Vol.4, No.8, Page 2302- 2323, 2026 https://doi.org/ 10.59628/jast.v4i8.3400 ISSN 2958-9568 JAST

مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

The Effect of Blending Graywater and Treated Wastewater with Groundwater on Calcareous Soil and Sorghum Forage Productivity: A Study in Environmental Sustainability

Ali Mohammed Abdulrahman Al-Mosawa

Department of Soil, Water, and Environment, Faculty of Agriculture, Food and Environment, Sana'a University, Sana'a, Yemen.

***Corresponding author**: a.almasawaa@su.edu.ye

ARTICLE INFO

Article history: 22- June-2026
Received: 06- July -2026
Accepted: 20- July-2026
Published: 28 August 2026

KEYWORDS

1. Greywater
2. Partially Treated Wastewater
3. Soil Properties
4. Water Blending
5. Calcareous Soil
6. Sorghum Forage

ABSTRACT

This experiment was conducted in 2022 in a greenhouse at the Faculty of Agriculture, Sana'a University, during the sorghum growing season. The experimental period extended from June 1st to July 22nd, totaling 52 days, to evaluate the effect of irrigating forage sorghum in calcareous silt loam soil with different levels of greywater (GW) and partially treated wastewater (PTWW) blended with groundwater. The blending ratios refer to the volumetric proportions used for blending groundwater with non-conventional water, which included five levels (4:0, 3:1, 1:1, 1:3, and 0:4). The results showed that unblended PTWW (4:0) raised soil salinity (ECe) to 1.36 dS/m compared to 0.24 dS/m before the experiment and increased available copper concentration to 17.00 mg/L. In contrast, the 1:3 (groundwater: PTWW) blending ratio achieved the highest fresh weight of the crop, reaching 18.67 g/pot, representing a 17.3% increase over the unblended treatment. Furthermore, the 1:1 blending ratio for both PTWW and greywater yielded the highest dry weights of 5.05 and 4.68 g/pot, respectively, confirming the role of quantitative blending ratios in improving productivity and mitigating soil degradation.

Vol.4, No.8, Page 2302- 2323, 2026 https://doi.org/ 10.59628/jast.v4i8.3400 ISSN 2958-9568 JAST

مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

تأثير مزج المياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة مع المياه الجوفية على التربة الكلسية وإنتاجية علف الذرة الرفيعة: دراسة في الاستدامة البيئية

علي محمد عبدالرحمن المساوى

قسم الأراضي والمياه والبيئة ، كلية الزراعة والأغذية والبيئة ، جامعة صنعاء، صنعاء، اليمن.

المؤلف a.almasawaa@su.edu.ye

معلومات المقالة

تاريخ المقالة: 22-يونيو-2026

تاريخ التقديم: 06-يوليو -2026

تاريخ القبول: 20- يوليو -2026

تاريخ النشر: 28-أغسطس-2026

الكلمات المفتاحية

1. المياه الرمادية
2. مياه المجاري المعالجة جزئياً
3. خواص التربة
4. مزج المياه
5. التربة الكلسية
6. علف الذرة الرفيعة

الملخص:

أُجريت هذه التجربة عام 2022م في بيت زجاجي بكلية الزراعة – جامعة صنعاء خلال الموسم الزراعي للذرة، حيث امتدت الفترة الزمنية للتجربة من الأول من يونيو وحتى الثاني والعشرين من يوليو بواقع 52 يوماً لتقييم تأثير ري الذرة الرفيعة في تربة كلسية طميية بمستويات مختلفة من المياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة جزئياً/أولية الممزوجة بالمياه الجوفية .ويُقصد بنسب المزج: النسب الحجمية المعتمدة للمزج بين المياه الجوفية والمياه الرمادية والمجاري المعالجة، والتي شملت خمسة مستويات(4:0، 3:1، 1:1، 1:3، 0:4) . أظهرت النتائج أن مياه المجاري غير الممزوجة (4:0) رفعت ملوحة التربة (ECe) إلى 1.36 ديسيسيمنز/متر مقارنة بـ 0.24 ديسيسيمنز/متر قبل التجربة، وزادت تركيز النحاس الميسر إلى 17.00 ملغم/لتر .في المقابل، حققت نسبة المزج 1:3 (جوفية: مجاري) أعلى وزن طازج للمحصول بلغ 18.67 جم/أصيص بزيادة قدرها 17.3% عن المعاملة غير الممزوجة .كما حققت نسبة المزج 1:1 لكل من مياه المجاري والمياه الرمادية أعلى وزن جاف للعلف بلغ 5.05 و 4.68 جم/أصيص على التوالي، مما يثبت دور نسب المزج الكمية في تحسين الإنتاجية والحد من تدهور التربة.

