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).

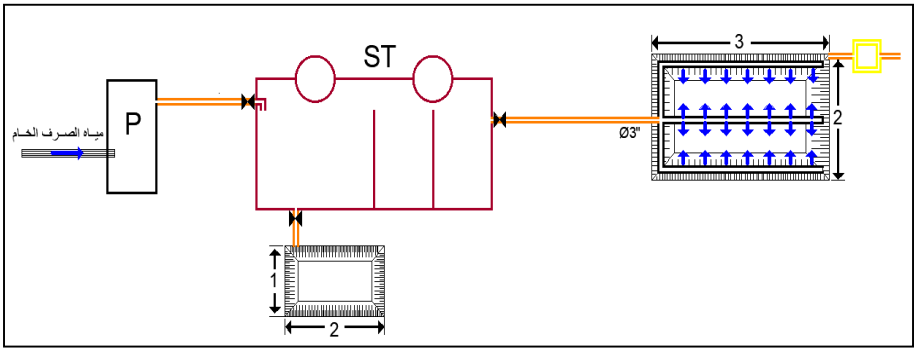
مبرر اختيار الدراسة (6): تقييم كفاءة الربط بين نوعين من تقنيات المعالجة (مفاعل لاهوائي كمرحلة معالجة أولية مع الأراضي الرطبة الصنعية كمرحلة معالجة ثانوية) لمعالجة مياه الصرف الصحي.

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:

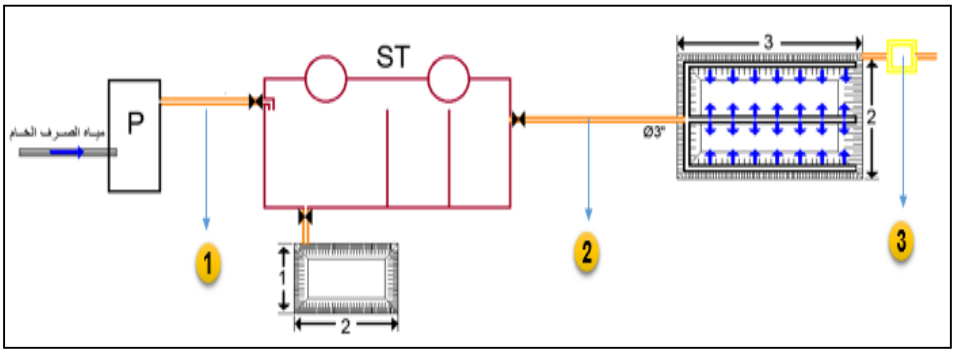
6-6-1 أماكن أخذ العينات:

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.

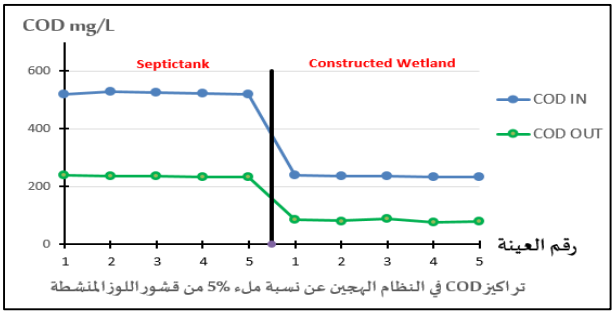
7- تقييم ومناقشة النتائج:

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:

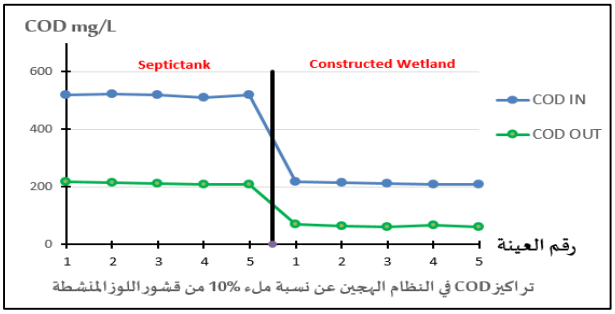
COD: كانت كفاءة إزالة COD وفق نسب الملء (5%،10%،15%)، وفق الجدول التالي:

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

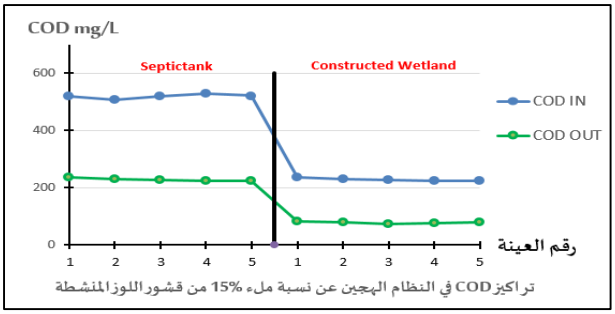
قشور اللوز (15%)			قشور اللوز (10%)			قشور اللوز (5%)		
COD OUT	COD IN	STEP 1	COD OUT	COD IN	STEP 1	COD OUT	COD IN	STEP 1
235	518	1	219	518	1	240	520	1
230	508	2	214	524	2	237	529	2
227	520	3	212	520	3	235	527	3
225	528	4	210	509	4	233	522	4
223	521	5	209	518	5	232	519	5
228	519	AVG	212.8	517.8	AVG	235.4	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.

