دراسة تأثير مادة الفلتر ونوع النبات على أداء الأراضي الرطبة الصنعية

شادي تقلا* **غادة بلال****

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

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

الملخص

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

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

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

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

تشير النتائج إلى وجود نسبة خلط مثلى تحقق توازنًا بين الموصلية الهيدروليكية، وانتقال الأكسجين، وكفاءة الترشيح، والنشاط البيولوجي. كما تدعم الدراسة إمكانية استخدام رقائق الإطارات المطاطية المعاد تدويرها كوسط ترشيح مستدام منخفض التكلفة لتحسين الأداء طويل الأمد للأراضي الرطبة الصنعية.

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

Studying the effect of filter media and plant type on the performance of constructed wetlands

Shadi Takla* **Ghada Bilal****

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

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

Abstract

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

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

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

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

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

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

1. المقدمة:

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

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

تم في هذا البحث التركيز على مادة نفايات الإطارات المطاطية لتشكيل وسيط ترشيح في الأراضي الرطبة الصنعية، ودراسة جدوى استخدامها في معالجة تلوث مياه الصرف الصحي بالنباتات. لا سيما أن نفايات المواد المطاطية بحد ذاتها تشكل تهديدًا بيئياً خطيراً. كما تم التركيز على نوعين من النباتات هما القصب من جهة ونباتات زينة محلية من جهة ثانية (تم اختيار الجهنمية وأم كلثوم)، حيث تلعب نباتات الزينة دوراً هاماً في إزالة ملوثات الصرف الصحي فضلاً عن كونها تعطي منظراً جمالياً خلاباً.

2. هدف البحث:

تتلخص الأهداف الرئيسية فيما يلي:

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

3. المواد وطرائق البحث

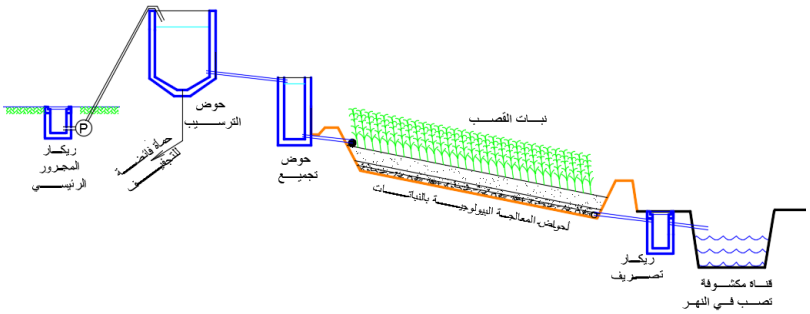
1.3. تصميم المحطة التجريبية:

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

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

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

يبين الشكل (1) المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية.



الشكل (1): المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية

وتتألف المحطة التجريبية من المنشآت التالية:

1.1.3.مضخة المياه الأولية إلى خزان التجميع والترسيب:

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

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

2.1.3.خزان التجميع والترسيب الأولي:

سعة الخزان $1/m^3$/ مصنوع من مادة الـ PVC، يتم فيه التخلص من الندف الموجودة في المياه كما يتم التخلص من الأجسام الحبيبية ذات الأقطار الصغيرة. يتراوح زمن المكث في الخزان بين (1-2) hour يتم فيها فصل الحمأة عن المياه والتي تتجمع في قاع الخزان حيث يتم سحبها إلى حوض تجفيف الحمأة بواسطة انبوب من البولي إيتيلين مزود بسكر بلاستيك.

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

3.1.3.حوض تجفيف الحمأة:

حوض اسمنتي بأبعاد m(1*2) وبعمق m 0.4، تم وضع طبقة من الرمل في أرضية الحوض بسماكة cm 5 لحماية طبقة العزل، ثم وضعت الطبقة العازلة على أرضية وجوانب الحوض لمنع تسرب الرشاحة، بعدها تم تثبيت أنابيب دريناج فوق طبقة العزل وجمعها في مجمع يتم تصريفه إلى قناة بيتونية مجاورة للحوض.

4.1.3.خزان توزيع المياه الرئيسي إلى أحواض المعالجة بالنباتات:

سعة الخزان $0.1m^3$ مصنوع من البلاستيك، يغذي كل حوض من أحواض النباتات اللاحقة عبر الضخ بالإسالة عن طريق تامين فرق منسوب بميل 1% وبواسطة أنبوبين من البولي إيتيلين، يتم تركيب سكورة بلاستيكية على أنابيب تغذية الأحواض عند مخرج خزان التوزيع للتحكم بالغزارة الداخلة إلى أحواض النباتات وقياسها.

5.1.3.أحواض المعالجة بالنباتات:

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



الشكل (2): أحواض المعالجة بالنباتات.

