسانة الخفيفة كوسط ترشيح، وعند زمن مكث هيدروليكي بلغ 24 ساعة حقق النظام كفاءة إزالة وصلت إلى 85% للطلب الكيميائي للأوكسجين و95% للمواد الصلبة العالقة و68% للنيتروجين الكلي و65% للفوسفور الكلي. وأظهرت الدراسة أن الدمج بين المعالجة اللاهوائية والأراضي الرطبة الصنعية يساهم في رفع كفاءة إزالة الملوثات العضوية والمغذيات مع المحافظة على انخفاض تكاليف التشغيل (Satyendra et al., 2024).

الخلاصة من الدراسات المرجعية: يعتبر هذا النظام من المعالجة تقنية واعدة حيث أنه قادر على تلبية المعايير المطلوبة لمواصفات مياه الصرف الصحي المعالجة، كما أن استخدام المفاعل اللاهوائي كمرحلة معالجة مسبقة للأراضي الرطبة الصنعية يتلافى دخول وتراكم كميات من المواد الصلبة العالقة على وسط الفلتر، وبالتالي يمنع حدوث الانسدادات. سيتم الاعتماد على مخمر لاهوائي ST كمرحلة معالجة أولية والذي اعطى كفاءة معالجة عالية في العديد من الدراسات كما يتميز بكلفته المنخفضة، ومن ثم الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية. وسيتم دراسة كفاءة الإزالة للمياه الناتجة عن المعالجة في هذا النظام وفقا للظروف المحلية وخطة البحث المقترحة.

6- منهجية البحث:

يبين الشكل (1) المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية في كلية الزراعة بجامعة دمشق كحيز مكاني للدراسة:



الشكل (1) المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية.

والذي يتألف من مرحلتين:

- ✓ المرحلة الأولى: المعالجة الأولية، وتشمل المفاعل البيولوجي اللاهوائي (Septictank).
- ✓ المرحلة الثانية: المعالجة الثانوية، وتشمل حوض المعالجة بالأراضي الرطبة الصنعية ذو الجريان تحت السطحي الشاقولي.

6-1 تصميم وتجهيز المفاعل البيولوجي اللاهوائي (Septictank):

تم تصميم Septictank المصنوع من مادة PVC ذو الحجم 1000L وفقاً لبارامترات التصميم الواردة في الكود الألماني وفق المواصفة الألمانية DIN4261 (DIN 4261-1., 2010)، وفقاً لما يلي:

- ✓ أحجام الحجرة الأولى والثانية والثالثة تبلغ (50%,25%,25%) على التوالي من حجم المفاعل اللاهوائي الكلي.
- ✓ المدة الزمنية بين تحميلين متتاليين ≤ 24-48hour

اعتماداً على هذه البارامترات، تم اختيار الأحجام التالية: (V_1=500L) للحجرة الأولى، (V_2=250L) للحجرة الثانية، (V_3=250L) للحجرة الثالثة. وزمن مكث 24hour

يبين الشكل (2) وضع Septictank في المحطة التجريبية على قاعدة من البلوك بارتفاع 40cm لتأمين ميل قدره 1% عن حوض الأرض الرطبة الصنعية، تم تركيب بيزومتر خارجي بقطر 1inch لمراقبة مستوى المياه داخل الحجرات، وتم تركيب صمام عدم رجوع بقطر 1inch في أعلى ال Septictank موصول بأنبوب تهوية لمنع رجوع الغاز إلى ال Septictank،



الشكل (2) المفاعل اللاهوائي (Septictank).

6-2 تصميم وتجهيز حوض الأرض الرطبة الصنعية:

تم تصميم الحوض ذو الجريان تحت السطحي الشاقولي وفقاً لبارامترات التصميم الواردة في الكود الألماني تبعاً للمواصفة الألمانية ATV-DVWK-262 (ATV-DVWK-A 262., 2006)، والتي اعتمدت في حساب أحواض الأراضي الرطبة:

- ✓ على التحميل الهيدروليكي الوارد في الكود المذكور ≤ 6l/m^2.min

- ✓ المدة الزمنية بين تحميلين متتاليين ≤ 2–6hour

اعتماداً على هذه البارامترات، تم اختيار مساحة $6m^2$ للحوض، وزمن مكث 3hour

شُكل الحوض ذو الجريان تحت السطحي الشاقولي من أكتاف ترابية مائلة بأبعاد $3*2m^2$ وعمق 1m، وميل 1% ضمن الحوض كما هو مبين في المواصفة الألمانية ATV–DVWK–262.

يبين الشكل (3) تنفيذ فلتر المعالجة في الحوض من ثلاث طبقات على التوالي من الأسفل إلى الأعلى، بداية تم وضع الدريناج وتثبيته بطبقة من الحصى والعدسية بسماكة 20cm وتدرج حبي (10–25mm)، ثم طبقة من رمل المازار بسماكة 60cm وتدرج حبي حتى (0.4mm)، وأخيراً طبقة من العدسية بسماكة 20cm وتدرج حبي (10–25mm).



الشكل (3) تنفيذ فلتر المعالجة في الأرض الرطبة الصنعية.

يبين الشكل (4) غرفة التفتيش بعد الحوض، مصنوعة من البلاستيك بسعة 20L، يتم عبرها تحويل المياه الراشحة من الحوض إلى قناة التصريف النهائية للمياه المعالجة بالإسالة عبر فتح السدات الموجودة ضمنها. وذلك بعد تامين فرق منسوب بميل 2% وعبر انابيب مصنوعة من مادة الـ PVC.