1.المقدمة:

يتزايد الضغط على موارد المياه العذبة عالمياً بسبب النمو السكاني والتغيرات المناخية، مما يستدعي تطوير حلول مبتكرة مثل إعادة استخدام المياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة في الزراعة [1]. تُصنف مياه المنشآت المدنية إلى ثلاثة أنواع: المياه الجوفية (البيضاء) الصالحة للشرب، والمياه الرمادية الناتجة عن الاستخدام اليومي (غسيل، استحمام، ومياه الوضوء) باستثناء المراحيض، ومياه المجاري (السوداء) التي تشمل الفضلات البشرية [2]. تحتوي المياه الرمادية على عناصر غذائية (نيتروجين، فوسفور) وكيماويات (كلور، صوديوم، كالسيوم)، لكن استخدامها قد يؤثر سلباً في النباتات بسبب الملوثات[3،4،5،6]. تعاني اليمن من أدنى معدلات توفر المياه عالمياً، حيث بلغت حصة الفرد 74 م^3 عام 2018م [7]، مما دفع المزارعين لاستخدام المياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة جزئياً في ري محاصيل الأعلاف، ومنها الذرة الرفيعة (Sorghum vulgar)والتي تشكل ما نسبته 60.3% من محاصيل الحبوب في اليمن وتعد العلف الرئيسي للحيوانات [8،9]. أظهرت دراسات سابقة فوائد لاستخدام المياه المعالجة في توفير المغذيات ودعم الإنتاج [10،11،12،13]، كما أوصت منظمة الفاو ومنظمة الصحة العالمية بمزج المياه الرديئة مع المياه الجيدة للتخفيف من آثارها السلبية [14]. وقد طبقت هذه التوصية في تجارب ليبية [15] ويمنية [16] بنتائج إيجابية على نمو المحاصيل.

2. الفجوة البحثية Research gap: رغم هذه التوصيات، لا تزال هناك حاجة لتقييم كمية ونوعية تأثير مزج المياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة جزئياً مع المياه الجوفية، خاصة على التربة الكلسية (Calcareous Soils) السائدة في اليمن، وتأثير ذلك على إنتاجية علف الذرة الرفيعة. كما أن الدراسات السابقة لم تحدد النسب المثلى للمزج التي تحقق التوازن بين توفير المغذيات وتجنب تراكم الأملاح والعناصر الثقيلة في التربة، وهو ما يركز عليه هذا البحث.

3. منهجية البحث Research Methodology:

يتناول البحث دراسة في الاستدامة البيئية الناجمة عن تأثير المياه الرمادية على التربة وصفاتها الكيميائية، وعلى نمو علف الذرة الرفيعة عند استخدامها بالمقارنة مع مياه الصرف الصحي المعالجة والمياه الجوفية. يُسلط الضوء على الفائدة المحتملة للمياه الرمادية بسبب احتوائها على المغذيات مثل النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم، مع التأكيد على أهمية مزجها بنسب محددة مع المياه الجوفية لتفادي التلوث بالعناصر السامة والثقيلة. يُسهم هذا النهج في ترشيد استهلاك المياه العذبة واستغلال مياه أخرى في الزراعة مما يسهم في استدامة المياه وتحقيق هدف من أهداف التنمية المستدامة وهذا هو التوجه العالمي في مجال الابحاث الزراعية، كما أوضح باحثون في عدة دول مثل [2,3,12,14].

4. أهداف البحث The aims of research:

الهدف الرئيس: تقييم تأثير استخدام المياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة في الري عند مزجهما مع المياه الجوفية بمستويات مختلفة، وتأثير ري

التربة على الوزن الطازج والجاف لمحصول علف الذرة الرفيعة.

الأهداف الفرعية:

1. معرفة إمكانية تجنب تدهور خواص التربة الكلسية وتركيز بعض العناصر الذائبة (Na, Mg and Ca) في محلول التربة بعد التجربة عند الري بالمياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة مقارنة بالمياه الجوفية.
2. دراسة إمكانية استغلال المياه الرمادية المستعملة بالوضوء في المساجد لتلبية احتياجات الري الزراعي في الظروف اليمنية من أجل الاستدامة البيئية.
3. معرفة التأثيرات الناجمة عن استخدام المياه الرمادية والمجاري المعالجة قبل وبعد مزجها مع المياه الجوفية على خصائص التربة الكلسية والعناصر الثقيلة الميسرة للنبات (Zn, Mn, Cu, and Fe) فيها.