حيث اعتمد في حساب حقول النباتات:

- على التحميل الهيدروليكي الوارد في الكود المذكور ≤ $6l/m^2.min$
- الفترة الزمنية بين تحميلين متتاليين ≤ 2-6hour.
- تحسب مساحة مقطع الحوض من العلاقة: **A=Q/24*v**

A: مساحة مقطع المفاعل (m^2).

Q: تدفق المياه الخام (m^3/d).

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

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

6.1.3. غرف التفتيش بعد أحواض النباتات:

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

7.1.3. شبكة التصريف بعد أحواض النباتات:

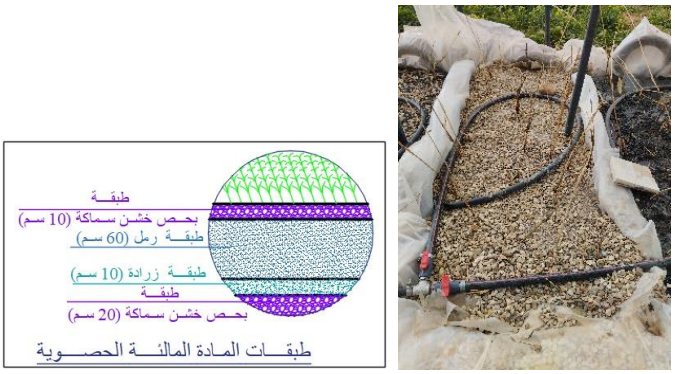
قساطل مادة الـ PVC قطر 3 إنش تجمع المياه من الريكارات إلى قناة بيتونية مكشوفة تنتهي بشبكة الصرف العامة.

2.3. تشغيل المحطة التجريبية

تم تشغيل المحطة وفق مرحلتين أساسيتين:

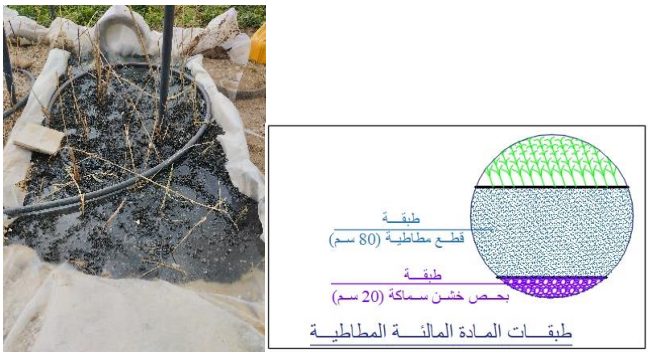
1.2.3. المرحلة الأولى: تم فيها التركيز على دور المادة المالئة ضمن الأراضي الرطبة الصنعية وتحسين أدائها من خلال إيجاد بديل للحصى التقليدي من أجل تخفيف مشاكل الانسداد فيها، فكانت الأحواض ثلاثة أنواع أساسية بحسب مادة الفلتر فهي كما يلي:

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



الشكل (3): الحوض ذو الفلتر الحصوي.

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



الشكل (4): الحوض ذو الفلتر المطاطي.

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

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



الشكل (5): الحوض ذو الفلتر المختلط.

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

الجدول (1)– نسب الخلط المعتمدة للمواد المالئة ومكوناتها

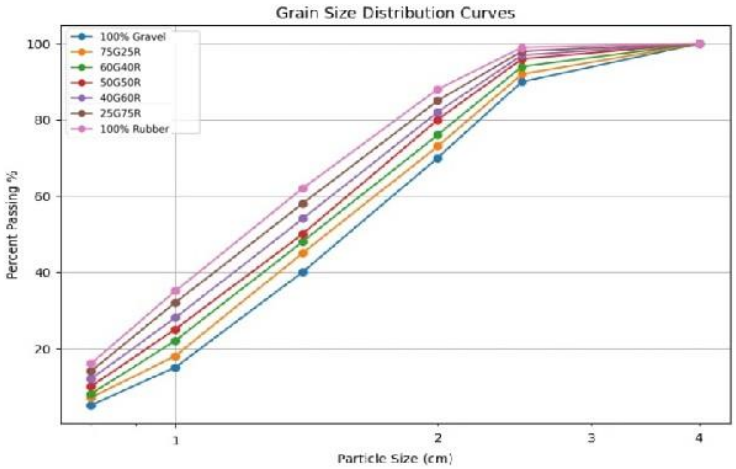
#	1	2	3	4	5	6	7
نسبة الخلط	%0	25%	40%	50%	60%	75%	%100
مكونات المادة المالئة	%100 حصى + %0 كاوتشوك	%75 حصى + %25 كاوتشوك	%60 حصى + %40 كاوتشوك	%50 حصى + %50 كاوتشوك	%40 حصى + %60 كاوتشوك	%25 حصى + %75 كاوتشوك	%0 حصى + %100 كاوتشوك