الشكل (4) غرفة التفتيش بعد حوض الأرض الرطبة الصنعية.

تم الاعتماد على نبات القصب الذي يناسب الظروف المناخية لبلدنا، كما يعتبر النبات التقليدي المستخدم في الأراضي الرطبة الصنعية.



الشكل (5) نبات القصب.

استُخدم نبات القصب (Phragmites australis) المزروع مسبقاً في منطقة مجاورة للمحطة التجريبية، حيث تم اقتلاع النباتات بعد نحو شهرين من نموها الأولي (النمو المسبق والجزئي) ونقلها مع جذمورها إلى حوض الأرض الرطبة الصنعية.

تم زراعة النباتات في الحوض بكثافة 16 شتلة، وبعد الزراعة خضعت لفترة تأسيس وتأقلم استمرت لمدة أربعة أشهر، تم خلالها سقاية الحوض بالمياه العذبة بصورة منتظمة بهدف تعزيز نمو المجموعين

الجذري والخضري وضمان استقرار النباتات داخل فلتر المعالجة (الحصى ورمل المازار). وعند اكتمال مرحلة التأقلم ووصول النباتات إلى حالة نمو مستقرة، بدأ تشغيل النظام باستخدام مياه الصرف الصحي الخام وإجراء التجارب. وبذلك بلغت المدة الكلية لنمو وتأسيس نباتات القصب قبل بدء التجارب نحو ستة أشهر، وهي مدة كافية لضمان استقرار الغطاء النباتي وتطور النظام الجذري اللازم لدعم عمليات المعالجة في الأراضي الرطبة الصنعية.



الشكل (6) نبات القصب مع جذموره في مرحلة النمو المسبق والجزئي.



الشكل (7) نبات القصب في حوض الأرض الرطبة الصنعية.

3-6 تحضير عينات اللوز الخام واجراء عملية التنشيط:

تم إحضار الكمية اللازمة خلال مرحلة الدراسة من قشور اللوز الخام من الكسارات المتواجدة في منطقة عربين في ريف دمشق، ذات التدرج الحبي (8–14mm) والمناسبة لتوفير سطح فعال لنمو البكتيريا (الشلبي وآخرون.، 2020). مراحل تنشيط قشور اللوز الخام (مسلماني وآخرون.، 2015):

بدايةً تم غسل القشور جيداً لإزالة الغبار والزيوت، ومن ثم أدخلت في فرن التجفيف (تحت درجة حرارة 90C ولمدة 24 ساعة) كما هو موضح في الشكل (8)، ثم وضعت في عبوات خاصة مصنوعة من الحديد الصلب خالية من الأوكسجين، تم تمرير غاز النتروجين في العبوات وأغلاقها، ومن ثم وضعها في فرن التنشيط (تحت درجة حرارة 600C ولمدة ساعتين) كما هو موضح في الشكل (9).



الشكل (8) فرن تجفيف القشور في مخبر كلية العلوم.



الشكل (9) فرن تنشيط القشور في مخبر كلية العلوم.

تم قياس السطح النوعي للقشور بعد عملية التنشيط وفق نظرية BET (ISO 9277., 2010)، وبلغ السطح النوعي لقشور اللوز المنشطة ($BET=35.87m^2/g$).

يبين الشكل (10) أسطوانة منخلية تتألف من ثلاث غرف (الشلبي وآخرون.، 2020)، صُممت لضمان تثبيت الحوامل الحيوية ومنع انجرافها مع الجريان، مع السماح في الوقت نفسه بمرور مياه الصرف الصحي والتلامس الفعّال بينها وبين السطوح الحيوية. وتبين الأشكال (11,12,13) إدخال قشور اللوز بثلاثة نسب ملء وهي (5%=3kg, 10%=6kg, 15%=9kg) ضمن الأسطوانة المنخلية.



الشكل (10) الأسطوانة المنخلية.

جرى توزيع القشور بشكل متجانس داخل كل غرفة لضمان الاستفادة القصوى من الحجم المتاح وزيادة المساحة السطحية النوعية الفعّالة لنمو البيوفيلم.



الشكل (11) نسبة 5% من قشور اللوز المنشطة في الأسطوانة المنخلية.



الشكل (12) نسبة 10% من قشور اللوز المنشطة في الأسطوانة المنخلية.



الشكل (13) نسبة 15% من قشور اللوز المنشطة في الأسطوانة المنخلية.

وبذلك حصلنا على مصفوفة البدائل لنسب ملء قشور اللوز المنشطة، وفق الجدول التالي:

الجدول (3) مصفوفة البدائل لنسب ملء قشور اللوز المنشطة



6-4 مصدر مياه الصرف الصحي:

لتأمين ظروف تشغيل واقعية تحاكي الأنظمة الحقلية، تم استخدام مياه صرف صحي منزلية خام غير معالجة (Raw Wastewater) طيلة فترة التجارب المختبرية. جُلبت العينات دورياً من قناة التجميع الرئيسية المغذية لمحطة المعالجة القريبة من موقع الدراسة، حيث وُضع هدار ترابي لتجميع المياه الملوثة إذ أن منسوب المياه لا يتجاوز 10cm.

