المجلة العربية للبحث العلمي
Arabian Journal of Scientific Research

https://doi.org/10.5339/ajsr.2022.10
المجلة العربية للبحث العلمي، 2022، 1 من 14

ورقة بحثية

المرشحات المتداخلة: تقنية بيئية منخفضة التكلفة لمعالجة المياه العادمة اللامركزية وإعادة استخدامها

علي محسن[1]، سمية بلوافا[1]، سليمان الحرفاوي[1]، زكية زميرلي[2]، خالد ديكا[1]، حسن الشاعر[1*]

[1] كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة الحسن الثاني، المحمدية، المغرب
[2] كلية العلوم، جامعة ابن طفيل، القنيطرة، المغرب
Email: hassan.chaair@univh2c.ma *

الملخص

صُمّم نظام المرشحات المتداخلة بوصفه مرشحاً حيوياً قائماً على قدرات التربة الفيزيوكيميائية والأحيائية لمعالجة ملوثات المياه العادمة، ويتميز من باقي الأنظمة الطبيعية المماثلة بحاجات أقل إلى الطاقة والمساحة والصيانة، وإمكانية إعادة استعمال المياه المعالجة في الموقع نفسه. يتكون النظام من طبقتين متباينتين من حيث المواد المستخدمة والمسامية: طبقات خليط التربة والطبقات النفاذة، المرصوصة في شكل يشبه اللبنات؛ حيث مكّن هذا التصميم البارع من تقليص احتمالية انسداد النظام، وزيادة قدرته على تلقّي أحجام كبرى من المياه العادمة، مع ازدواجية الظروف الهوائية واللاهوائية داخله؛ الشيء الذي أكسبه قدرات معالجة متقدمة لمختلف الملوثات بمختلف أنواع المياه العادمة اللامركزية. يهدف هذا البحث إلى التعريف بنظام المرشحات المتداخلة بوصفه تقنية بيئية صاعدة، حيث يلخص مبدأ عمله، وأدوار المواد المكونة له، وآليات معالجة مختلف الملوثات. ويستعرض نتائج بعض الاستخدامات الموفقة لهذا النظام عبر عدد من دول العالم، ونتائج دراسة التكلفة المنجزة التي أكدت انخفاض تكلفة بنائه، والتي لا تتعدى 80 دولاراً أمريكياً لمعالجة متر مكعب من المياه العادمة في اليوم لمدة 20 سنة متواصلة من الاستخدام. وأخيراً، يُظهر البحث، بناء على مقارنات بأنظمة مماثلة، مكامن القوة التي تجعل من هذا النظام بديلاً مستقبلياً ومستداماً للدول النامية كدول أفريقيا.

الكلمات المفتاحية: نظام المرشحات المتداخلة، معالجة المياه العادمة اللامركزية، تنقية المياه المستعملة المنخفضة التكلفة.

Title

Multi-soil layering (MSL): A low-cost eco-technology for decentralized wastewater treatment and reuse

Ali Mohssine[1], Soumia Belouafa[1], Slimane El Harfaoui[1], Zakia Zmirli[2], Khalid Digua[1], Hassan Chaair[1*]

[1] Faculty of Sciences and Technology, University Hassan II, Mohammedia, Morocco
[2] Faculty of Sciences, University Ibn Tofail, Kenitra, Morocco

Abstract

Multi-soil layering (MSL) is a wastewater treatment technology based on the advanced physico-chemical and biological abilities of soil to remediate decentralized wastewater pollutants. The MSL system is characterized by low space occupation, reduced maintenance, energetic needs, and offers the opportunity to the on-site reuse compared to similar natural wastewater treatment technologies. MSL is constructed through the succession of heterogeneous layers: soil mixture layers (SMLs) and permeable layers (PLs) in a brick-like configuration. This ingenious design enabled the system to sustain high hydraulic loads and minimized clogging risks with the coexistence of aero/anaerobic condition and to acquire advanced purifying capabilities for several decentralized wastewater types. This work aims to introduce MSL as an emerging Eco-technology, summarizes the operating principle, function of used materials, and removal mechanisms through the system. Moreover, this paper displays some successful applications across different countries and confirms the low-cost character of the system through an economical analysis that sets the construction cost in less than 80 US$ to treat 1m^3/day during 20 consecutive years of operation. Finally, this study enumerates the MSL strengths in comparison to conventional technologies as a future sustainable alternative for developing nations such as the African countries.

Keywords: Multi-soil layering system, decentralized wastewater treatment, low-cost wastewater treatment

Received 20 February 2022; accepted 20 June 2022; published 31 October 2022.

© 2022 The Author(s), licensee HBKU Press. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Comments Attribution License CC BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

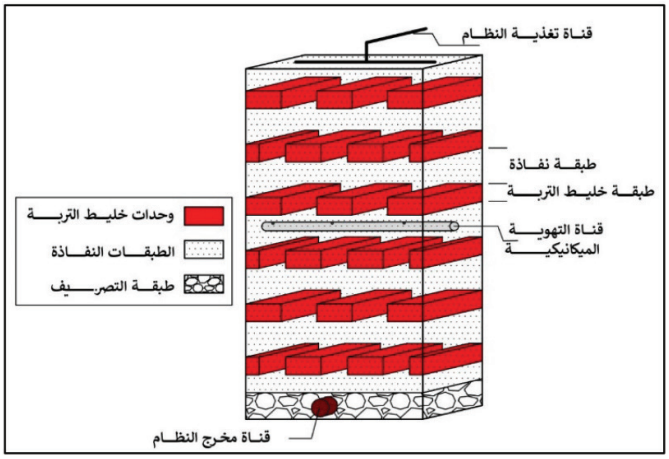
Cite this as: Mohssine A, Belouafa S, El Harfaoui S, Zmirli Z, Digua K, Chaair H. Multi-soil layering (MSL): a low-cost eco-technology for decentralized wastewater treatment and reuse. Arabian Journal of Scientific Research 2022:2.10. https://doi.org/10.5339/ajsr.2022.10

1- المقدمة

تعاني معظم الدول النامية عبر العالم من قلة الموارد المائية السطحية والباطنية وتلوثها، في حين تؤدي التغيرات المناخية دوراً مهماً في تفاقم هذا الوضع.[1] وعلاوة على ذلك، يُعد التفريغ العشوائي للمياه المستعملة من دون معالجة في البيئة المحيطة من بين العوامل المؤثرة سلبياً في جودة الموارد المائية؛ السطحية والباطنية.[2، 3] تحتوي المياه العادمة على حمولات ملوثة من الآزوت والفسفور التي تعتبر من المغذيات التي تسبّب التكاثر السريع للطحالب المسؤولة عن اختناق الأوساط المائية وموت كائناتها.[4] وتحتوي أيضاً على مواد عالقة وغروية تؤدي إلى نقص مسامية التربة وانسدادها، ثم على ملوثات ذات أصل بيولوجي تتمثل في فيروسات، وبكتيريا، وطفيليات ممرضة يشكّل انتقالها إلى المياه خطراً محدقاً يهدد الصحة العامة للأفراد المحاذين لأماكن التفريغ.[5، 6] وقد دفع كل ذلك المجتمع العلمي إلى البحث الدائم عن حلول ناجعة للحفاظ على الموارد المائية، وابتكار أنظمة مستدامة لمعالجة مياه الصرف الصحي. وبالنسبة إلى المدن والمناطق الحضرية، تزود المؤسسات ذات الاختصاص شبكة الصرف الصحي بمحطات تصفية للمياه العادمة ذات التكنولوجيا المتطورة والكفاءة العالية كالحمأة المنشطة، والترشيح النانوي، والتناضح العكسي.[7] لكن تبقى هذه المنشآت باهظة التكلفة، ومستهلكة ضخمة للطاقة الكهربائية، وتحتاج إلى يد عاملة ذات تكوين خاص في تسييرها.[8، 9] أما المناطق المعزولة والمتفرقة البعيدة عن الشبكات المركزية لتصريف المياه العادمة، فيضطر أغلبها إلى عمل حُفر صحية أو تمديد قنوات المنازل وتصريفها في المجاري المائية المجاورة؛ الشيء الذي ينعكس سلبياً على البيئة المجاورة ويتسبب في تلوثها وتدمير مكوناتها.[10، 11] ويستوجب كل هذا إيجاد تقنيات وحلول بديلة لمعالجة هذه المياه اللامركزية، تمتاز بالكفاءة وانخفاض التكلفة في إنشائها وتسييرها في الوقت ذاته، ليتبنّاها صناع القرار في هذه المناطق ذات الميزانيات المحدودة عادة.[12]

تُعدّ تقنيات تنقية المياه العادمة الطبيعية من أهم الحلول البديلة لمعالجة مياه الصرف الصحي اللامركزية في المناطق القروية المعزولة والنائية.[13، 14] لكن تبقى تلك المعتمدة على التربة كوسط ترشيح ذات تطبيقات محدودة.[15] في أوائل التسعينيات، ساهم فريق من الباحثين في اليابان في إخراج نظام معالجة جديد يُدعى «المرشحات المتداخلة»، مكّن من إعادة استخدام التربة في معالجة المياه العادمة في نسق خفّف من القيود المتعارف عليها، حيث تمكّن الباحثون من رفع الصبيب اليومي المعالج إلى أربعة أمتار مكعبة لكل متر مربع من النظام في اليوم ($4m^3/m^2/d$) من دون مشاكل تذكر.[15، 16] إلى جانب ذلك، يمتاز هذا النظام باعتماده على مواد صديقة للبيئة، بانخفاض تكلفته، وقلة انبعاثاته، وشغله مساحات أصغر، ثم استدامته وطول عمره الذي قد يصل إلى 20 سنة من الاستخدام المتواصل مقارنة بالتقنيات الطبيعية المماثلة.[17، 18] وتتكون بنية نظام المرشحات المتداخلة من تسلسل عمودي وأفقي لنوعين من الطبقات: طبقات خليط التربة، والطبقات النفاذة، كما هو موضح في الشكل (1).[15، 19] ومنذ بروز هذه التقنية، جرى تطبيقها على مستوى المختبر وعلى أرض الواقع لمعالجة العديد من أنواع المياه العادمة والملوثات المنزلية والصناعية؛ حيث أثبتت كفاءتها من حيث إنقاص مؤشرات التلوث العضوي؛ الكيميائي والبيولوجي.[20-23] ولم يقتصر دورها على المعالجة فحسب، بل أثبتت فاعليتها كذلك في توفير إمكانية إعادة استعمال المياه المصفاة في الموقع نفسه لأغراض عدة.[24]

