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).

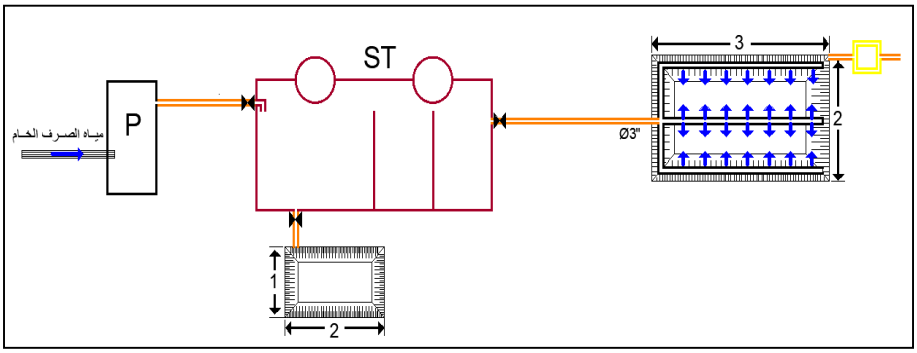
مبرر اختيار الدراسة (6): اختبار مواد فلتر غير تقليدية (الخرسانة الخفيفة – ACC) في الأراضي الرطبة لتعزيز إزالة المغذيات والملوثات العضوية عند الدمج بين المعالجة اللاهوائية والأراضي الرطبة الصنعية.

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):

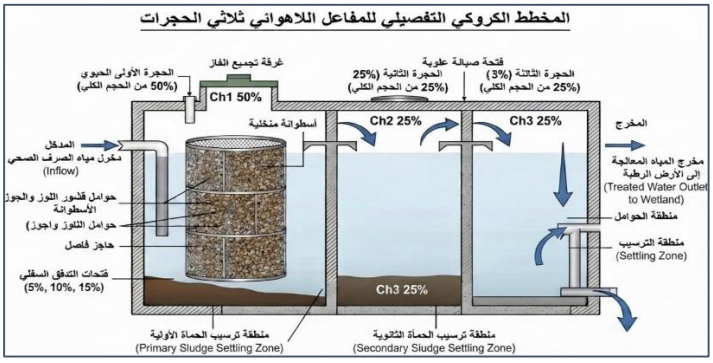
تم تصميم Septic tank المصنوع من مادة PVC ذو الحجم 1000L وفقاً لبارامترات التصميم الواردة في الكود الألماني وفق المواصفة الألمانية DIN4261 (DIN 4261-1., 2010)، وفقاً لما يلي:

- ✓ 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:

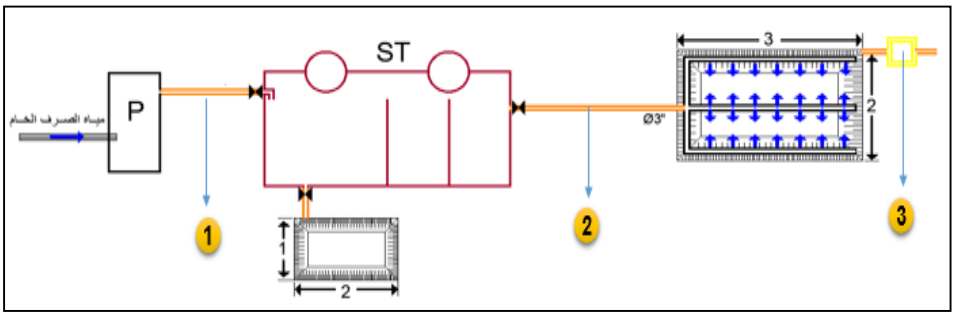
5-6-1 أماكن أخذ العينات:

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.

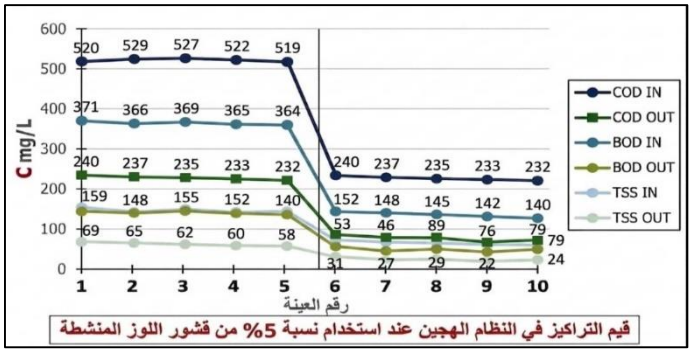
6- تقييم ومناقشة النتائج:

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

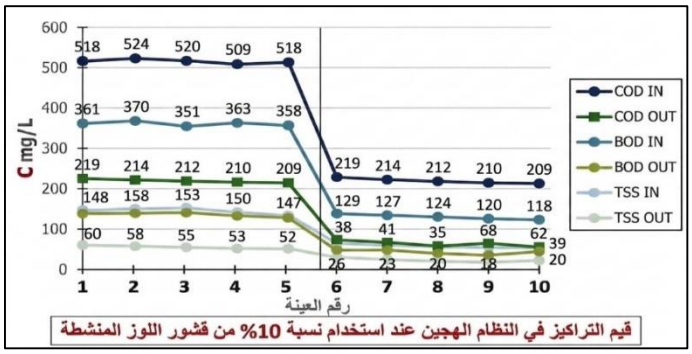
قشور اللوز (5%)								
TSS OUT	TSS IN	ST	BOD OUT	BOD IN	ST	COD OUT	COD IN	ST
69	159	1	152	371	1	240	520	1
65	148	2	148	366	2	237	529	2
62	155	3	145	369	3	235	527	3
60	152	4	142	365	4	233	522	4
58	156	5	140	364	5	232	519	5
62.8	154	AVG	145.4	367	AVG	235.4	523.4	AVG
59%		ST (%)	60%		ST (%)	55%		ST (%)
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

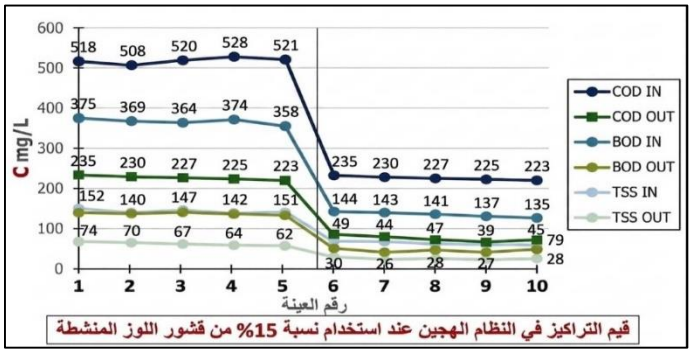
قشور اللوز (10%)								
TSS OUT	TSS IN	ST	BOD OUT	BOD IN	ST	COD OUT	COD IN	ST
60	148	1	129	361	1	219	518	1
58	158	2	127	370	2	214	524	2
55	153	3	124	351	3	212	520	3
53	150	4	120	363	4	210	509	4
52	147	5	118	358	5	209	518	5
55.6	151.2	AVG	123.6	360.6	AVG	212.8	517.8	AVG
63%		ST (%)	66%		ST (%)	59%		ST (%)
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).

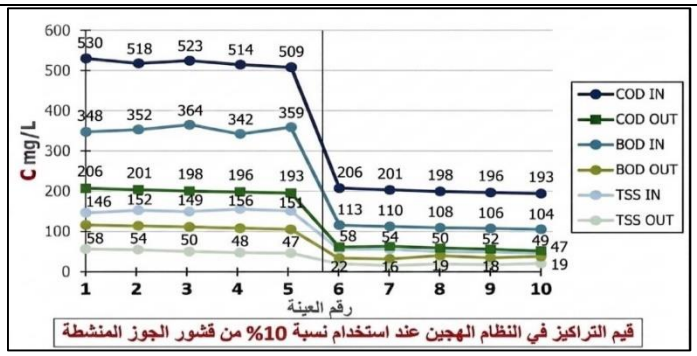
تخلص هذه المقارنة إلى أن نسبة الملء 10% تمثل "نقطة التشغيل المثلى" (Optimal Operating Point)؛ فهي تضمن أقصى استفادة من الخصائص المسامية لقشور اللوز مع تجنب عيوب التدفق القصير أو الانسداد النفاذي، مما يجعلها الاستراتيجية الأكثر كفاءة لتعزيز أداء المفاعلات اللاهوائية كخطوة أولية في أنظمة الأراضي الرطبة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

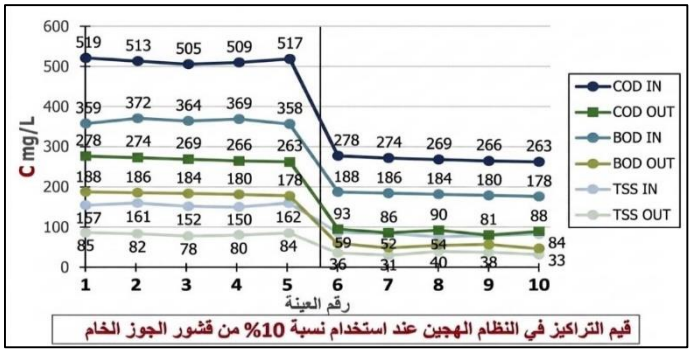
كما ساهمت الخشونة السطحية لقشور الجوز في حماية الغشاء الحيوي من الانجراف بفعل قوى القص الهيدروليكية، مما حافظ على استقرار "الحالة المستقرة" (Steady-state) طوال فترة التجارب (Oscar et al., 2024). هذا الاستقرار انعكس إيجاباً على أداء النظام الهجين، حيث أظهرت البيانات أن المفاعل اللاهوائي (ST) وحده مع قشور 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):