يبين الشكل (14) عملية ضخ المياه من قناة التجميع إلى Septictank بوساطة أنبوب الضخ المستخدم من مادة البولي إيتيلين قطره 50mm، حيث تم تجهيز برميل تصفية بارتفاع 55cm، وُضعت المضخة بداخله في قناة تجميع مياه الصرف الصحي، وتم تزويد البرميل بشقوق طولية على محيطه الخارجي (كل شق طوله 20cm وعرضه 10mm) لإزالة المواد العالقة كبيرة الحجم الموجودة في المياه، وذلك من أجل تخفيض حمل التلوث في منشأة المعالجة اللاحقة، ولمنع إضرار هذه المواد بالمضخة.



الشكل (14) ضخ المياه من قناة تجميع مياه الصرف الصحي.

ولتحديد الحمل العضوي والملوثات الداخلة إلى منظومة المعالجة الهجينة، أُجريت تحاليل مخبرية منتظمة لمؤشرات التلوث قبل دخولها إلى Septictank، حيث أظهرت النتائج أن قيم التراكيز الابتدائية المتوسطة للملوثات كانت على النحو الآتي:

بلغ متوسط الطلب الكيميائي للأوكسجين (COD) حوالي 525mg/l، ومتوسط الطلب الحيوي للأوكسجين (BOD) نحو 340mg/l، في حين استقر متوسط تركيز المواد الصلبة العالقة الكلية (TSS) عند 160mg/l.

6-5 مدة تشكل الغشاء البيولوجي (Biofillm) ودرجة الحرارة:

بعد إضافة قشور اللوز المنشطة إلى المفاعل اللاهوائي بكل نسبة ملء مدروسة (5%، 10%، 15%)، تم تشغيل النظام باستخدام مياه صرف صحي خام لمدة 14 يوماً قبل البدء بأخذ العينات وتحليلها. وقد خُصصت هذه الفترة لتأمين استعمار السطح من قبل الأحياء الدقيقة وتشكّل الغشاء الحيوي الأولي على الحوامل البيولوجية (قشور اللوز المنشطة). وتشير الدراسات إلى أن مرحلة تكوين المستعمرات الميكروبية

وتثبيت البيوفيلم تمتد حتى نحو أسبوعين، في حين تبدأ مرحلة النضج بعد ذلك، مما يجعل فترة التشغيل المعتمدة مناسبة لبدء تقييم أداء النظام وكفاءة إزالة الملوثات (Fernández et al., 2008).

أجريت التجارب خلال الفترة الممتدة من بداية شهر تموز حتى منتصف شهر تشرين الثاني، وشُغّل نظام المعالجة تحت الظروف البيئية الطبيعية السائدة دون التحكم بدرجة الحرارة أو قياسها بشكل مباشر داخل وحدات المعالجة. وتجدر الإشارة إلى أن درجة الحرارة تُعد من العوامل المؤثرة في النشاط الميكروبي وكفاءة عمليات المعالجة الحيوية، إلا أن جميع نسب الملء المدروسة (5%، 10%، 15%) خضعت للظروف التشغيلية والمناخية نفسها، مما يضمن إمكانية المقارنة الموضوعية بين نتائجها وتقييم تأثير الحوامل البيولوجية في أداء النظام. كما يُوصى في الدراسات المستقبلية بمتابعة درجة الحرارة بشكل دوري لتقييم أثرها الكمي في كفاءة إزالة الملوثات.

6-6 خطة الاعتيان:

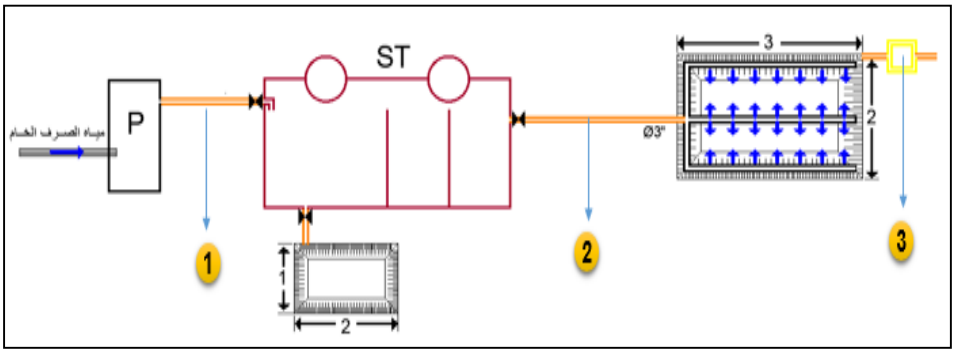
6-6-1 أماكن أخذ العينات:

يبين الشكل (15) الأماكن التي حددت لأخذ العينات، وهي:

- ✓ من مياه الصرف الصحي الخام.
- ✓ من سكر الاعتيان بعد Septictank.
- ✓ من غرفة التفتيش بعد حوض الأرض الرطبة الصنعية.

الملوثات المراد تحديد تراكيزها تجريبياً، هي: (COD, BOD, TSS)

قمنا باختبار 45 عينة مقسومة إلى: 15 عينة من مياه الصرف الصحي الخام قبل ST، 15 عينة قبل حوض الأرض الرطبة (من سكر الاعتيان بعد ST)، و15 عينة بعد حوض الأرض الرطبة (من غرفة التفتيش)، ومن أجل الوصول إلى أفضل النتائج والتحقق من صحتها جرى اختبار هذه العينات بشكل دوري.



الشكل (15) أماكن أخذ العينات من محطة المعالجة التجريبية.