تحتل القارة الأفريقية المرتبة الثانية من حيث قسوة المناخ والجفاف بعد أستراليا. ونظراً إلى النمو السكاني المتزايد، فإن الطلب على الموارد المائية في تصاعد مستمر شأنه شأن المياه العادمة المنتجة؛ ما يستدعي إعادة النظر في السياسات المائية ووجوب معالجة المياه العادمة وإعادة استعمالها لحماية الثروات المائية من تسرّبها وتخفيف الضغط المتواصل عليها.[25، 26] قد أبانت التجربة المغربية سهولة تأقلم نظام المرشحات المتداخلة وكفاءته تحت الظروف المناخية شبه القاحلة مع استعمال مواد محلية في بنائه.[22، 24] ولحدود هذا البحث، يقتصر استعمال هذا النظام في القارة الأفريقية على دولة المغرب لحداثته، للتعريف به وتشجيع الباحثين العرب على تطبيقه في مختلف الدول والقارات.



شكل 1. مواصفات ومكونات نظام المرشحات المتداخلة.

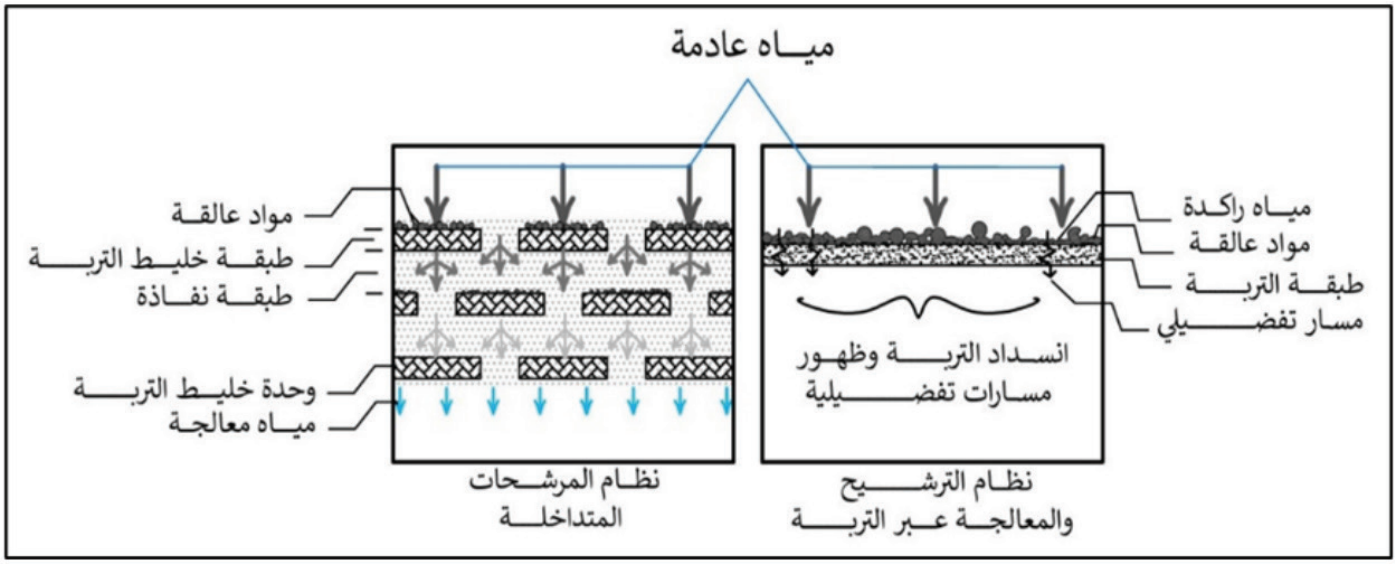
2- أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى التعريف بتقنية المرشحات المتداخلة بوصفها تقنية صاعدة بديلة لمعالجة المياه العادمة اللامركزية في الدول النامية كدول أفريقيا، ويستعرض مبدأ عمل النظام، وأدوار مكوناته وآليات معالجة مختلف الملوثات، ثم يتطرق إلى بعض التطبيقات الناجحة ونتائجها الواعدة في مختلف الدول، وكذا بعض عيوب الاستخدام وطرق التغلب عليها. وأخيراً يستعرض دراسة لتكلفة النظام مبيّناً مكامن القوة التي تجعل منه بديلاً مستقبلياً ومستداماً للتقنيات الكلاسيكية، وحلاً واعداً للدول الراغبة في إقامة أنظمة معالجة للمياه العادمة القروية واللامركزية؛ ليبقى هذا العمل دليلاً للباحثين الحاليين والمستقبليين في هذا المجال ومرجعاً لصنّاع القرار في المناطق المعزولة الراغبين في إقامته.

3- مبدأ عمل النظام

تُعتبر التربة وسطاً حياً غنياً بالتنوع البيولوجي، ولها خصائص فيزيائية كيميائية وأحيائية متنوعة مكّنتها من احتلال مرتبة متقدمة في مجال معالجة المياه العادمة.[27، 28] وقد أبانت عدة أنظمة قائمة على التربة فاعليتها في إزالة ملوثات عدة أنواع من المياه العادمة، نذكر منها المناطق الرطبة الطبيعية والمشيّدة، وخنادق التربة وغيرها.[13، 29، 30] ورغم هذه الإنجازات، فإن هذه التقنيات تبقى معرّضة لخطر الانسداد وتستوجب في أحسن الأحوال مدّها بصبيب ضعيف للتقليل من الأحمال الواردة عليها لتفادي ذلك؛ الشيء الذي يجعلها في حاجة إلى مساحات أكبر وإلى إصلاحات متكررة ترفع من قيمة الإنشاء والاستغلال.[31، 32] عمل الفريق الياباني على إيجاد نظام المرشحات المتداخلة معتمداً على تصميم متميز مكّن المستخدم من استغلال خصائص التربة المتعددة في معالجة مياه الصرف الصحي مع احتمال انسداد قليل

جداً.[15] ويتكون النظام من طبقة خليط التربة المحصل عليها بمزج 70% من التربة مع 10% من نشارة الخشب، و10% من فحم الخشب، و10% من برادة الحديد (بنسب الوزن الجاف)؛[15، 33] إذ يضاف الحديد والمواد العضوية السالفة الذكر من أجل تحسين خصائص التربة في المعالجة ودعم النشاط الأحيائي لهذا الجزء من النظام.[19] ويحيط بطبقات خليط التربة طبقات نفاذة من أحجار الزيوليت بحجم يتراوح بين 1 إلى 5 ملم، وذلك لخفة وزنها وقدرتها المتقدمة على التبادل الكاتيوني وتشتيت المياه داخل النظام وتفادي الانسداد.[32-34] وكما هو مبين في الشكل (2)، تتعاقب هذه الطبقات فيما بينها في نسق يشبه اللبنات يسمح للماء بالتوغل داخل خليط التربة أو بملامسته والمرور إلى الطبقة الموالية إن تعذّر ذلك.



شكل 2. مبدأ عمل نظام المرشحات المتداخلة.

وهذا يسمح للمياه الداخلة بقضاء وقت مطول داخل النظام، ومن ثم معالجة جل ملوثاته مع أقل احتمال للانسداد، على عكس أنظمة الترشيح الكلاسيكية عبر التربة التي تتقلص نفاذيتها بسرعة مع تراكم المواد العضوية وغير العضوية العالقة (Suspended solids) في المياه العادمة.[15، 33] ويساهم نقص النفاذية في ظهور اختصارات ومسارات تفضيلية، وركود للمياه على السطح إلى حين الانسداد الكلي والفشل الكامل للنظام.[35]

4- مكونات النظام وأدوارها

4-1 طبقات خليط التربة

4-1-1 التربة

استخدمت عدة حضارات قديمة التربة وسطًا لترشيح المياه العادمة ومعالجتها، وذلك بحفر خنادق طويلة وغمرها بالمياه الملوثة إلى حين تطهيرها.[28] ومع تطور العلوم، أُخضعت التربة للاختبار ليتبين امتلاكها قدرة تنقية ذاتية تُعزى إلى خصائصها البيولوجية والفيزيوكيميائية المتنوعة، والتي تختلف بحسب نوعها (رملية، طينية، طمي). وتُمكن بنية التربة ومساميتها من استعمالها وسطًا للترشيح قادرًا على عزل الأجسام الصلبة من المياه العادمة.[27] وتعتبر التربة كذلك مأوى للعديد من أنواع الكائنات المجهرية والبكتيريا النشطة القادرة على تحليل المواد العضوية وغير العضوية الملوثة (الشكل 3)، وتتميز بعض الأنواع منها كالأنديزول (Andisol) بقدرتها على مسك وترسيب الفوسفور قد تصل إلى غرام من الفسفور لكل كيلوغرام من التربة.[15، 36] ومن أجل كل ما سبق، ولكونها مادة منخفضة التكلفة ومتوافرة بكثرة، جرى اختيار التربة لتكون المكون الرئيسي لنظام المرشحات المتداخلة مع مزجها بمواد عضوية وبجزيئات الحديد لزيادة كفاءتها في معالجة المياه المستعملة.[17]