5. مواد وطرائق البحث Materials and methods

تمت دراسة تأثير استخدام المياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة عند مزجهما بنسب مختلفة مع مياه جوفية النقية على خصائص التربة الكلسية وتركيز العناصر الذائبة (Na, Mg, Ca)، بالإضافة إلى قياس محتوى التربة من الكاتيونات والانيونات وعناصر ثقيلة (Zn, Mn, Cu, Fe) وتأثيرها على وزن نبات الذرة الرفيعة في ظروف صنعاء البيئية. تضمنت التجربة 10 معاملات بثلاثة مكررات في البيت الزجاجي بكلية الزراعة – جامعة صنعاء كما يلي: (أ) معدل 4 مياه جوفية: 0 مياه مجاري وهي المعاملة الشاهد (ب) 3 مياه جوفية : 1 مياه مجاري (ج) 1 مياه جوفية:1 مياه مجاري (د) 1 مياه جوفية:3 مياه المجاري (هـ) 0 مياه جوفية : 4 مياه المجاري (و) 4 مياه جوفية : 0 مياه رمادية (ز) 3 مياه جوفية : 1 مياه رمادية (ل) 1 مياه جوفية : 1 مياه رمادية (م) 1 مياه جوفية : 3 مياه رمادية (ن) 0 مياه جوفية : 4 مياه رمادية. نفذت التجربة عام 2022م خلال الموسم الزراعي للذرة حيث امتدت الفترة الزمنية للتجربة من الأول من يونيو وحتى الثاني والعشرين من يوليو بواقع 52 يوماً من الزراعة: وقد تم اختيار هذه الفترة تحديداً لتغطية مرحلة النمو الخضري الحرج لمحصول الذرة الرفيعة ، وتم تحديد موقع أخذ عينات التربة المدروسة حيث أخذت من حقل زراعة الأعلاف في كلية الزراعة/جامعة صنعاء في تجربة أصص باستخدام (30) أصيصاً بلاستيكياً (قطر 25=سم، ارتفاع كلي 19=سم)، مقسمة إلى (10) مجموعات بثلاثة مكررات. مُلئت بتربة نوع كلسية (Calcareous Soils) قوامها بحسب مثلث القوام "طميه" (silt loam) من طبقة سطحية (0-30 سم) من مزرعة كلية الزراعة جامعة صنعاء، وبكمية (5) كجم/أصيص . ورويت بمياه من محطة صنعاء لمعالجة مياه المجاري المعالجة (جزئياً/أولياً) وليس ثانوياً وليس ثلاثياً ومياه رمادية بعد مزج كل واحدة منها مع المياه الجوفية بمستويات مزج مختلفة، أما المياه الرمادية فقد تم أخذ 3 عينات من 3 مساجد متقاربة (جامع الذيبه وجامع بلال وجامع الحسين) ممثلة لأمانة العاصمة صنعاء في وقت الذروة (الظهر) ونقلها بسرعة إلى كلية الزراعة وحفظها في ثلاجة عند درجة حرارة 4-6 درجة مئوية وقبل الري

بنصف ساعة تم إخراجها وتعريضها للشمس ثم القيام بالري. تم تحديد كمية مياه الري بناءً على الاحتياجات المائية للنبات والتبخر – نتح المحسوب للفترة التجريبية حيث تم تزويد الوحدة التجريبية بمتوسط (300 مللي لتر يومياً) لكل أصيص ليصل كمية المياه المضافة للوحدة الواحدة خلال فترة التجربة إلى 15.6 لتراً.

جدول رقم (1): نتائج تحليل بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية للـتربة المستخدمـة في التجارب (قبل التجربة)

خواص التربة			القيمة
خواص التربة الفيزيائية:			
الرمل (%)			10
السلت (%)			69
الطين (%)			21
قوام التربة			طميه(silt loam)
الكثافة الظاهرية (جم/سم^3)			1.4
المسامية (%)			47.2
النسبة المئوية للتشبع (%)			32
السعة الحقلية (%)			16
الماء الميسر للنبات (%)			8
نقطة الذبول (%)			8
خواص التربة الكيميائية:			
النتروجين الكلي (%)	Total N		0.04
المادة العضوية (%)	O.M.		1.20
درجة التوصيل الكهربائى (1:1) (dS.m^{-1})	ECe		0.24
درجة التفاعل (1:1)	pH		8.40
كربونات الكالسيوم (%)	$CaCO_3$		7.50
الكاتيونات والأنيونات الذائبة (ملليمكافئ/لتر):			
الكالسيوم	Ca		1.50
الماغنسيوم	Mg		0.70
الصوديوم	Na		5.40
الكلوريد	Cl		0.75
الكربونات	CO_3		0.00
البيكربونات	HCO_3		1.50
الكبريتات	SO_4		0.30
نسبة الصوديوم الممتص	SAR		5.10
العناصر الغذائية الميسرة (ملغم/كجم)			
العناصر الكبرى			
الفسفور	P		4.70
البوتاسيوم	K		500
العناصر الصغرى			
الحديد	Fe		8.60
المنجنيز	Mn		6.00
الزنك	Zn		0.60
النحاس	Cu		1.00