6-6-2 زمن الاعتيان:

تم الانتهاء من زراعة جذمور نبات القصب في حوض المعالجة في بداية شهر آذار من عام 2025، قُسمت التجارب إلى ثلاثة مراحل تبعاً لمصفوفة البدائل، وفق المعايير التصميمية الآتية:

$$(Q_{ST}=1m^3/day,\ t_{ST}=1day),\ (Q_{CW}=2m^3/h،\ t_{CW}=3hour)$$

المرحلة الأولى: بدأت من 2025/7/1 حتى 2025/8/15، من أجل نسبة الملء (5%) من قشور اللوز المنشطة، ونبات القصب في الأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي.

المرحلة الثانية: بدأت من 2025/8/15 حتى 2025/10/1، من أجل نسبة الملء (10%) من قشور اللوز المنشطة، ونبات القصب في الأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي.

المرحلة الثالثة: بدأت من 2025/10/1 حتى 2025/11/15، من أجل نسبة الملء (15%) من قشور اللوز المنشطة، ونبات القصب في الأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي.

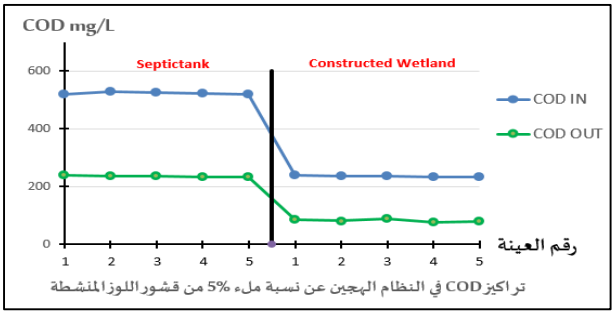
7- تقييم ومناقشة النتائج:

تبين الجداول (4,5,6) نتائج التجارب التي أُجريت في الفترة من 2025/7/1 حتى 2025/11/15، وقد تم التعبير عنها بيانياً في الأشكال التي تظهر تراكيز الملوثات (COD,BOD,TSS) في المفاعل اللاهوائي (ST) المزود بالحوامل البيولوجية، وفي الأرض الرطبة الصنعية (CW) ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي:

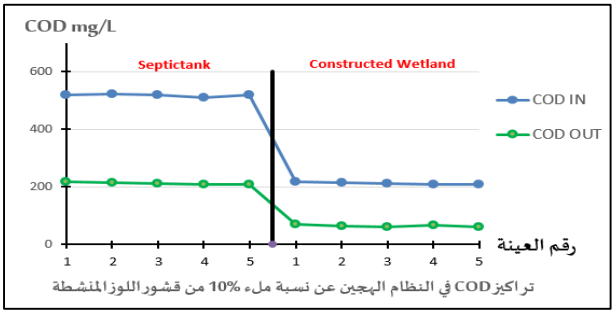
COD: كانت كفاءة إزالة COD وفق نسب الملء (5%،10%،15%)، وفق الجدول التالي:

الجدول (4) التراكيز الداخلة والناتجة وكفاءة إزالة COD في المفاعل اللاهوائي والأرض الرطبة الصنعية والنظام الهجين بأكمله (ST+CW):

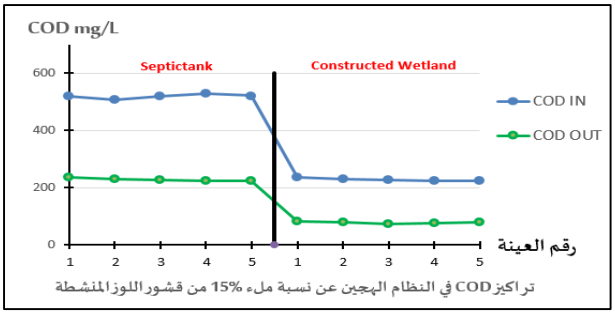
قشور اللوز (15%)			قشور اللوز (10%)			قشور اللوز (5%)		
COD OUT	COD IN	STEP 1	COD OUT	COD IN	STEP 1	COD OUT	COD IN	STEP 1
235	518	1	219	518	1	240	520	1
230	508	2	214	524	2	237	529	2
227	520	3	212	520	3	235	527	3
225	528	4	210	509	4	233	522	4
223	521	5	209	518	5	232	519	5
228	519	AVG	212.8	517.8	AVG	235.4	523.4	AVG
56%		(%) ST	59%		(%) ST	55%		
COD OUT	COD IN	STEP 2	COD OUT	COD IN	STEP 2	COD OUT	COD IN	STEP 2
82	235	6	70	219	6	86	240	6
78	230	7	65	214	7	81	237	7
73	227	8	60	212	8	89	235	8
77	225	9	68	210	9	76	233	9
79	223	10	62	209	10	79	232	10
77.8	228	AVG	65	212.8	AVG	82.2	235.4	AVG
66%		(%) CW	69%		(%) CW	65%		
85%		ST+CW	87%		ST+CW	84%		



الشكل (16) تراكيز COD تبعاً لنسبة الملء 5% من قشور اللوز المنشطة.



الشكل (17) تراكيز COD تبعاً لنسبة الملء 10% من قشور اللوز المنشطة.



الشكل (18) تراكيز COD تبعاً لنسبة الملء 15% من قشور اللوز المنشطة.