4-1-2 المواد العضوية

لقد أبانت التجارب أن إضافة بعض المواد العضوية إلى التربة يحسّن من خصائصها الأحيائية والفيزيائية؛ حيث تتطور وتتحسن بعض الخصائص المهمة كالنفاذية والتوصيل الهيدروليكي، والامتصاص والامتزاز (Adsorption).[15] وبالنسبة إلى نظام المرشحات المتداخلة، فقد قام العديد من الباحثين بتجربة مواد عضوية كثيرة كنشارة الخشب، وألياف قصب السكر، وألياف ثمرة جوز الهند، والجوت (Jute)، وقشور الأرز. ويرجع هذا الاختيار إلى كون هذه المواد ذات أصل نباتي تعتبر ممتزاتٍ منخفضةَ التكلفة، وملجأً للبكتيريا المطهرة، ومصادر غنية بالكربون الذي تحتاجه البكتيريا النازعة للنيتروجين لتخليص الماء من النترات (الشكل 3). ويضاف أيضاً إلى طبقة مزيج التربة الفحم الطبيعي المعروف بخصائصه الطاردة للماء ومساميته الكبيرة التي تساهم في عزل الملوثات إلى حين تفكيكها بواسطة النشاط الحيوي للخليط.[37، 38]

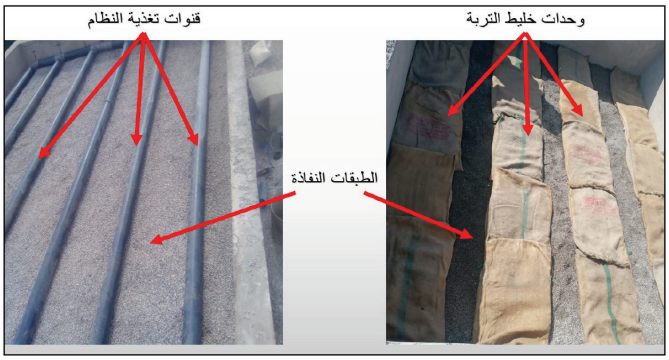
شكل 3. مميزات وأدوار مواد نظام المرشحات المتداخلة.

3-1-4 جزيئات الحديد

يضاف إلى طبقات خليط التربة جزيئات الحديد من أجل تقوية قدرة التربة على مسك الفوسفور الذائب في المياه العادمة، نظراً إلى المشاكل البيئية التي قد تنتج من طرحه في الطبيعة من دون معالجة؛ حيث تختلف قدرات التربة بحسب أنواعها في مسك وتثبيت الفوسفور.[15] وفي ظل الظروف الهوائية، تتأكسد أيونات الحديد (Fe^{2+}) القادمة من برادة الحديد المضاف إلى (Fe^{3+}) والتي تعمل على مسك الفوسفور وترسيبه على شكل هيدروكسيدات غير قابلة للذوبان.[27، 33]

2-4 الطبقات النفاذة

تحيط بطبقات خليط التربة عمودياً وأفقياً طبقات نفاذة تتكون من مواد ذات حجم كبير، وكتلة حجمية خفيفة، وقدرة متقدمة على التبادل الأيوني كالزيوليت، والبيرليت، والخفاف من أجل امتزاز بعض الملوثات كالأمونيا.[39] وتسود في هذه الطبقات ظروف هوائية تساعد على تكثيف نشاط البكتيريا الهوائية، وتعزيز قدرة النظام على معالجة الفسفور والآزوت.[27، 33] وتساهم كذلك هذه الطبقات في التشتيت الجيد للمياه العادمة داخل النظام من أجل زيادة التلامس بينها وبين مكونات مختلف الطبقات؛ مما يدعم قدرات النظام على المعالجة ويقلل احتمالية انسداده (الشكل 4).[15، 33] وقد أبانت التجارب أن حجم جزيئات هذه الطبقة يجب أن يُراوح ما بين 1 و 5 ملمترات مع الزيادة في علوها ما أمكن من أجل كفاءة قصوى.[21، 32، 34]



شكل 4. أحد تطبيقات نظام المرشحات المتداخلة لمعالجة المياه المنزلية العادمة بمدينة مراكش، المغرب.

5- أخطار ملوثات المياه العادمة وآليات معالجتها

تتميز المياه العادمة، المنزلية والصناعية، باحتوائها على أحمال عالية من المواد العضوية السهلة (Biodegradable)، والصعبة المعالجة (Non-biodegradable) عن طريق أنظمة المعالجة البيولوجية، وتختلف حمولة المياه العادمة من هذه المواد باختلاف المصدر والنشاط.[40، 41] لذا، ينتج من تفريغ هذه المواد من دون معالجة مسبقة تقليلُ مسامية التربة، واستهلاك الأكسجين والتسبب في اختناق الأوساط المائية.[42] وتحتوي هذه المياه كذلك على تراكيز مختلفة من المغذيات كالفسفور والآزوت، اللذين يعتبران عنصرين مهمين لنمو النباتات، إلا أن تدفقهما إلى الأوساط المائية يساهم على نحو كبير في تلوثها ونمو الطحالب نمواً متسارعًا (Algae bloom) يؤدي إلى اخضرارها ونقص الأكسجين الضروري لعيش مختلف الكائنات فيها.[43] كما قد يتسبب تسربها إلى المياه الجوفية والسطحية في تسمم الإنسان، والتسبب في أضرار وخيمة على الصحة العامة.[44] وعلاوة

على ما سبق، تحتضن المياه العادمة، بمختلف أنواعها، كائنات مجهرية ممرضة؛ من بكتيريا، وفيروسات، وطفيليات، وفطريات تنتقل وتتكاثر بسهولة في الأوساط المختلفة كالتربة والمياه، وعند ملامسة الإنسان لها تتسبب في أمراض معوية (Enteric diseases)، وجلدية، وباطنية قد تؤدي إلى الوفاة.[45-47] ونذكر على سبيل المثال لا الحصر: حمى التيفوئيد (Salmonellosis)، والبلهارسيا (Schistosomiases)، والجيارديا (Giardiasis) ... إلخ. ويمكن أن تحتضن مياه الصرف الصحي بقايا مواد سامة، وهرمونات ومضادات حيوية قد تتسبب عند انتقالها في أضرار بليغة على المدى القريب والبعيد للبيئة والإنسان معاً.[48، 49]

وفيما يلي نستعرض مختلف آليات المعالجة الممكنة عبر تقنية المرشحات المتداخلة لإزالة مختلف ملوثات المياه العادمة، والتقليل من أضرارها على مختلف مكونات البيئة.

5-1 المواد العضوية

في بادئ الأمر، تتدفق المياه العادمة عمودياً عبر الطبقات العليا للنظام ليتم احتجاز المواد العضوية عن طريق الترشيح والامتزاز على سطح مواد المرشح. ثم يأتي دور النشاط البكتيري من أجل تحويلها إلى ثاني أكسيد الكربون وماء وطاقة من أجل تكاثرها.[35] وتتميز الطبقات العلوية من النظام بالنشاط الحيوي المكثف الراجع إلى توافر الأكسجين الناتج من التبادل الغازي مع الهواء، ووفرة المغذيات المحمولة عبر المياه المستعملة؛ حيث بلغت نسبة إزالة الطلب على الأكسجين البيولوجي (BOD) 80% عبر المرور بثلاث طبقات من خليط التربة فقط. وفي ظل هذه الظروف المناسبة، يتم تحرير الآزوت والفسفور من المركبات العضوية وتحويلهما إلى مركبات غير عضوية سيتم التطرق إلى مصيرها لاحقاً. وقد أبانت التجربة أن إزالة الطلب على الأكسجين الكيميائي (COD) تلزمها أكثر من ثلاث طبقات نظراً إلى احتوائها على مواد صعبة التحلل عن طريق التنفس البيولوجي.[37] ومن أجل دعم الأنشطة الإنزيمية للبكتيريا داخل النظام، أجرى عدة باحثين تهوية ميكانيكية إضافية لتوفير تراكيز أكبر من الأكسجين كفيلة برفع مستويات تحلل وإزالة المواد العضوية من المياه المصفّاة.[33، 50]

5-2 الآزوت/ النيتروجين

تتميز طبقات خليط التربة بمسامية منخفضة تجعلها تضم مناطق هوائية ولاهوائية في الوقت نفسه، تختص كل منها بمرحلة من مراحل معالجة الملوثات، كما تتميز الطبقات النفاذة بسيادة الظروف الهوائية داخلها وامتلاك جزيئاتها قدرة على التبادل الأيوني تمكّنها من تثبيت جزيئات الأمونيا (NH_4^+) على سطحها كمرحلة أولية. ثم تقوم البكتيريا المختصة تحت الظروف الهوائية بأكسدة هذه الأمونيا إلى نتريت (NO_2^-) ثم إلى نترات (NO_3^-)، وتسمى هذه العملية بالنترجة.[27، 51] وبالاستعانة بالكربون الذي توفره المواد العضوية المضافة إلى طبقات التربة وتحت الظروف اللاهوائية، تقوم أنواع من البكتيريا بتفكيك جزيئات النترات وأكسدتها لغازات النيتروجين (N_2) و(N_2O)، وتسمى هذه العملية بعملية نزع النيتروجين.[52] وتعتبر عمليتا النترجة ونزع النتروجين محددتَين لكفاءة النظام في إزالة الآزوت من المياه العادمة، وتحتاجان إلى توافر الظروف السالفة الذكر ووجود البكتيريا المنترجة لأكسدة الأمونيا ثم البكتيريا النازعة للنيتروجين لأكسدة النترات.[35]