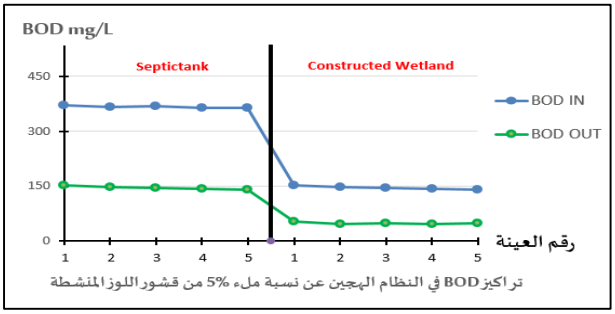
كما نلاحظ إزالة إضافية في تركيز COD ضمن مخرج الأرض الرطبة الصنعية VSF نتيجة إلى التكامل بين الترشيح الفيزيائي للجسيمات العضوية، والتحلل الحيوي للمادة العضوية الذائبة بوساطة البيوفيلم المتكوّن على أسطح الوسط الترشيحي الحصوي–الرملي. ونتيجة التطور الكبير لجذمور القصب

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

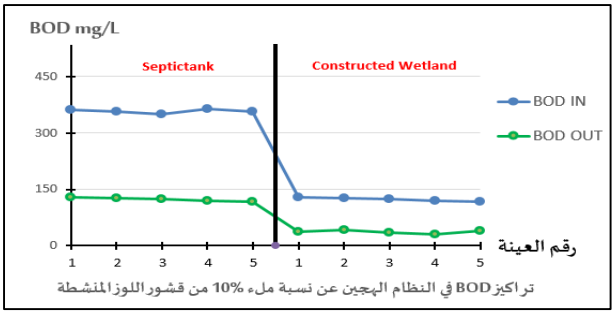
BOD: كانت كفاءة إزالة BOD وفق نسب الملء (5%,10%,15%)، وفق الجدول التالي:

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

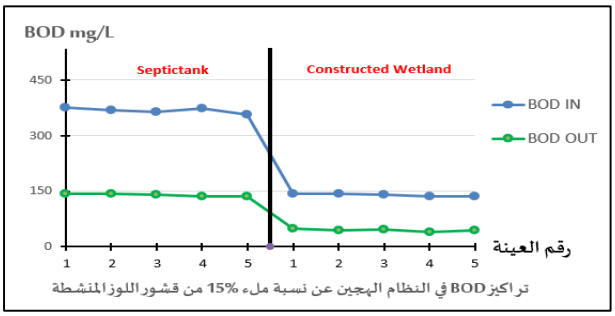
قشور اللوز (15%)			قشور اللوز (10%)			قشور اللوز (5%)		
BOD OUT	BOD IN	STEP 1	BOD OUT	BOD IN	STEP 1	BOD OUT	BOD IN	STEP 1
144	375	1	129	361	1	152	371	1
143	369	2	127	356	2	148	366	2
141	364	3	124	351	3	145	369	3
137	374	4	120	363	4	142	365	4
135	358	5	118	358	5	140	364	5
140	368	AVG	123.6	357.8	AVG	145.4	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.

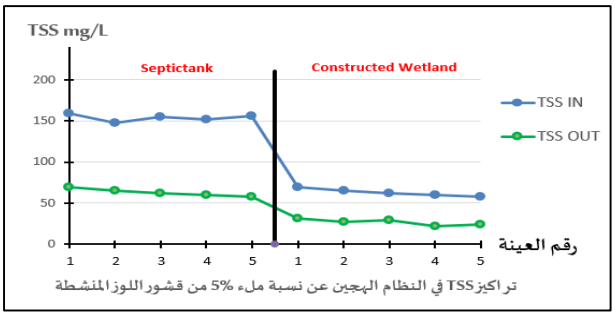
نلاحظ الانخفاض في تركيز BOD ضمن مخرج ST نتيجة التحلل اللاهوائي للمادة العضوية الذائبة، إلى جانب ترسيب المادة العضوية الجسيمية، وتكوّن البيوفيلم على أسطح الحوامل الذي يحسّن استقلاب المادة العضوية،

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.

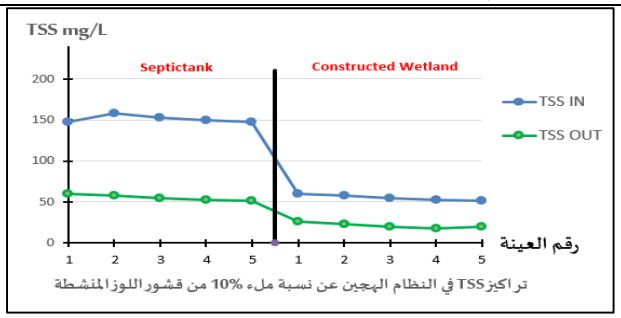
TSS: كانت كفاءة إزالة TSS وفق نسب الملء (5%,10%,15%)، وفق الجدول التالي:

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

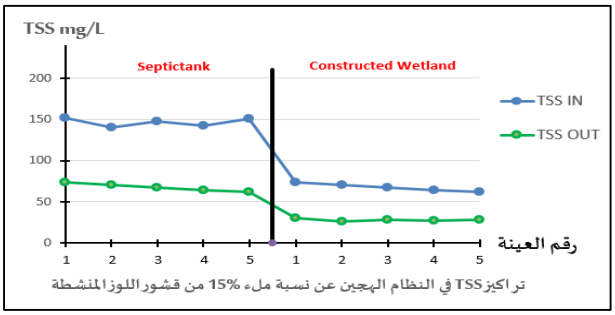
قشور اللوز (15%)			قشور اللوز (10%)			قشور اللوز (5%)		
TSS OUT	TSS IN	STEP 1	TSS OUT	TSS IN	STEP 1	TSS OUT	TSS IN	STEP 1
74	152	1	60	148	1	69	159	1
70	140	2	58	158	2	65	148	2
67	147	3	55	153	3	62	155	3
64	142	4	53	150	4	60	152	4
62	151	5	52	147	5	58	156	5
67.4	146.4	AVG	55.6	151.2	AVG	62.8	154	AVG
54%		(%) 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.