نلاحظ انخفاض ملحوظ في تركيز COD ضمن مخرج ST نتيجة إزالة الجزء الجسيمي من المادة العضوية عبر الترسيب والاحتجاز داخل البنية المسامية لقشور اللوز، إضافة إلى التحلل اللاهوائي للمادة العضوية الذائبة بوساطة البيوفيلم المتكوّن على أسطح الحوامل، مما يؤدي إلى كفاءة أعلى في إزالة COD مقارنة بال ST التقليدي.

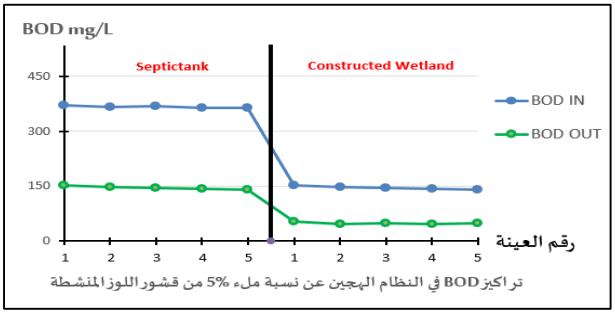
كما نلاحظ إزالة إضافية في تركيز COD ضمن مخرج الأرض الرطبة الصنعية VSF نتيجة إلى التكامل بين الترشيح الفيزيائي للجسيمات العضوية، والتحلل الحيوي للمادة العضوية الذائبة بوساطة البيوفيلم المتكوّن على أسطح الوسط الترشيحي الحصوي–الرملي. ونتيجة التطور الكبير لجذمور القصب

وقدرته المرتفعة على نقل الأكسجين إلى الوسط الترشيحي، مما يعزز نشاط البكتيريا الهوائية المسؤولة عن أكسدة المركبات العضوية.

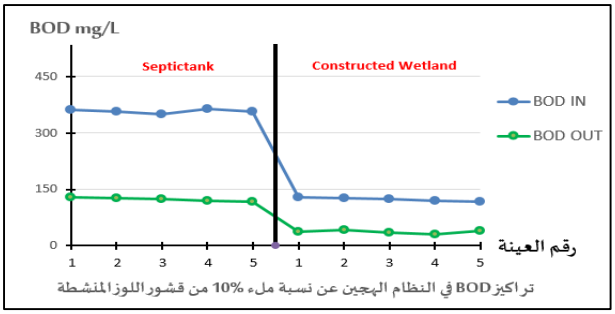
BOD: كانت كفاءة إزالة BOD وفق نسب الملء (5%,10%,15%)، وفق الجدول التالي:

الجدول (5) التراكيز الداخلة والناتجة وكفاءة إزالة BOD في المفاعل اللاهوائي والأرض الرطبة الصنعية والنظام الهجين بأكمله (ST+CW):

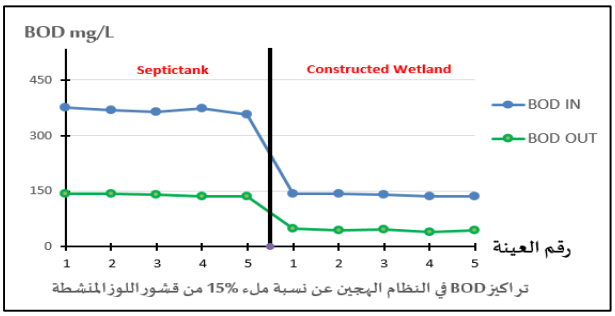
قشور اللوز (15%)			قشور اللوز (10%)			قشور اللوز (5%)		
BOD OUT	BOD IN	STEP 1	BOD OUT	BOD IN	STEP 1	BOD OUT	BOD IN	STEP 1
144	375	1	129	361	1	152	371	1
143	369	2	127	356	2	148	366	2
141	364	3	124	351	3	145	369	3
137	374	4	120	363	4	142	365	4
135	358	5	118	358	5	140	364	5
140	368	AVG	123.6	357.8	AVG	145.4	367	AVG
62%		(%) ST	65%		(%) ST	60%		
BOD OUT	BOD IN	STEP 2	BOD OUT	BOD IN	STEP 2	BOD OUT	BOD IN	STEP 2
49	144	6	38	129	6	53	152	6
44	143	7	41	127	7	46	148	7
47	141	8	35	124	8	50	145	8
39	137	9	30	120	9	47	142	9
45	135	10	39	118	10	48	140	10
44.8	140	AVG	36.6	123.6	AVG	48.8	145.4	AVG
68%		(%) CW	70%		(%) CW	66%		
88%		ST+CW	90%		ST+CW	87%		



الشكل (19) تراكيز BOD تبعاً لنسبة الملء 5% من قشور اللوز المنشطة.



الشكل (20) تراكيز BOD تبعاً لنسبة الملء 10% من قشور اللوز المنشطة.



الشكل (21) تراكيز BOD تبعاً لنسبة الملء 15% من قشور اللوز المنشطة.

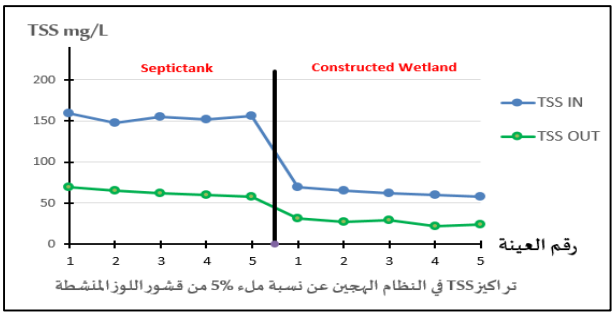
نلاحظ الانخفاض في تركيز BOD ضمن مخرج ST نتيجة التحلل اللاهوائي للمادة العضوية الذائبة، إلى جانب ترسيب المادة العضوية الجسيمية، وتكوّن البيوفيلم على أسطح الحوامل الذي يحسّن استقلاب المادة العضوية،

نلاحظ إزالة إضافية لـ BOD في الأرض الرطبة الصنعية VSF نتيجة الترشيح الفعال للمادة العضوية الجسيمية عبر طبقات الرمل والحصى، إلى جانب التحلل البيولوجي للمادة العضوية الذائبة بوساطة البيوفيلم المتكوّن على أسطح الوسط الترشيحي وجذمور القصبيات.