5-3 الفسفور

تُضاف جزيئات الحديد إلى طبقات خليط التربة منذ بناء هذا النظام؛ من أجل تقوية قدرات التربة على مسك الفوسفور الذي يُعتبر من المغذيات التي يسبب تسربها إلى الأوساط المائية في انتشار متسارع للطحالب التي تشكّل طبقة داكنة تمنع تسرب أشعة الشمس وتساهم في اختناق وتدمير الأحياء المائية.[43] وفي ظروف هوائية، تتأكسد أيونات الحديد الثنائي (Fe^{2+}) داخل طبقات التربة وتهاجر نحو الطبقات النفاذة لتتأكسد مرة أخرى تحت الظروف الهوائية إلى أيونات الحديد الثلاثي (Fe^{3+}). وعند تدفق المياه العادمة عبر النظام، تتفاعل جزيئات الفسفور مع أيونات الحديد وتُحتجز على شكل ترسبات ($Fe(OH)_3$) ليتم احتجازها داخل النظام. ويمكن كذلك معالجة الفسفور عن طريق امتزازه على هيدروكسيدات الحديد المتكونة داخل النظام أو عن طريق استهلاكه من طرف البكتيريا لكونه مكوناً أساسياً لجزيئات الطاقة.[15، 33، 35]

5-4 الكائنات المجهرية الممرضة

تعتبر المياه العادمة مرتعاً خصباً للكائنات المجهرية الممرضة التي تنتقل عبر الملامسة. وتعد حمولة المياه المعالجة من هذه الكائنات معياراً لتحديد استعمالاتها من طرف القوانين الجاري العمل بها. وبصفة عامة، تُعزى معالجة الميكروبات عن طريق أنظمة معالجة مياه الصرف الصحي القائمة على التربة إلى ظاهرة الترشيح بواسطة مسامية المواد المستعملة، ثم إلى الظروف غير الملائمة التي تتسبب في موتها.[53] وإضافة إلى ذلك، يؤدي الامتزاز دوراً مهماً في التصاق الخلايا المجهرية بمواد المرشح وشل حركتها إلى حين نفوقها. وقد أكدت التجربة أن نظام المرشحات المتداخلة يمتاز بقدرة متقدمة على معالجة هذه الكائنات؛ نظراً إلى استعمال مواد ذات قوة امتزاز وامتصاص عاليتين، إضافة إلى كون الظروف الهوائية داخل الطبقات النفاذة تساعد على نمو كائنات منافسة ومفترسة لها.[22، 54]

6- استخدامات النظام

في أوائل التسعينيات، طُبّق أول نظام للمرشحات المتداخلة لمعالجة المياه العادمة لأحد المنازل بمدينة ماتسو اليابانية، حيث أظهر النظام فاعليته في معالجة مختلف الملوثات.[15] وبعد ذلك، قامت مجموعات من الباحثين بتطبيقه لمعالجة أنواع عدة من مياه الصرف الصحي والملوثات المنزلية والصناعية. ولم يبقَ النظام حبيس دولة اليابان، بل جرى تعميمه على العديد من الدول الآسيوية كتايوان،[39] وتايلند،[19] والصين،[55] وإندونيسيا،[56] ثم جزر هاواي في أمريكيا،[23] والمغرب في أفريقيا.[22] ويستعرض جدول (1) بعض التطبيقات المختلفة التي عرفها نظام المرشحات المتداخلة، سواء على مستوى المختبر أو على أرض الواقع، حيث تتضح جلياً كفاءته من خلال النتائج الواعدة لمعالجة الطلب على الأكسجين البيوكيميائي، والآزوت، والفسفور، والبكتيريا الممرضة وبعض المواد الأخرى كبقايا المضادات الحيوية والبوليفينولات بمادة المرجين، مع الحفاظ على صبيب ملائم يجعل متطلبات النظام منخفضة من حيث المساحة المشغولة مقارنة بالأنظمة المماثلة. ويشير التطبيق الناجح للنظام عبر القارات والدول المختلفة إلى عدم تأثره بالعوامل المناخية؛ حيث إنه حافظ على مستويات معالجة متقدمة تحت ظروف المناخ الاستوائي، وشبه الاستوائي، وشبه الاستوائي الرطب في أمريكيا وآسيويا، وشبه القاحل في أفريقيا.

جدول 1. استخدامات نظام المرشحات المتداخلة لمعالجة المياه العادمة

مصدر المياه العادمة	الصبيب م^3/م^2/يوم	نسب المعالجة							الدولة	المرجع
		الطلب على الأكسحين البيوكيميائي (BOD)/ الطلب على الأكسحين الكيمائي (COD)	الأمونيا	الآزوت الكلي	الفسفور الكلي	البكتيريا الممرضة *Pseudomonas sp, Staphylococcus sp Clostridium sp Escherichia coli* ...	ملوثات أخرى			
منزلي	0.92 -0.44	%95.2 90.3- (COD)	%86.9 -85.1	%63.8-58.9	%94.0-92.0	-	-	الصين	55
صناعة الأجبان	0.505-0.178	-	-	%96 (الآزوت اللاعضوي)	%99	-	-	جزر هاواي في أمريكا	23
مطرح نفايات قروي	0.6-0.2	%97.4-62.3 (COD)	%82.4-53.4	-	%91.9-75.6	-	-	الصين	32
مياه سطحية ملوثة	4-1	%83.5-72.2 (BOD)	-	%50.5-22.4	%66.8-51.9	-		اليابان	34
منزلي	0.2	(BOD) %86 (COD) %81		%78	%80	أكثر من وحدة لوغاريتمية	-	المغرب	22
مياه مقصف الجامعة	0.23	(BOD) %90 (COD) %70	%76	91%	%90	-	-	تايلند	19
مياه معصرة الزيتون (مرجين)	0.1	%82.63-54.39 (BOD) %91.76-85.03 (COD)	%98.58-69.25	-	-55.46 %90.06	-	المركبات الفينولية %100-91.47	المغرب	20
مياه تربية الدواجن	0.32	-	-	-	-	-	بقايا المضادات الحيوية (سلفاميثوكسازول) %91-52.3	الصين	49

7- بعض عيوب النظام وطرق التغلب عليها

لقد تمكّن نظام المرشحات المتداخلة من تجاوز القيود التي لازمت استعمال التربة كوسط لمعالجة المياه العادمة بكفاءة،[15، 17] إلا أنه كباقي الأنظمة، تبقى استدامته رهينة بمدى تطبيق شروط البناء والاستخدام للاستفادة من كفاءته في أحسن الظروف وإطالة عمره الافتراضي.[17، 37] وفيما يلي، سنتطرق إلى بعض عيوب هذا النظام انطلاقاً من التجارب المخبرية والتطبيقات الفعلية، ثم إلى الاحتياطات الواجب اتخاذها أثناء البناء والاستخدام تفادياً للأعطال المتكررة، وذلك من أجل استخدام مستدام.

كأيّ نظام تصفية بيولوجي، يتأثر نظام المرشحات المتداخلة بالظروف المناخية كانخفاض الحرارة إلى أقل الدرجات؛ ما يكبح النشاط البيولوجي ويؤثر سلبياً في فاعلية النظام. وكإجراء وقائي، يُنصح بدفن النظام لتخفيف

تأثير انخفاض درجات الحرارة والمحافظة على دفئه خلال هده الفترات، كما يُوصى بتطبيق التهوية الدورية لتنشيط الكائنات الدقيقة المسؤولة عن التصفية خلال الفترة نفسها.[17، 18، 35] وخلال بناء النظام، يتعيّن على المشرفين اختيار مواد ذات نفاذية عالية؛ تفادياً للانسداد المبكر الذي ينتج من استعمار الفضاءات الخلالية (Interstitial spaces) من طرف المواد العالقة والإفرازات البيولوجية.[34، 37] وعلاوة على ذلك، لوحظ أن الاستخدام المطول للنظام من دون تهوية ميكانيكية وفترات راحة يؤدي إلى الانسداد وتقليص مردودية التنقية إلى أدنى المستويات. ودرءاً لذلك، يُستحسن اعتماد كتلة حجمية في حدود 0.9-1.2 غم/ سم^3 لخليط التربة من أجل مسامية كافية،[17، 38] كما ينصح بتطبيق تهوية دورية وفترات استراحة للنظام من أجل تكثيف النشاط البيولوجي واستهلاك المواد العضوية المتراكمة داخل النظام لتحرير المسامية المستعمرة واسترجاع قدرات التصفية.[27، 36] كما يُنصح باعتماد نظام معالجة قبلي لتخفيف حمل المواد الغروية والعالقة في المياه العادمة الموجهة للنظام.[16] وأثناء تطبيق التهوية الميكانيكية، يراعى في ذلك اعتماد صبيب معتدل ودوري لكونه يؤدي دوراً في تنشيط المعالجة البيولوجية الهوائية للملوثات، في حين أن التراكيز الكبيرة تحد من الأنشطة اللاهوائية للمعالجة كعملية نزع النيتروجين.[27، 36] وتؤدي التهوية الميكانيكية دوراً مهماً في استدامة النظام وتكثيف النشاط الأحيائي لمعالجة مختلف الملوثات،[35، 38] إلا أنها تشكّل عبئاً مادياً على المستغلين النهائيين لتسديد فاتورة الكهرباء. ويستهدف الانتقال الطاقي المنشود في مختلف دول العالم استبدال المصادر التقليدية بأخرى مستدامة لتخفيف الضغط على الموارد الطبيعية وتقليل بصمة الكربون لمختلف الصناعات والطرائق. وفي هذا الصدد، اعتمدت عدة دراسات مصادر متجددة مختلفة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح لتوفير الاحتياجات الطاقية الكلية للعديد من أنظمة معالجة مياه الصرف الصحي.[57، 58] وعلى غرار ذلك، جرى اعتماد نظام تدفئة يعتمد على الإشعاع الشمسي لتسخين المياه العادمة قبل دخولها إلى خزان الصرف الصحي المرتبط بنظام المرشحات المتداخلة؛ الشيء الذي أكسب النظام قدرات عالية على تنقية المياه العادمة المنزلية من دون الحاجة إلى التهوية، كما مكّنه من التوافق مع معايير الجودة (ISO 30500) لتصفية المياه العادمة.[59] ومن هذا المنطلق، نثمّن هذه المجهودات وندعو الدراسات المستقبلية إلى الانفتاح على الطاقة الشمسية وطاقة الرياح عبر توربينات الرياح والخلايا الكهروضوئية لتوفير الطاقة.

