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

شادي تقلا* غادة بلال**

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

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

الملخص

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

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

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

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

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

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

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

Shadi Takla* **Ghada Bilal****

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

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

Abstract

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

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

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

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

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

1. المقدمة:

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

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

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

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

2. هدف البحث:

تتلخص الأهداف الرئيسية فيما يلي:

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

3. الدراسات المرجعية:

تم تصنيف تلك الدراسات إلى محورين أساسيين:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. المواد وطرائق البحث

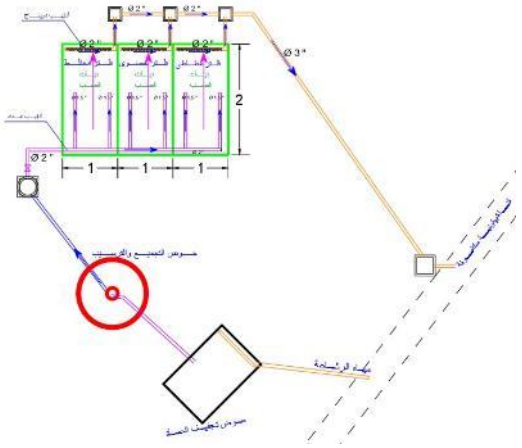
1.4. تصميم المحطة التجريبية:

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

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

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

يبين الشكل (1) المخطط التكنولوجي للمحطة التجريبية.



الشكل (1): الخط التكنولوجي للمحطة التجريبية.

وتتألف المحطة التجريبية من المنشآت التالية:

1.1.4.مضخة المياه الأولية إلى خزان التجميع والترسيب:

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

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

2.1.4.خزان التجميع والترسيب الأولي:

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

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

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

3.1.4.حوض تجفيف الحمأة:

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



الشكل (2): حوض تجفيف الحمأة.

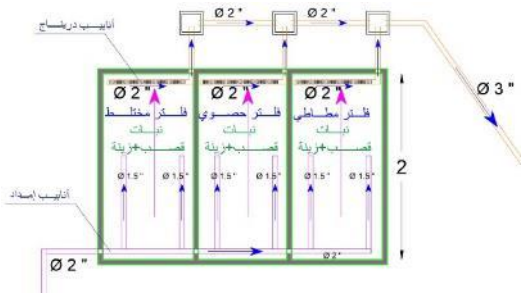
4.1.4. خزان توزيع المياه الرئيسي إلى أحواض المعالجة بالنباتات:

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

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

5.1.4.أحواض المعالجة بالنباتات:

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



الشكل (3): أحواض المعالجة بالنباتات.

حيث اعتمد في حساب حقول النباتات:

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

$$A=Q/24*v$$

A: مساحة مقطع المفاعل (m^2).

Q: تدفق المياه الخام (m^3/d).

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

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

وبالنسبة للمادة المالئة (الفلتر) فهي كمايلي:

1- الحوض ذو الفلتر الحصوي:

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



الشكل (4): الحوض ذو الفلتر الحصوي.

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



الشكل (5): الحوض ذو الفلتر المطاطي.

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



الشكل (6): الحوض ذو الفلتر المختلط.

6.1.4.غرف التفتيش بعد أحواض النباتات:

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



الشكل (7): غرفة التفتيش في المحطة التجريبية.

7.1.4.شبكة التصريف بعد أحواض النباتات:

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

8.1.4.التجهيزات الكهربائية والميكانيكية في المحطة:

تم تجهيز المحطة التجريبية بالتجهيزات التالية:

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

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



الشكل (8): نبات القصب.

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



الشكل (9): المحطة التجريبية بالنباتات.

5. النتائج

تتضمن الدراسة التجريبية العملية، وتتمثل في:

1.5. خطة الاعتيان:

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

2.5. تشغيل المحطة وتوثيق النتائج:

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

تم قياس المسامية ومؤشرات التلوث وتسجيل النتائج التالية:

الجدول (1) – قيم المسامية لأنواع المواد المالئة المستخدمة

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

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

الجدول (2) – قيم TSS لأنواع المواد المالئة المستخدمة

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

الجدول (3) – قيم BOD_5 لأنواع المواد المالئة المستخدمة

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

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

الجدول (4) – قيم COD لأنواع المواد المالئة المستخدمة

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

الجدول (5) – قيم NH4 لأنواع المواد المالئة المستخدمة

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

الجدول (6) – قيم NO3 لأنواع المواد المالئة المستخدمة

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

الجدول (7) – قيم PO4 لأنواع المواد المالئة المستخدمة

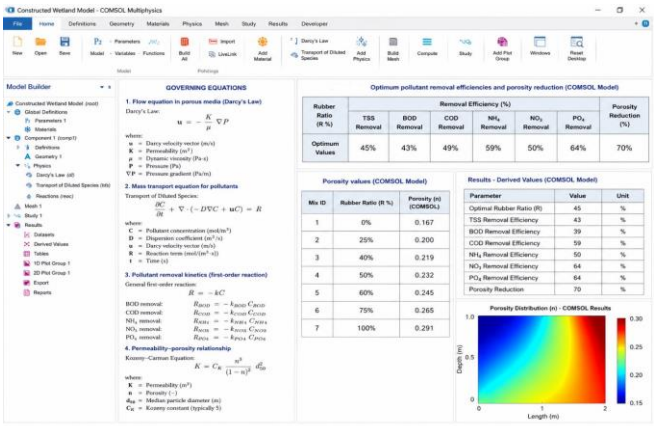
اليوم	PO4 in (الترسيب بعد)	المادة المالئة الحصوية		المادة المالئة المطاطية		المادة المالئة المختلطة	
		PO4 out	نسبة إزالة PO4	PO4 out	نسبة إزالة PO4	PO4 out	نسبة إزالة PO4
1	35	32	7%	31	10%	31	10%
15	34	30	13%	27	22%	27	22%
30	31	26	16%	24	23%	26	16%
50	30	25	18%	19	37%	21	31%
85	31	20	36%	17	45%	18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

3.5. تحليل النتائج ومناقشتها:

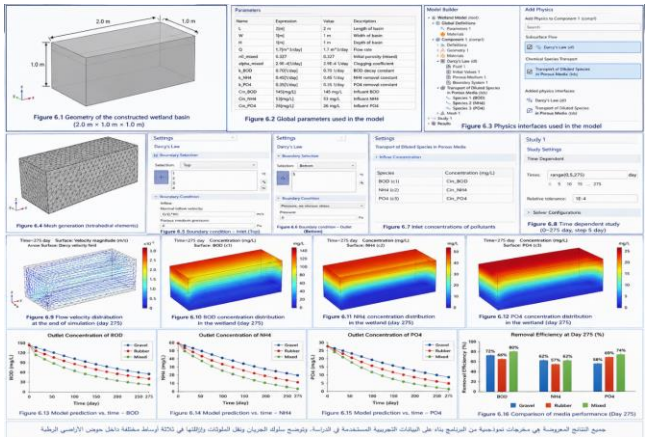
تضمنت تحليل النتائج ونمذجتها على برنامج COMSOL Multiphysics المعتمد على طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method, FEM) لمحاكاة انتقال المياه والملوثات داخل الأراضي الرطبة الصنعية ذات الجريان الشاقولي تحت السطحي، ودراسة تأثير نسب خلط مختلفة من الحصى ورقائق الإطارات المطاطية على الأداء الهيدروليكي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

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

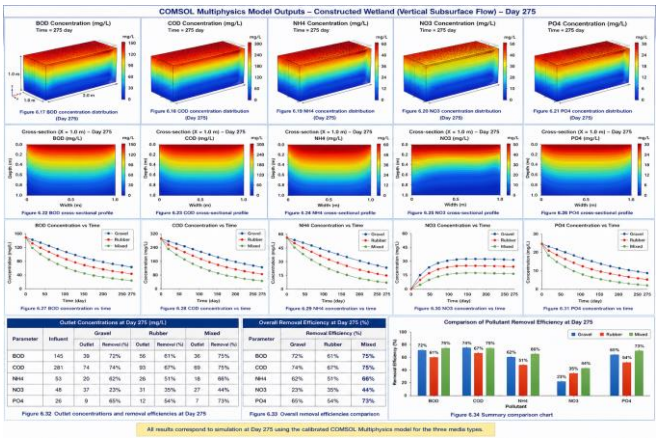
يوضح الشكل (10) المعطيات التصميمية ونتائج التحليل في نهاية النمذجة بينما يوضح الشكلين (11)، (12) النموذج الذي تم بناؤه مع آلية توزع وإزالة الملوثات ضمن النموذج.



الشكل (10): المعطيات التصميمة والنتائج ببرنامج COMSOL.



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



الشكل (12): نتائج تحليل البيانات ببرنامج COMSOL.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ثالثاً – من حيث نمو النبات:

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

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

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

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

6. الاستنتاجات والتوصيات:

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

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

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

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

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

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

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

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

7. المراجع العلمية:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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