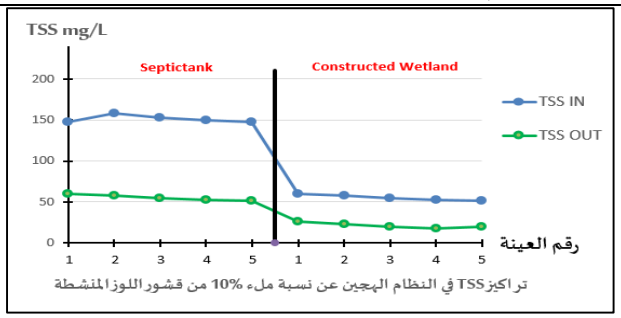
TSS: كانت كفاءة إزالة TSS وفق نسب الملء (5%,10%,15%)، وفق الجدول التالي:

الجدول (6) التراكيز الداخلة والناتجة وكفاءة إزالة TSS في المفاعل اللاهوائي والأرض الرطبة الصنعية والنظام الهجين بأكمله (ST+CW):

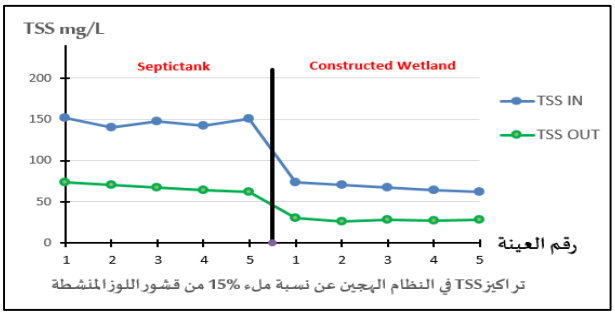
قشور اللوز (15%)			قشور اللوز (10%)			قشور اللوز (5%)		
TSS OUT	TSS IN	STEP 1	TSS OUT	TSS IN	STEP 1	TSS OUT	TSS IN	STEP 1
74	152	1	60	148	1	69	159	1
70	140	2	58	158	2	65	148	2
67	147	3	55	153	3	62	155	3
64	142	4	53	150	4	60	152	4
62	151	5	52	147	5	58	156	5
67.4	146.4	AVG	55.6	151.2	AVG	62.8	154	AVG
54%		(%) ST	63%		(%) ST	59%		
TSS OUT	TSS IN	STEP 2	TSS OUT	TSS IN	STEP 2	TSS OUT	TSS IN	STEP 2
30	74	6	26	60	6	31	69	6
26	70	7	23	58	7	27	65	7
28	67	8	20	55	8	29	62	8
27	64	9	18	53	9	22	60	9
28	62	10	20	52	10	24	58	10
27.8	67.4	AVG	21.4	55.6	AVG	26.6	62.8	AVG
59%		(%) CW	62%		(%) CW	58%		
81%		ST+CW	86%		ST+CW	83%		



الشكل (22) تراكيز TSS تبعاً لنسبة الملء 5% من قشور اللوز المنشطة.



الشكل (23) تراكيز TSS تبعاً لنسبة الملء 10% من قشور اللوز المنشطة.



الشكل (24) تراكيز TSS تبعاً لنسبة الملء 15% من قشور اللوز المنشطة.

نلاحظ انخفاض ملحوظ في تركيز المواد العالقة الكلية ضمن مخرج ST نتيجة تعزيز آليات الترسيب الفيزيائي، إضافة إلى الاحتجاز الميكانيكي للجسيمات داخل البنية غير المنتظمة لقشور اللوز، وتكوّن بيوفيلم لاصق على أسطحها يسهم في تجميع الجزيئات الدقيقة وتسهيل ترسيبها.

نلاحظ انخفاض في تركيز المواد العالقة ضمن مخرج الأرض الرطبة الصنعية VSF نتيجة فعالية الترشيح الفيزيائي عبر طبقات الوسط الترشيحي الحصوي–الرملي متدرج الحبيبات، والذي يساهم في احتجاز الجسيمات الدقيقة.

تبين من خلال النتائج المخبرية: أن زيادة نسبة ملء المفاعل بقشور اللوز المنشطة من 5% إلى 10% أدت إلى تحسن واضح في كفاءة إزالة الملوثات العضوية والمواد العالقة. فقد ارتفعت كفاءة إزالة COD في المفاعل اللاهوائي من 55% إلى 59%، وارتفعت كفاءة إزالة BOD من 60% إلى 65%، كما ازدادت كفاءة إزالة TSS من 59% إلى 63%. ويُعزى هذا التحسن إلى زيادة المساحة السطحية المتاحة لتشكل الأغشية الحيوية على أسطح القشور، مما أدى إلى زيادة كمية الكتلة الحيوية الملتصقة وتحسين كفاءة التحلل اللاهوائي للمادة العضوية واحتجاز المواد العالقة.