8- دراسة التكلفة

يعتمد نظام المرشحات المتداخلة في بنائه على مواد صديقة للبيئة منخفضة التكلفة، يمكن إعادة تدويرها بسهولة بعد انتهاء العمر الافتراضي للنظام.[15، 17] ويُعتبر بعض هذه المواد مخلفات أو منتوجات ثانوية لصناعات أخرى يمكن الحصول عليها بأثمنة رمزية سنحدد قيمتها بحسب السوق المغربية، وسيُعبَّر عنها فيما يلي بعملة الدولار الأمريكي (US$). بالنسبة إلى جزيئات الفحم الطبيعي، يتراوح حجم الجزيئات المطلوبة بين 1 و2 ملمتر، وبالنظر إلى الطلب على القطع الكبيرة فقط من أجل التدفئة والطهي يمكن الحصول على الحجم المطلوب بنحو 250 دولاراً/ طن. أما فيما يخص نشارة الخشب، فتباع بثمن زهيد في مصانع الخشب وورشات النجارة المحلية للأفران ويمكن الحصول عليها بنحو 50 دولاراً/ طن، كما يمكن الحصول على خردة الحديد من مخلفات ورشات الخراطة ومصانع الحديد مقابل 300 دولار/ طن.

أكد عدة باحثين على إمكانية بناء نظام المرشحات المتداخلة بالاعتماد على مواد محلية فحسب بالخاصيات نفسها.[38] وبالنسبة إلى الطبقات النفاذة، استبدل بعض الباحثين أحجار الزيوليت التي تعتبر منتوجاً دخيلاً يجب استيراده ويُراوح ثمنه بين 100 و150 دولاراً/ طن بحصى مقالع مواد البناء (Gravel)،[20، 22] الذي يمكن الحصول عليه بـ 50 دولاراً/ طن فقط، مع إبقاء النظام على كفاءته المعهودة في المعالجة. وفيما يلي، سنتطرق إلى دراسة اقتصادية لتكلفة النظام لمعالجة المياه المستعملة لمنزل واحد مكون من أسرتين يبلغ حجم المياه العادمة المنتجة متراً مكعباً واحداً في اليوم. وبالنسبة إلى التدفق الهيدروليكي السطحي، فقد جرى اختيار متر مكعب واحد لكل متر مربع من المرشح في اليوم ($1m^3/m^2/d$) للعمل بنصف قدرات النظام من أجل رفع عمره الافتراضي الذي قُدّر بـ 20 سنة من الاستخدام المتواصل،[17] لتكون المساحة التي سيشغلها النظام هي متراً مربعاً واحداً.

جدول 2. توصيات بناء نظام المرشحات المتداخلة لاستخدام مستدام.

التوصيات	التعليل
تنصيب نظام للمعالجة الأولية (Pretreatment) قبل نظام المرشحات المتداخلة[17]	لإزالة الملوثات ذات الحجم الكبير، والزيوت، والمواد العالقة
اتخاذ 5 سنتمترات عوض 10 كعُلو لطبقات خليط التربة[37]	الطبقات السميكة ترفع من احتمالية انسداد النظام
استعمال تربة رملية في تكوين طبقات خليط التربة[34]	لنفاذية أكبر ولتفادي الانسداد الذي قد تسببه التربة الطينية
إضافة أنبوب للتهوية الميكانيكية[16، 37]	لتعزيز عمل البكتيريا أو كإجراء لرفع الانسداد
تغذية النظام بأكبر عدد من النقاط[37، 49]	لضمان تشتت وتفريق المياه العادمة وتوفير مساحة التلامس القصوى بين مكونات النظام والمياه المراد معالجتها

وفيما يخص عمق النظام، فقد حدد في 1.1 متر؛ حيث تقرر استعمال ست طبقات من خليط التربة محاطة بست طبقات نفاذة مع طبقة سفلى من الحصى الكبير من أجل التصريف.[36] ويعتمد بناء هذا النظام على مختلف الخلاصات والتوصيات الملخصة في جدول (2).

جدول 3. كميات المواد اللازمة لبناء نظام المرشحات المتداخلة المدروس.

		الشكل (1)	الشكل (2)
وحدات خليط التربة	العدد	15	6
	الطول × العرض × الارتفاع (م^3)	0.05 × 0.267 × 1	0.05 × 0.083 × 1
	الكتلة الحجمية (غم/ سم^3)	1.215	
	الحجم الكلي (م^3)/ الوزن الكلي (كلغ)	0.225/ 270	
	التربة الرملية (كلغ)	189	
	نشارة الخشب (كلغ)	27	
	برادة الحديد (كلغ)		
	الفحم الطبيعي (كلغ)		
الطبقات النفاذة	العدد	6	15
	الطول × العرض × الارتفاع (م^3)	0.1 × 1 × 1	0.05 × 0.1 × 1
	الحجم الكلي (م^3)	0.675	
طبقة الحصى السفلى للتصريف	الطول × العرض × الارتفاع (م^3)	0.2 × 1 × 1	
	الحجم الكلي (م^3)	0.2	

من خلال الحسابات المنجزة في جدول (3)، يتبين أن طبقات خليط التربة تشكل 25 في المئة من حجم النظام، بينما تشكّل الطبقات النفاذة 75 في المئة، ويظهر جدول (4) أن تكلفة النظام الإجمالية تبقى جد منخفضة لا تتجاوز 80 دولاراً لمعالجة المتر المكعب الواحد من المياه العادمة.

جدول 4. دراسة التكلفة لنظام المرشحات المتداخلة المدروس.

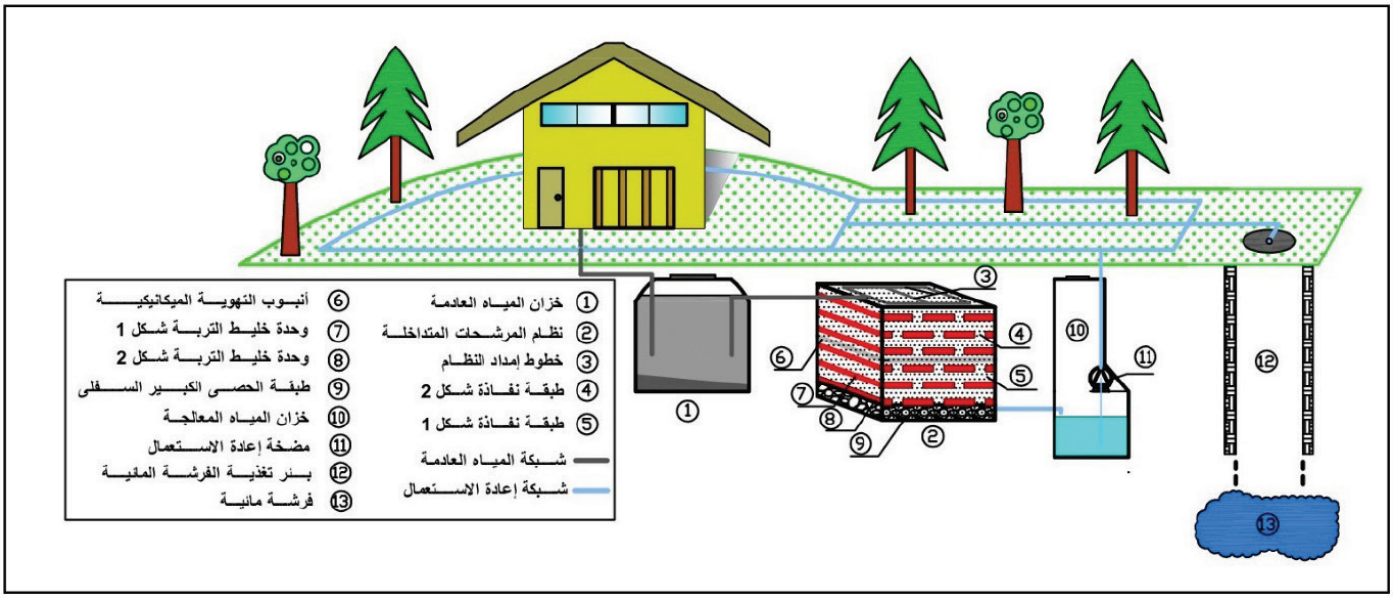
الكمية	النوع	سعر الوحدة	السعر الجزئي ($)
0.225	التربة الرملية	3$/ م^{3*}	0.675
0.027	نشارة الخشب	80$/ للطن	2.16
	برادة الحديد	300$/ للطن	8.1
	الفحم الطبيعي	250$/ للطن	6.75
0.675	حصى الطبقات النفاذة (3-5 ملم)	50$/ م^3	33.75
0.2	حصى التصريف (1-3 سم)	50$/ م^3	10
12	أنابيب الإمداد، والتهوية والتصريف	1$/ م	12
السعر الإجمالي			73.43

* تم احتساب ثمن التوصيل بالنسبة إلى التربة نظراً إلى مجانيتها ووفرتها في كل الأوساط.