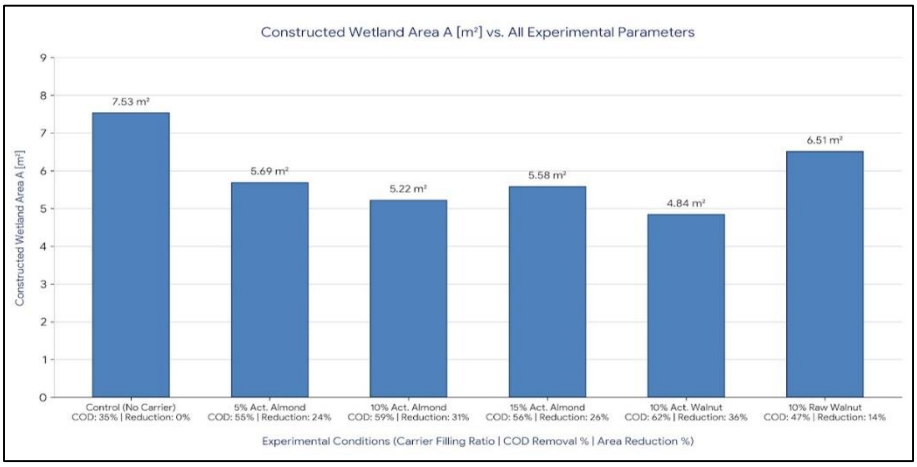
عند تثبيت نسبة الملء عند 10%، حققت قشور الجوز المنشطة كفاءة معالجة أولية بلغت 62% مقابل 59% لقشور اللوز المنشطة.

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.

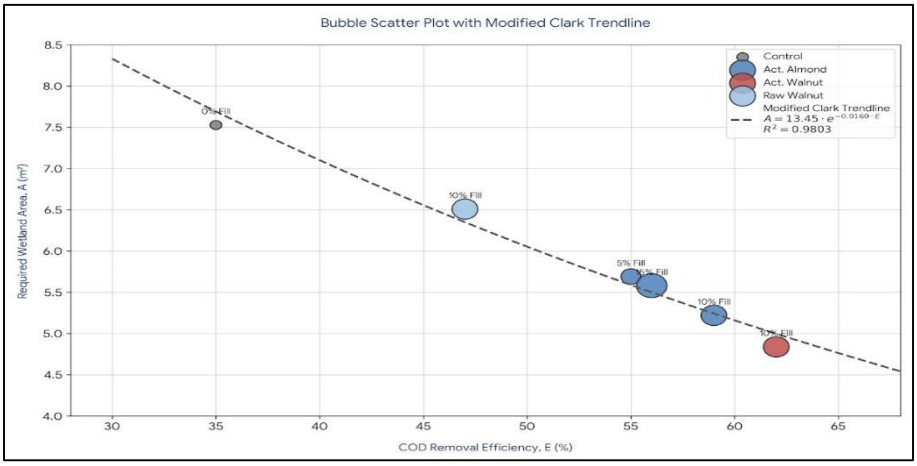
الخلاصة:

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.

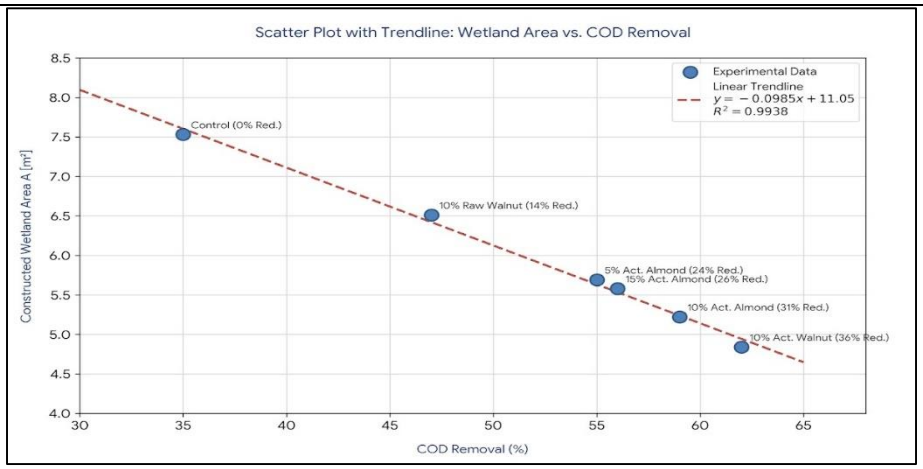
ويمكن تمثيل العلاقة بين كفاءة المعالجة الأولية عبر المفاعل اللاهوائي المزود بالمخلفات الزراعية والمساحة اللازمة لتشييد الأرض الرطبة الصنعية، وفق المخططات البيانية التالية:



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.