التحليل الحبي لأوساط الترشيح التجريبية:

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

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

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



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

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

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

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

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

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

كما لوحظ أن زيادة نسبة المطاط أدت إلى:

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

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

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



الشكل (7): المحطة التجريبية في بداية المرحلة الثانية

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

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

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

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



الشكل (8): نبات الجهنمية

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

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



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

3.2.3.خطة الاعتيان

تم وضع خطة اعتيان تتضمن أماكن جمع العينات وهي:

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

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

4. النتائج

1.4. التجارب الحقلية ونتائج المرحلة الأولى

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

-جمع عينة من وسط الترشيح.

-قياس الحجم الكلي للعينة:(V_{total})

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

-حساب المسامية (n) باستخدام الصيغة:

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

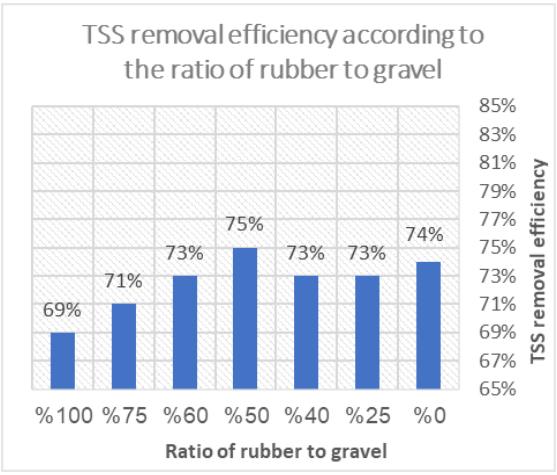
وتم قياس مؤشرات التلوث قبل وبعد أحواض المعالجة بالنباتات وفق خطة الاعتيان من خلال تحليل المياه مخبرياً وتم استخلاص النتائج الموضحة في الجدول (3).

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

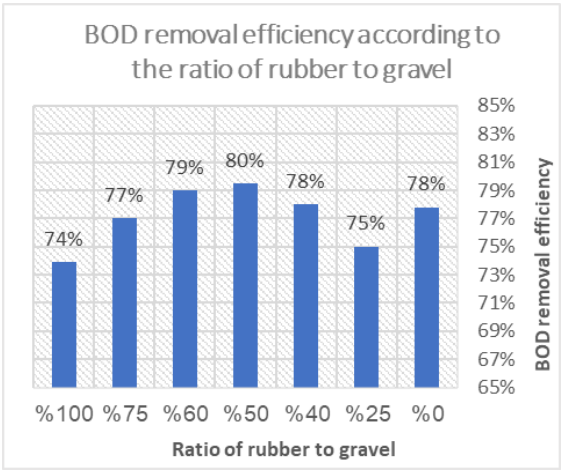
R%	TSS rem	BOD rem	COD rem	NH4 rem	NO3 rem	PO4 rem	Porosity Red

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

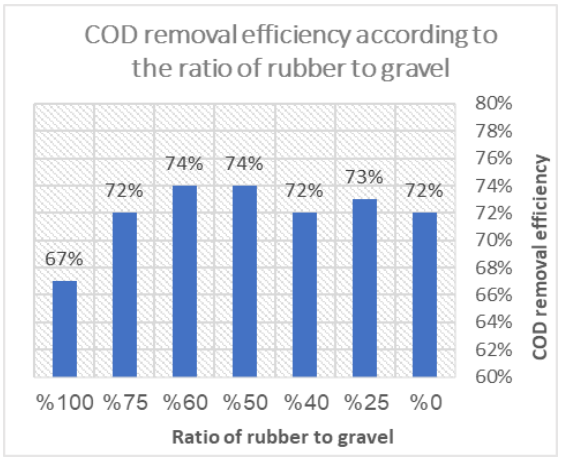
وتوضح الأشكال 10، 11، 12، 13، 14، 15 قيم نسبة إزالة TSS، BOD، COD، NH_4^+، NO_3^-، PO_4^{-3} على التوالي من أجل نسب الخلط لنفايات قطع الإطارات المطاطية إلى الحصويات: (100% حصى، 75% حصى + 25% مطاط، 60% حصى + 40% مطاط، 50% حصى + 50% مطاط، 40% حصى + 60% مطاط، 25% حصى + 75% مطاط، و100% مطاط).