وذلك بالمقارنة مع أنظمة طبيعية مماثلة كالأراضي الرطبة المشيدة ذات التدفق العمودي التي تكلف أكثر من 300 دولار أمريكي لمعالجة متر مكعب من مياه الصرف الصحي.[60، 61] ومن خلال كل ما سبق، يتبين جلياً أن نظام المرشحات المتداخلة يُعدّ الخيار المنخفض التكلفة والبديل الأنسب لمعالجة المياه المنزلية اللامركزية.[18] ومن أجل 20 سنة من الاستخدام، سيتعين على النظام معالجة ما يناهز 7300م^3 من المياه المستعملة. وإذا ما تمّت قسمة التكلفة على الحجم، فستبلغ قيمة معالجة المتر المكعب الواحد من المياه العادمة 0.01 دولار أمريكي. وبالنسبة إلى أعمال الصيانة، فقد

أبانت التجارب أن الأنظمة الجيدة التصميم لا تحتاج إلى إصلاحات إلا نادراً، ولا تتطلب في استغلالها يداً عاملة مختصة؛ ما يجعلها مستدامة ومنخفضة التكلفة ليس فقط في إنشائها، بل في تسييرها أيضا.[17] وبالنسبة إلى التجارب الطويلة الأمد على أنظمة المرشحات المتداخلة خلال السنة العاشرة،[18] والسنة العشرين من الاستخدام المتواصل،[62] لم يتطرق الباحثون إلى حاجة الأنظمة المدروسة إلى الصيانة أو أي تدخّل تقني طوال مدة الاستخدام. وبعد انقضاء العمر الافتراضي للنظام، يمكن إعادة تدوير واستخدام كل المكونات لأغراض زراعية كونها قد تشبّعت بمختلف المغذيات التي تحتاجها النباتات كسماد.[15، 17]

علاوة على ذلك، يمنح نظام المرشحات المتداخلة إمكانية استعمال المياه المعالجة في الموقع وذلك لأغراض عدة. ويمكن وصله بخزان ومضخة لإعادة استعماله لأغراض فلاحية، لسقي المساحات الخضراء، كما يمكن استخدام هذه المياه في تغذية الفرشة المائية عبر حفر أثقاب وآبار لهذه الغاية (الشكل 5).



شكل 5. تصميم نظام المرشحات المتداخلة للتطهير الفردي وإعادة الاستعمال.

9- نظام المرشحات المتداخلة كبديل مستقبلي للدول النامية الأفريقية

تتميز القارة الأفريقية بمناخها القاسي وقلة التساقطات في جل دولها، وتُصنف كثاني قارة تعاني من الجفاف بعد أستراليا. وتساهم عوامل عدة، كالزحف العمراني والنمو الديموغرافي المتزايد، في زيادة الضغط على الموارد المائية والنقص من جودتها من جراء الكميات الكبيرة من المياه العادمة التي تطرح من دون معالجة مسبقة.[25، 26] ولهذا، فإن هذه الدول مطالبة ببذل جهود مضاعفة من أجل تخفيف الضغط على هذه الموارد وإيجاد حلول بديلة من أجل معالجة المياه العادمة وإعادة استخدامها كموارد جديدة، لتحقيق التنمية المستدامة وصون حقوق الأجيال القادمة. وتستخدم بعض الدول الأفريقية كما هو مبين في جدول (5) تقنيات معالجة، مثل برك التثبيت (Stabilization ponds) والمناطق الرطبة المشيدة، إلا أنها تبقى مشوبة ببعض نقاط الضعف كالروائح الكريهة المنبعثة خصوصاً في فترات الصيف، وتكاثر القوارض والبعوض في المناطق المحيطة بها. كما تبقى تقنيات مستهلكة للمساحات، الشيء الذي يرفع من تكلفة إنشائها في المناطق القريبة من المدن نظراً إلى غلاء الوعاء العقاري.

جدول 5. مقارنة نظام المرشحات المتداخلة بالأنظمة الطبيعية المماثلة.

نوع النظام	روائح كريهة	جمالية المنظر العام	المساحة المشغولة	تردد الإصلاحات	إمكانية الربط الفردي	ملاحظات	الدول الأفريقية المستعملة
المناطق الرطبة المشيدة (Constructed wetlands)	++ (12.63)	+++ (63,64)	++ (12.63)	+++ (12,65)	نعم	وجود قوارض وبعوض[66] الحاجة الدائمة لتقليم النباتات المغروسة[67]	المغرب[68] تونس[69] جنوب أفريقيا[70] كينيا[71] السنغال[72] مصر[73] نيجيريا[74]
برك استقرار المياه العادمة Wastewater stabilization ponds	+++ ([12.75])	+ ([76.77])	+++ ([12.78])	++ ([12.79])	لا	مرتع خصب للبعوض خصوصاً في فصل الصيف[75]	المغرب[80] الجزائر[81] تونس[82] جنوب أفريقيا[76] كينيا[83] بوركينا فاسو[84] أوغندا[85]
المرشحات المتداخلة (Multi soil layering)	+ (86.87)	+++ (49.88)	+ (35.59)	+ (23.89)	نعم[15]	لا يظهر من النظام إلى طبقته العلوية من الأحجار النفاذة[15]	المغرب[20، 24، 54]

(+++ قوية/ كبيرة؛ ++ متوسطة؛ + ضعيفة إلى منعدمة)

يُعدّ نظام المرشحات المتداخلة نظاماً جديداً مكّن من استغلال قدرات التربة المتقدمة لتطهير كميات كبيرة من المياه العادمة ومعالجة ملوثاتها المضرة بالبيئة والإنسان، مع إمكانية إعادة استخدام المياه المعالجة في الموقع. كما يتميز بعدم انبعاث روائح كريهة منه نظراً إلى تصميمه وحاجته إلى مساحة صغيرة لإنشائه وسهولة اندماجه في البيئة المحيطة به.[15، 17، 24] وتكمن أهمية هذا النظام في كونه يعتمد على مواد صديقة للبيئة يمكن إيجادها بسهولة، وإن تعذّر ذلك فيمكن استبدال بعض المواد بأخرى محلية من دون الإخلال بأداء النظام.[38] وتجدر الإشارة إلى تميز النظام بإمكانية تطبيقه كنظام للتطهير الفردي والجماعي. وقد جرى إدخال هذه التقنية البيئية البديلة في دولة المغرب؛ حيث بُني اعتماداً على مواد محلية، وجرت تجربته تحت الظروف المناخية شبه القاحلة ليثبت كفاءته من خلال النتائج الواعدة المتحصل عليها.[20، 22، 24، 54] كل هذه المميزات تجعل من نظام المرشحات المتداخلة تقنية مستدامة منخفضة التكلفة والتسيير، وحلاً مستقبلياً بديلاً لمعالجة المياه العادمة في المناطق القروية والمتفرقة، خصوصاً في الدول النامية كدول القارة الأفريقية ذات الموارد المائية والمالية المحدودة.

10-خاتمة

يحتاج الوعي البيئي بمخاطر التلوث وشحّ الموارد المائية إلى تنزيل سياسات مستدامة مرنة تتماشى مع ظروف مختلف الدول؛ إذ لا يجب استثناء الدول النامية ذات الميزانيات المحدودة والظروف المناخية القاسية من فرص حماية مواردها، ولا يتأتى ذلك إلا بتبنّي أنظمة فعالة ومنخفضة التكلفة في الوقت ذاته. ويمثل نظام المرشحات المتداخلة فرصة لهذه الدول لتخفيف الضغط على مواردها المائية ومعالجة مياهها العادمة لإعادة استخدامها في الموقع لأغراض زراعية؛ لتغذية الفرشة المائية وغيرها، حيث تتميز هذه التقنية البيئية الصاعدة باستخدامها لمواد صديقة للبيئية متوافرة محلياً وقابلة لإعادة التدوير بعد انتهاء عمرها الافتراضي، ثم لحاجاتها المنخفضة إلى الطاقة، والإصلاحات، والمساحة، ثم انخفاض تكلفة الإنشاء والاستغلال؛ ما يخفض من بصمتها الكربونية ويجعلها تقنية مستقبلية واعدة لمعالجة المياه العادمة اللامركزية عبر العالم. ومقارنةً بعدة أنظمة مستخدمة في الدول الأفريقية، يبقى نظام المرشحات المتداخلة منافساً قوياً وأكثر تناسباً مع ظروف دول هذه القارة.