كما انعكس هذا التحسن على أداء النظام الهجين ككل، حيث ارتفعت كفاءة الإزالة الكلية من 84% إلى 87% للCOD، ومن 87% إلى 90% للBOD، ومن 83% إلى 86% للTSS عند زيادة نسبة الملء من 5% إلى 10%. وتشير هذه النتائج إلى وجود تأثير إيجابي واضح للحوامل البيولوجية في تعزيز أداء مرحلة المعالجة الأولية، مما خفّض الأحمال الملوثة الواصلة إلى الأرض الرطبة الصنعية وساعد على تحسين كفاءة المعالجة النهائية.

في المقابل، لم تؤدِّ زيادة نسبة الملء إلى 15% إلى تحسين إضافي في الأداء، حيث انخفضت كفاءة الإزالة الكلية إلى 85% و88% و81% لكل من COD وBOD وTSS على التوالي. ويمكن تفسير ذلك بزيادة كثافة الحوامل داخل المفاعل إلى حد قد يؤثر في نمط الجريان الهيدروليكي ويقلل من كفاءة انتقال الكتلة بين المياه والكتلة الحيوية الملتصقة، إضافة إلى احتمال تشكل مناطق ركود موضعية تعيق الاستفادة الكاملة من المساحة السطحية الإضافية. وتشير هذه النتائج إلى أن العلاقة بين نسبة الملء وكفاءة المعالجة ليست علاقة طردية مباشرة، وإنما توجد نسبة ملء مثلى تحقق التوازن بين توفير مساحة سطحية كافية لنمو البيوفيلم والمحافظة على ظروف تشغيل هيدروليكية مناسبة.

كما بينت النتائج الدور المهم للأرض الرطبة الصنعية ذات الجريان الشاقولي في استكمال عمليات المعالجة، حيث أسهمت في تحقيق إزالة إضافية للملوثات العضوية والمواد العالقة من خلال الترشيح الفيزيائي والتحلل الحيوي المرتبط بالأغشية الحيوية المتشكلة على الوسط الترشيحي، إضافة إلى دور المجموع الجذري لنبات القصب في تحسين الظروف البيولوجية داخل الحوض. ويؤكد ذلك فعالية النظام الهجين في تحقيق كفاءات إزالة مرتفعة مقارنة بأداء كل وحدة معالجة على حدة.

8- الاستنتاجات:

1- أعطت نسبة الملء 5% من قشور اللوز المنشطة مساحة سطح صغيرة لتشكل الأغشية الحيوية، مما يحد من قدرة البكتيريا على التحلل اللاهوائي للمركبات العضوية. حيث بلغت نسبة الإزالة لكل من COD و BOD 54% و 59% على التوالي في ST.

2- أظهرت النتائج أن نسبة 10% هي النسبة التصميمية المثلى من قشور اللوز المنشطة لإشغال الحيز بالمواد الحاملة حيث حققت أعلى كفاءة إزالة للملوثات؛ إذ أعطت توازن مثالي، ومساحة سطح كافية لتشكيل الأغشية الحيوية، وبلغت نسبة الإزالة لكل من COD و BOD 60% و 65% على التوالي في ST.

3- إن زيادة نسبة الملء إلى 15% لم تؤدِ إلى تحسن طردي يتناسب مع كمية المادة المضافة، بالرغم من توفر مساحة أكبر للنمو البكتيري، إلا أن أجزاء كبيرة من المياه لا تتعرض بشكل كافٍ للكتلة الحيوية وظهور مناطق راكدة (Zones Dead)، وبلغت نسبة الإزالة لكل من COD و BOD 56% و 61% على التوالي في ST.

4- أثبت اختيار نظام الجريان تحت السطحي الشاقولي ونبات القصب فاعلية كبيرة في تحسين نقل الأكسجين إلى داخل أعماق الفلتر، مما وفر بيئة هوائية (Aerobic)، ساعدت بشكل مباشر في تحقيق نسب إزالة عالية للمواد العضوية مقارنة بأنظمة الجريان الأفقي.

5- أظهرت نتائج الدراسة أن دمج المفاعل البيولوجي اللاهوائي ST المزود بالحوامل البيولوجية (قشور اللوز المنشطة) مع الأراضي الرطبة الصنعية ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي يمثل نظاماً فعالاً ومتكاملاً لمعالجة مياه الصرف الصحي. وبلغت نسب الإزالة لكل من (COD, BOD, TSS) (87%,90%,86%) على التوالي.

9- التوصيات:

1- إجراء أبحاث مستقبلية لتقييم العمر التشغيلي للحوامل البيولوجية الطبيعية المستخدمة داخل Septictank، مع دراسة مدى مقاومتها للتحلل البيولوجي والتآكل الميكانيكي تحت ظروف التشغيل المستمرة وعلى مدى زمني طويل يتجاوز دورة تشغيلية واحدة.

2- اختبار أنواع أخرى من الحوامل البيولوجية الطبيعية أو الصناعية ذات الخصائص المسامية المختلفة، بهدف تحسين كفاءة إزالة الملوثات العضوية والمواد الصلبة العالقة، والوصول إلى مواد حاملة تحقق أداءً أعلى ضمن أنظمة المعالجة.

3- استخدام درجات حرارة وأزمنة تنشيط حراري مختلفة للحوامل البيولوجية، بهدف تحديد ظروف التنشيط المثلى التي تحقق أعلى كفاءة معالجة ممكنة مع تحقيق التوازن بين استهلاك الطاقة والكفاءة التشغيلية للنظام.