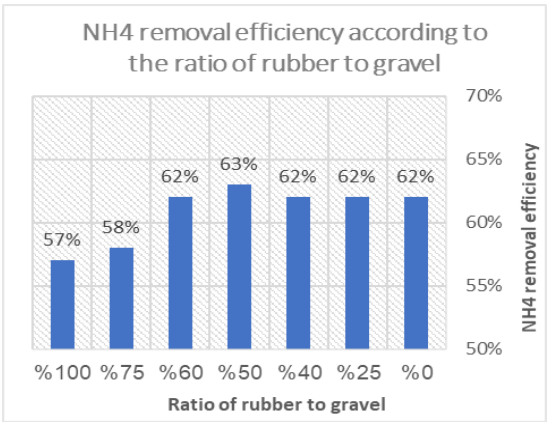
الشكل (10): نسب إزالة TSS الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات



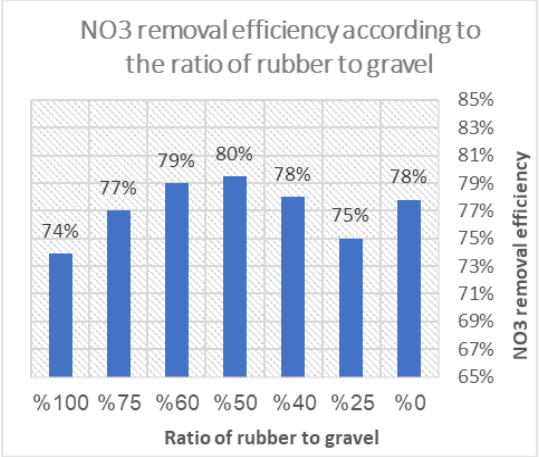
الشكل (11): نسب إزالة BOD الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات



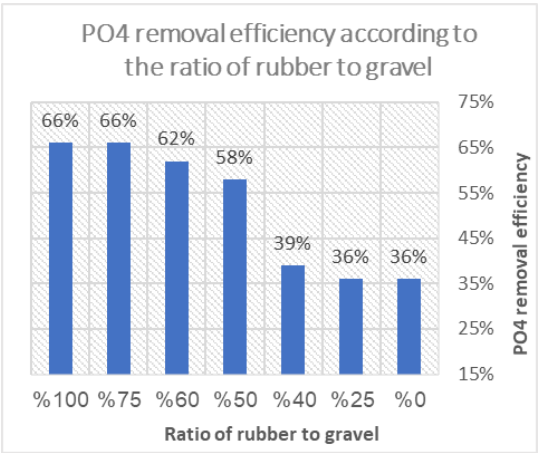
الشكل (12): نسب إزالة COD الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات



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



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

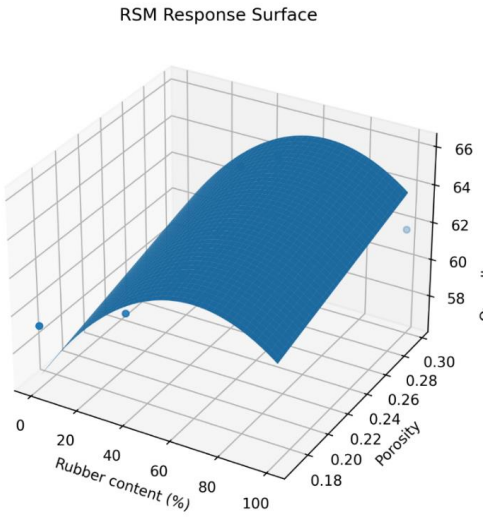


الشكل (15): نسب إزالة PO4 الموافقة لنسب خلط المطاط/الحصويات

2.4. تحديد نسبة الخلط المثلى:

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

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



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

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

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

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

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

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

3.4. التجارب الحقلية ونتائج المرحلة الثانية

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. تحليل النتائج ومناقشتها:

أولاً– تأثير نسب الخلط على الأداء الهيدروليكي:

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

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

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

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

ثانياً – تأثير نسب الخلط على إزالة الملوثات:

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

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

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

– ازدادت إزالة الأمونيوم NH_4^+

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

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

المعدنية المكشوفة التي تقوم بدور ايجابي هام في وسط المعالجة بالنباتات. وهنا يجب التركيز على نقطتين هامتين للمادة المختلطة البديلة:

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

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

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

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

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

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

ثالثا – أداء النباتات ضمن أحواض المعالجة:

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

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

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

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

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

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

رابعاً – التحليل الحبي وتحديد نسبة الخلط المثالية:

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

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

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

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

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

6. الاستنتاجات والتوصيات:

استناداً إلى نتائج الدراسة، يوصي الباحث بما يلي:

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

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

7. المراجع العلمية:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

25- Akratos C., Papaspyros J., Tsihrintzis V. (2008). An artificial neural network model and design equations for BOD and COD removal prediction in horizontal subsurface flowconstructed wetlands. Chemical Engineering Journa.143(1).96-110.Elsevier.

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

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

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