المراجع

1. Kusangaya S, Warburton ML, Van Garderen EA, Jewitt GP. Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2014;67–69:47–54. https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.014
2. König M, Escher BI, Neale PA, Krauss M, Hilscherová K, Novák J, et al. Impact of untreated wastewater on a major European river evaluated with a combination of in vitro bioassays and chemical analysis. Environmental Pollution. 2017;220:1220–1230. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.011
3. Hassen W, Alibi S, Mansour HB. Assessment of the physico-chemical and microbial pollution of wastewater and seawater collected from five Mediterranean countries. Arabian Journal of Scientific Research. 2021;2021(1):1–10. https://doi.org/10.5339/ajsr.2021.6
4. Le C, Zha Y, Li Y, Sun D, Lu H, Yin B. Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control. Environmental Management. 2010;45(4):662–668. https://doi.org/10.1007/s00267-010-9440-3
5. Fuhrimann S, Winkler MS, Stalder M, Niwagaba CB, Babu M, Kabatereine NB, et al. Disease burden due to gastrointestinal pathogens in a wastewater system in Kampala, Uganda. Microbial Risk Analysis. 2016;4:16–28. https://doi.org/10.1016/j.mran.2016.11.003
6. Gharaibeh MA, Ghezzehei TA, Albalasmeh AA, Alghzawi MZ. Alteration of physical and chemical characteristics of clayey soils by irrigation with treated waste water. Geoderma. 2016;276:33–40. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.011
7. Hospido A, Moreira MT, Fernández-Couto M, Feijoo G. Environmental performance of a municipal wastewater treatment plant. International Journal of Life Cycle Assessment. 2004;9(4):261–271. https://doi.org/10.1007/BF02978602
8. Arola K, Van der Bruggen B, Mänttäri M, Kallioinen M. Treatment options for nanofiltration and reverse osmosis concentrates from municipal wastewater treatment: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2019;49(22):2049–2116. https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1594519
9. Zhang QH, Yang WN, Ngo HH, Guo WS, Jin PK, Dzakpasu M, et al. Current status of urban wastewater treatment plants in China. Environment International. 2016;92:11–22
10. Withers PJ, Jordan P, May L, Jarvie HP, Deal NE. Do septic tank systems pose a hidden threat to water quality? Frontiers in Ecology and the Environment. 2014;12(2):123–130
11. Zhang NS, Liu YS, Van den Brink PJ, Price OR, Ying GG. Ecological risks of home and personal care products in the riverine environment of a rural region in South China without domestic wastewater treatment facilities. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2015;122:417–425. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.03.024
12. Singh NK, Kazmi AA, Starkl M. A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: Techno-economical approach. Water Science and Technology. 2015;71(4):468–478. https://doi.org/10.2166/wst.2014.413
13. Abou-Elela SI, Hellal MS, Aly OH, Abo-Elenin SA. Decentralized wastewater treatment using passively aerated biological filter. Environmental Technology. 2019;40(2):250–260. https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1385648
14. Zhang Z, Lei Z, Zhang Z, Sugiura N, Xu X, Yin D. Organics removal of combined wastewater through shallow soil infiltration treatment: A field and laboratory study. Journal of Hazardous Materials. 2007;149(3):657–665. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.026
15. Wakatsuki T, Esumi H, Omura S. High performance and N & P-removable on-site domestic waste water treatment system by multi-soil-layering method. Water Science and Technology. 1993;27(1):31–40. https://doi.org/10.2166/wst.1993.0010
16. Masunaga T, Sato K, Mori J, Shirahama M, Kudo H, Wakatsuki T. Characteristics of wastewater treatment using a multi-soil-layering system in relation to wastewater contamination levels and hydraulic loading rates. Soil Science and Plant Nutrition. 2007;53(2):215–223. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00128.x
17. Chen X, Luo AC, Sato K, Wakatsuki T, Masunaga T. An introduction of a multi-soil-layering system: A novel green technology for wastewater treatment in rural areas. Water and Environment Journal. 2009;23(4):255–262. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2008.00143.x
18. Luanmanee S, Attanandana T, Masunaga T, Wakatsuki T. The efficiency of a multi-soil-layering system on domestic wastewater treatment during the ninth and tenth years of operation. Ecological Engineering. 2001;18(2):185–199. https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00077-5
19. Attanandana T, Saitthiti B, Thongpae S, Kritapirom S, Luanmanee S, Wakatsuki T. Multi-media-layering system for food service wastewater treatment. Ecological Engineering. 2000;15(1–2):133–138. https://doi.org/10.1016/S0925-8574(99)00041-5
20. Ait-hmane A, Ouazzani N, Latrach L, Hejjaj A, Assabbane A, Belkouadssi M, et al. Feasibility of olive mill wastewater treatment by multi-soil-layering ecotechnology. Journal of Materials and Environmental Science. 2018;9(4):1223–1233. https://doi.org/10.26872/jmes.2017.9.4.134
21. Chen X, Sato K, Wakatsuki T, Masunaga T. Effect of aeration and material composition in soil mixture block on the removal of colored substances and chemical oxygen demand in livestock wastewater using multi-soil-layering systems. Soil Science and Plant Nutrition. 2007;53(4):509–516. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00156.x
22. Latrach L, Masunaga T, Ouazzani N, Hejjaj A, Mahi M, Mandi L. Removal of bacterial indicators and pathogens from domestic wastewater by the multi-soil-layering (MSL) system. Soil Science and Plant Nutrition. 2015;61(2):337–346. https://doi.org/10.1080/00380768.2014.974480
23. Pattnaik R, Yost RS, Porter G, Masunaga T, Attanandana T. Removing the N and P in dairy effluent using multi-soil-layer (MSL) systems. Applied Engineering in Agriculture. 2008;24(4):431–437. https://doi.org/10.13031/2013.25143
24. Latrach L, Ouazzani N, Masunaga T, Hejjaj A, Bouhoum K, Mahi M, et al. Domestic wastewater disinfection by combined

treatment using multi-soil-layering system and sand filters (MSL–SF): A laboratory pilot study. Ecological Engineering. 2016;91:294–301. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.036
25. Masih I, Maskey S, Mussá FEF, Trambauer P. A review of droughts on the African continent: A geospatial and long-term perspective. Hydrology and Earth System Sciences. 2014;18(9):3635–3649. https://doi.org/10.5194/hess-18-3635-2014
26. Olagunju A, Thondhlana G, Chilima JS, Sène-Harper A, Compaoré WRN, Ohiozebau E. Water governance research in Africa: Progress, challenges and an agenda for research and action. Water International. 2019;44(4):382–407. https://doi.org/10.1080/02508060.2019.1594576
27. Sato K, Masunaga T, Wakatsuki T. Characterization of treatment processes and mechanisms of COD, phosphorus and nitrogen removal in a multi-soil-layering system. Soil Science and Plant Nutrition. 2005;51(2):213–221. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00025.x
28. Tzanakakis VE, Paranychianaki NV, Angelakis AN. Soil as a wastewater treatment system: Historical development. Water Science and Technology: Water Supply. 2007;7(1):67–75. https://doi.org/10.2166/ws.2007.008
29. Capodaglio AG, Callegari A, Cecconet D, Molognoni D. Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. Water Practice and Technology. 2017;12(2):463–477. https://doi.org/10.2166/wpt.2017.055
30. Perkins RJ. Onsite wastewater disposal. Michigan: Lewis Publishers; 1989.
31. Song P, Huang G, An C, Zhang P, Chen X, Ren S. Performance analysis and life cycle greenhouse gas emission assessment of an integrated gravitational-flow wastewater treatment system for rural areas. Environmental Science and Pollution Research. 2019;26(25):25883–25897. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05746-2
32. Yidong G, Xin C, Shuai Z, Ancheng L. Performance of multi-soil-layering system (MSL) treating leachate from rural unsanitary landfills. Science of the Total Environment. 2012;420:183–190. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.057
33. Sato K, Iwashima N, Wakatsuki T, Masunaga T. Quantitative evaluation of treatment processes and mechanisms of organic matter, phosphorus, and nitrogen removal in a multi-soil-layering system. Soil Science and Plant Nutrition. 2011;57(3):475–486. https://doi.org/10.1080/00380768.2011.590944
34. Masunaga T, Sato K, Zennami T, Fujii S, Wakatsuki T. Direct treatment of polluted river water by the multi-soil-layering method. Journal of Water and Environment Technology. 2003;1(1):97–104. https://doi.org/10.2965/jwet.2003.97
35. Guan Y, Zhang Y, Zhong CN, Huang XF, Fu J, Zhao D. Effect of operating factors on the contaminants removal of a soil filter: Multi-soil-layering system. Environmental Earth Sciences. 2015;74(3):2679–2686. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4288-8
36. Sato K, Masunaga T, Wakatsuki T. Water movement characteristics in a multi-soil-layering system. Soil Science and Plant Nutrition. 2005;51(1):75–82. https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00009.x
37. Sato K, Iwashima N, Wakatsuki T, Masunaga T. Clarification of water movement properties in a multi-soil-layering system. Soil Science and Plant Nutrition. 2011;57(4):607–618. https://doi.org/10.1080/00380768.2011.594966
38. Luanmanee S, Boonsook P, Attanandana T, Wakatsuki T. Effect of organic components and aeration regimes on the efficiency of a multi-soil-layering system for domestic wastewater treatment. Soil Science and Plant Nutrition. 2002;48(2):125–134. https://doi.org/10.1080/00380768.2002.10409182
39. Ho CC, Wang PH. Efficiency of a multi-soil-layering system on wastewater treatment using environment-friendly filter materials. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2015;12(3):3362–3380. https://doi.org/10.3390/ijerph120303362
40. Katsoyiannis A, Samara C. The fate of dissolved organic carbon (DOC) in the wastewater treatment process and its importance in the removal of wastewater contaminants. Environmental Science and Pollution Research – International. 2007;14(5):284–292. https://doi.org/10.1065/espr2006.05.302
41. López-Pacheco IY, Silva-Núñez A, Salinas-Salazar C, Arévalo-Gallegos A, Lizarazo-Holguin LA, Barceló D, et al. Anthropogenic contaminants of high concern: Existence in water resources and their adverse effects. Science of the Total Environment. 2019;690:1068–1088. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.052
42. He W, Bai Z, Li Y, Kong X, Liu W, Yang C, et al. Advances in environmental behaviors and effects of dissolved organic matter in aquatic ecosystems. Science China Earth Sciences. 2016;59(4):746–759. https://doi.org/10.1007/s11430-015-5248-6
43. Kube M, Jefferson B, Fan L, Roddick F. The impact of wastewater characteristics, algal species selection and immobilisation on simultaneous nitrogen and phosphorus removal. Algal Research. 2018;31:478–488. https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.01.009
44. Dinnes DL, Karlen DL, Jaynes DB, Kaspar TC, Hatfield JL, Colvin TS, et al. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. Agronomy Journal. 2002;94(1):153–171. https://doi.org/10.2134/agronj2002.1530
45. Ahmed W, Angel N, Edson J, Bibby K, Bivins A, O'Brien JW, et al. First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewater in Australia: A proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community. Science of the Total Environment. 2020;728:138764. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138764
46. Farkas K, Hillary LS, Malham SK, McDonald JE, Jones DL. Wastewater and public health: The potential of wastewater surveillance for monitoring COVID-19. Current Opinion in Environmental Science & Health. 2020;17:14–20. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.06.001
47. Norman G, Pedley S, Takkouche B. Effects of sewerage on diarrhoea and enteric infections: A systematic review and meta-analysis. Lancet Infectious Diseases. 2010;10(8):536–544. https://doi.org/10.1016/S1473-3099(10)70123-7
48. Auriol M, Filali-Meknassi Y, Adams CD, Tyagi RD, Noguerol TN, Piña B. Removal of estrogenic activity of natural and synthetic hormones from a municipal wastewater: Efficiency

of horseradish peroxidase and laccase from *Trametes versicolor*. Chemosphere. 2008;70(3):445–452. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.06.064