4- دراسة تأثير حجم الحبيبات والأبعاد الفيزيائية لقشور الحوامل البيولوجية على كفاءة المعالجة، نظراً لما لحجم الجزيئات من دور مهم في تحديد المساحة السطحية الفعالة، وكفاءة الامتزاز، ونمو البيوفيلم.

5- اختبار أنواع نباتية محلية أخرى تمتلك خصائص فيزيولوجية مشابهة لنبات القصب، مثل نبات البردي، وذلك بهدف مقارنة كفاءتها في إزالة الملوثات ضمن نفس الظروف التصميمية والتشغيلية للأراضي الرطبة الصنعية.

المراجع العربية والأجنبية:

1- الشلبي، عجيب، فطامة، (2020). كفاءة استخدام القشور السليلوزية كحوامل بيولوجية في أحواض التهوية بالحمأة المنشطة. رسالة ماجستير، جامعة البعث.

2- مسلماني، العجي، (2015). تحويل قشور اللوز إلى فحم منشط باستخدام عوامل كيميائية مساعدة لمعالجة المياه وتخفيض الحمل العضوي. رسالة ماجستير، جامعة دمشق.

3-Abdel-Shafy, H. I., El-Khateeb, M. A., & Shehata, M. (2017). Blackwater treatment via combination of sedimentation tank and hybrid wetlands for unrestricted reuse in Egypt. Desalination and Water Treatment, 71, 145-151.

4- Ali I, Khan ZM, Sultan M, Mahmood MH, Farid HU, Ali M, et al (2016). Experimental study on maize cob trickling filter-based wastewater treatment system: Design, development, and performance evaluation. Polish J Environ Stud.;25(6):1–9.

5- ATV-DVWK. (2006). ATV-DVWK-A 262: Principles for dimensioning, construction and operation of constructed wetlands with subsurface flow for municipal wastewater treatment. Hennef, Germany.

6-Dai Y, Sun Q, Wang W, Lu L, Liu M, Li J, et al. (2018). Utilizations of agricultural waste as adsorbent for the removal of contaminants: A review. Chemosphere. 211: 35– 53.

7-Dececzaro, S. T., Wolff, D. B., Araújo, R. K., Faccenda, H. B., Perondi, T., & Sezerino, P. H. (2018). Vertical flow constructed wetland planted with

Heliconia psittacorum used as decentralized post-treatment of anaerobic effluent in Southern Brazil. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 53(13), 1131-1138.

8- Deutsches Institut für Normung (DIN). (2010). DIN 4261-1: Small sewage treatment plants – Part 1. Berlin, Germany: Beuth Verlag.

9- Fernández, N., Díaz, E. E., Amils, R., & Sanz, J. L. (2008). Analysis of microbial community during biofilm development in an anaerobic wastewater treatment reactor. Microbial Ecology, 56(1), 121–132.

10- Guanqi, S., Dipin Nath, R. S., Shende, A. D., & Bhaskaran, K. (2024). Anaerobic baffled reactor followed by up-flow constructed wetland for treatment of municipal wastewater. Journal of Environmental Management, 345, 118–125.

11- ISO 9277. (2010). Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption — BET method. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

12- Marta, S., Fernández, M. I., Ruiz, I., Canle, M., & Soto, M. (2023). Combining constructed wetlands and UV photolysis for the advanced removal of organic matter, nitrogen, and emerging pollutants from wastewater. Environments, 10(3), 35.

13-Merino-Solís, M. L., Villegas, E., De Anda, J., & López-López, A. (2015). The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: an anaerobic filter with a constructed wetland. Water, 7(3), 1149-1163.

14- Oliveira Cruz LM, Stefanutti R, Filho BC, Tonetti AL (2013). Coconut shells as filling material for anaerobic filters. Springerplus.;2(1):1–6.

15- Sanitha, G., Du, J., Li, H., Dong, Y., Wang, Q., Hu, F., & Ji, J. (2026). Synergistic integration of sustainable wastewater treatment and agricultural waste valorization: Rapid in-situ enrichment of anammox bacteria via corncob biocarriers. Bioresource Technology, 402, 130–139.

16- Satyendra, & Vijay, R. (2024). Needle-felt coir fibre: A natural substitute for synthetic media in anaerobic fixed film reactors for wastewater treatment. International Biodeterioration & Biodegradation, 188, 105–114.

17-Sud, D., Mahajan, G., & Kaur, M. P. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions–A review. Bioresource technology, 99(14), 17-27.

18-Thanh, B. X., Hai Van, P. T., Tin, N. T., Hien, V. T. D., Dan, N. P., & Koottatep, T. (2014). Performance of wetland roof with Melampodium paludosum treating septic tank effluent. Desalination and Water Treatment, 52(4-6), 1070-1076.

19-VanLier, J. B., Mahmoud, N., & Zeeman, G. (2008). Anaerobic wastewater treatment. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design, 14, 401-442.

20- Vinod, A. R., & Mahalingegowda, R. M. (2012). Applicability Studies of Reactor Filled With Coffee Husk Blended with Wooden Chips as a Fixed Bed for Wastewater Treatment. Nature Environment and Pollution Technology, 11(3), 415.

21-Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow (Vol. 14). Springer science & business media.

22-Wertz, L., Mercier, P., & Bédué, O. (2010). Cellulose science and technology. EPFL press.