49. Song P, Huang G, An C, Xin X, Zhang P, Chen X, et al. Exploring the decentralized treatment of sulfamethoxazole-contained poultry wastewater through vertical-flow multi-soil-layering systems in rural communities. Water Research. 2021;188:116480. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116480
50. Boonsook P, Luanmanee S, Attanandana T, Kamidouzono A, Masunaga T, Wakatsuki T. A comparative study of permeable layer materials and aeration regime on efficiency of multi-soil-layering system for domestic wastewater treatment in Thailand. Soil Science and Plant Nutrition. 2003;49(6):873–82. https://doi.org/10.1080/00380768.2003.10410350
51. Hong Y, Huang G, An C, Song P, Xin X, Chen X, et al. Enhanced nitrogen removal in the treatment of rural domestic sewage using vertical-flow multi-soil-layering systems: Experimental and modeling insights. Journal of Environmental Management. 2019;240:273–284. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.097
52. Zhang Y, Cheng Y, Yang C, Luo W, Zeng G, Lu L. Performance of system consisting of vertical flow trickling filter and horizontal flow multi-soil-layering reactor for treatment of rural wastewater. Bioresource Technology. 2015;193:424–432. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.140
53. Kadam AM, Oza GH, Nemade PD, Shankar HS. Pathogen removal from municipal wastewater in constructed soil filter. Ecological Engineering. 2008;33(1):37–44. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.12.001
54. Latrach L, Ouazzani N, Hejjaj A, Mahi M, Masunaga T, Mandi L. Two-stage vertical flow multi-soil-layering (MSL) technology for efficient removal of coliforms and human pathogens from domestic wastewater in rural areas under arid climate. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2018;221(1):64–80. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.10.004
55. Luo W, Yang C, He H, Zeng G, Yan S, Cheng Y. Novel two-stage vertical flow biofilter system for efficient treatment of decentralized domestic wastewater. Ecological Engineering. 2014;64:415–423. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.01.011
56. Sofyan S, Sy S, Ardinal A. Combination of anaerobic filter system and multi soil layering (MSL) as an alternative for liquid waste treatment in small and medium food industry (in Malaysian). Indonesian Journal of Engineering Research. 2009;3(2):72227.
57. Campana PE, Mainardis M, Moretti A, Cottes M. 100% renewable wastewater treatment plants: Techno-economic assessment using a modelling and optimization approach. Energy Conversion and Management. 2021;239:114214. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114214
58. Zhang Y, Rottiers T, Meesschaert B, Pinoy L, Van der Bruggen B. Wastewater treatment by renewable energy driven membrane processes. In: Basile A, Cassano A, Figoli A, editors. Current trends and future developments on (bio-) membranes [Internet]. Elsevier; 2019 [cited 2021 Aug 21]. pp. 1–19. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813545-7.00001-5
59. Koottatep T, Pussayanavin T, Polprasert C. Nouveau design solar septic tank: Reinvented toilet technology for sanitation 4.0. Environmental Technology & Innovation. 2020;19:100933. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100933
60. Rousseau DP, Vanrolleghem PA, De Pauw N. Constructed wetlands in Flanders: A performance analysis. Ecological Engineering. 2004;23(3):151–163. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.08.001
61. Puigagut J, Villaseñor J, Salas JJ, Bécares E, García J. Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: A comparative study. Ecological Engineering. 2007;30(4):312–319. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.04.005
62. Sato K, Wakatsuki T, Iwashima N, Masunaga T. Evaluation of long-term wastewater treatment performances in multi-soil-layering systems in small rural communities. Applied and Environmental Soil Science. 2019;2019:e1214368. https://doi.org/10.1155/2019/1214368
63. Ingrao C, Failla S, Arcidiacono C. A comprehensive review of environmental and operational issues of constructed wetland systems. Current Opinion in Environmental Science & Health. 2020;13:35–45. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.10.007
64. Harrington R, McInnes R. Integrated constructed wetlands (ICW) for livestock wastewater management. Bioresource Technology. 2009;100(22):5498–5505. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.007
65. Nogueira R, Brito AG, Machado AP, Janknecht P, Salas JJ, Vera L, et al. Economic and environmental assessment of small and decentralized wastewater treatment systems. Desalination and Water Treatment. 2009;4(1–3):16–21. https://doi.org/10.5004/dwt.2009.349
66. Schäfer ML, Lundström JO, Pfeffer M, Lundkvist E, Landin J. Biological diversity versus risk for mosquito nuisance and disease transmission in constructed wetlands in southern Sweden. Medical and Veterinary Entomology. 2004;18(3):256–267. https://doi.org/10.1111/j.0269-283X.2004.00504.x
67. Yang Z, Wang Q, Zhang J, Xie H, Feng S. Effect of plant harvesting on the performance of constructed wetlands during summer. Water. 2016;8(1):24. https://doi.org/10.3390/w8010024
68. El Hamouri B, Nazih J, Lahjouj J. Subsurface-horizontal flow constructed wetland for sewage treatment under Moroccan climate conditions. Desalination. 2007;215(1–3):153–158. https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.11.018
69. Houda N, Hanene C, Ines M, Myriam BS, Imen D, Abdennaceur H. Isolation and characterization of microbial communities from a constructed wetlands system: A case study in Tunisia. African Journal of Microbiology Research. 2014;8(6):529–538. https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6493
70. Schulz R, Hahn C, Bennett ER, Dabrowski JM, Thiere G, Peall SKC. Fate and effects of azinphos-methyl in a flow-through wetland in South Africa. Environmental Science & Technology. 2003;37(10):2139–2144. https://doi.org/10.1021/es026029f
71. Kilingo FM, Bernard Z, Hongbin C. Study of domestic wastewater treatment using *Moringa oleifera* coagulant coupled with vertical flow constructed wetland in Kibera Slum, Kenya. Environmental Science and Pollution Research. 2022;29:36589–36607. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18692-3

72. Torrens A, de la Varga D, Ndiaye AK, Folch M, Coly A. Innovative multistage constructed wetland for municipal wastewater treatment and reuse for agriculture in Senegal. Water. 2020;12(11):3139. https://doi.org/10.3390/w12113139
73. Abdel-Shafy HI, El-Khateeb MA, Regelsberger M, El-Sheikh R, Shehata M. Integrated system for the treatment of blackwater and greywater via UASB and constructed wetland in Egypt. Desalination and Water Treatment. 2009;8(1–3):272–278. https://doi.org/10.5004/dwt.2009.788
74. Mustapha HI, van Bruggen JJA, Lens PNL. Vertical subsurface flow constructed wetlands for polishing secondary Kaduna refinery wastewater in Nigeria. Ecological Engineering. 2015;84:588–595. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.060
75. Porges R, Mackenthun KM. Waste stabilization ponds: Use, function, and biota. Biotechnology and Bioengineering. 1963;5(4):255–273. https://doi.org/10.1002/bit.260050403
76. Edokpayi JN, Odiyo JO, Popoola OE, Msagati TAM. Evaluation of contaminants removal by waste stabilization ponds: A case study of Siloam WSPs in Vhembe District, South Africa. Heliyon. 2021;7(2):e06207. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06207
77. Edokpayi JN, Odiyo JO, Msagati TAM, Potgieter N. Temporal variations in physico-chemical and microbiological characteristics of Mvudi River, South Africa. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2015;12(4):4128–4140. https://doi.org/10.3390/ijerph120404128
78. Vuillot M, Boutin C. Waste stabilization ponds in Europe: A state of the art review. Water Science and Technology. 1987;19(12):1–6. https://doi.org/10.2166/wst.1987.0119
79. Lloyd BJ, Leitner AR, Vorkas CA, Guganesharajah RK. Under-performance evaluation and rehabilitation strategy for waste stabilization ponds in Mexico. Water Science and Technology. 2003;48(2):35–43. https://doi.org/10.2166/wst.2003.0080
80. Achag B, Mouhanni H, Bendou A. Hydro-biological characterization and efficiency of natural waste stabilization ponds in a desert climate (city of Assa, Southern Morocco). Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua. 2021;70(3):361–374. https://doi.org/10.2166/aqua.2021.125
81. Hammadi B, Bebba AA, Gherraf N. Degradation of organic pollution aerated lagoons. In an arid climate: The case the treatment plant Ouargla (Algeria). Acta Ecologica Sinica. 2016;36(4):275–279. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.05.002
82. Jarboui R, Sellami F, Azri C, Gharsallah N, Ammar E. Olive mill wastewater evaporation management using PCA method: Case study of natural degradation in stabilization ponds (Sfax, Tunisia). Journal of Hazardous Materials. 2010;176(1–3):992–1005. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.140
83. K'oreje KO, Kandie FJ, Vergeynst L, Abira MA, Van Langenhove H, Okoth M, et al. Occurrence, fate and removal of pharmaceuticals, personal care products and pesticides in wastewater stabilization ponds and receiving rivers in the Nzoia Basin, Kenya. Science of the Total Environment. 2018;637:336–348. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.331
84. Konaté Y, Maiga AH, Basset D, Casellas C, Picot B. Parasite removal by waste stabilisation pond in Burkina Faso, accumulation and inactivation in sludge. Ecological Engineering. 2013;50:101–106. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.021
85. Babu MA, van der Steen NP, Hooijmans CM, Gijzen HJ. Nitrogen mass balances for pilot-scale biofilm stabilization ponds under tropical conditions. Bioresource Technology. 2011;102(4):3754–3760. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.003
86. An CJ, McBean E, Huang GH, Yao Y, Zhang P, Chen XJ, et al. Multi-soil-layering systems for wastewater treatment in small and remote communities. Journal of Environmental Informatics. 2016;27(2):131–144.
87. Supriyadi, Widijanto H, Pranoto, Dewi AK. Improving quality of textile wastewater with organic materials as multi soil layering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016;107:012016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/107/1/012016
88. Sy S, Sofyan, Ardinal, Kasman M. Reduction of pollutant parameters in textile dyeing wastewater by Gambier (*Uncaria gambir* Roxb) using the multi soil layering (MSL) bioreactor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;546(2):022032. https://doi.org/10.1088/1757-899X/546/2/022032
89. Song P, Huang G, An C, Shen J, Zhang P, Chen X, et al. Treatment of rural domestic wastewater using multi-soil-layering systems: Performance evaluation, factorial analysis and numerical modeling. Science of the Total Environment. 2018;644:536–546. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.331