تم جمع النباتات وتجفيفها عند 75 درجة مئوية لتحليل النتائج. أجريت التحاليل لمؤشرات وخواص التربة المدروسة قبل إجراء التجربة (جدول رقم 1) وبعد إجراء التجربة (الجدولين 4 و5) كالتالي:

1) تفاعل التربة (pH): حيث قيست في معلق مائي بنسبة (1:1) باستخدام جهاز pH – meter و ملوحة التربة (ECe): بقياس الناقلية الكهربائية لمستخلص مائي للتربة بنسبة(1:1) بالطرائق المشروحة في [17].
2) كربونات الكالسيوم (CaCO3 %): قدرت بطريقة المعادلة بالحامض وذلك بالطريقة التي ذكرها [17].
3) كاثيونات الصوديوم والكالسيوم والماغنسيوم الذائبة في مستخلص (5:1) بالطرق الواردة في [18] و [19].
4) المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS): تم تقدير إجمالي المواد الصلبة الذائبة تجريبياً من قيم التوصيلية الكهربائية (EC) باستخدام المعادلة القياسية TDS (mg/L)= ECe (dS/m))X640 والمعتمدة كمنهجية تقديرية شائعة في دراسات ري التربة الكلسية ومياه الصرف المعالجة (عبدالنبي ويوسف، 2019 [45]؛ المساوى والجرادي، 2025 [44])، ووفقاً للخطوط التوجيهية الدولية الحديثة لإدارة المياه ([FAO, 2023 [43]).من المعادلة المذكورة في المرجع [29] صفحة 15.
5) نسبة تشبع التربة بالقلويات (V %) مجموع الكاتيونات المتبادلة "تم تقدير السعة التبادلية الكاتيونية (CEC) مخبرياً [باستخدام طريقة أستات الأمونيوم]، ونظراً للطبيعة الكلسية القلوية للتربة وانعدام الحموضة التبادلية، فإن هذه القيم تعبر بدقة عن السعة التبادلية الكلية للموقع."
6) تم تقدير خطورة الصوديوم بمعرفة نسبة ادمصاص الصوديوم SAR والماغنسيوم طبقاً لطرق [20].
7) العناصر الثقيلة (الحديد، المنجنيز، النحاس والزنك) طبقاً لطريقة [21] وذلك بعد استخلاصها بواسطة DTPA على جهاز الامتصاص الذري Atomic Absorption Spectrophotometer.

أجريت تحاليل المياه المدروسة بمعامل ومختبرات قسم الأراضي والمياه والبيئة بالكلية في عينات المياه المدروسة للخواص والعناصر التالية (جدول 2) وبيانات الجدول (3) مأخوذة من تقرير تقييم مركز علوم وتكنولوجيا البيئة لمحطة صنعاء لمعالجة مياه المجاري قبل إجراء معالجتها جزئياً وبعد إجراء معالجتها [22] كما يلي:

1) درجة الحموضة أو القلوية pH ودرجة التوصيل الكهربائي ECw بالطرائق التي ذكرت في [23].
2) الكاتيونات و الأنيونات وتقدير الكلوريد بطريقة موهر بالطرق الواردة في [18] .

3) تم حساب خطورة الصوديوم بمعرفة نسبة ادمصاص الصوديوم SAR من معادلة [20].

4) الكربونات والبيكربونات حسب الطرق الموضحة في [18] و [24].

5) تقدير كمية عناصر الحديد والنحاس والمنجنيز والزنك طبقاً للطريقة المشروحة في [21].

6. التحليل الإحصائي Statistical analysis

نفذت التجربة بتصميم عشوائي، وحللت النتائج باستخدام برنامج (SPSS) الإصدار 29 وفق طريقة [25]. تم استخدام اختبار ANOVA لمعرفة الفروق الإحصائية عند مستويي 05.و 01.، وتمت مقارنة المتوسطات باستخدام (L.S.D.) واختبار دانكن (Duncan) [26]. قورنت المتوسطات بالأحرف الإنجليزية لتحديد الفروق المعنوية عند المستويين المذكورين، حيث قورنت المتوسطات باستخدام الأحرف الإنجليزية، حيث إن المعاملات ذات الأحرف المتشابهة لا توجد بينها فروق معنوية عند مستويين من المعنوية (عند 05. و 01.)

7. النتائج Results

7.1. تقييم صلاحية المياه المدروسة للري الزراعي و استدامة الموارد المائية:

7.1.1المياه الجوفية: تُظهر بيانات الجدول (2) أن تفاعل الماء الجوفي متعادل نسبياً (7.50)، وقيمة التوصيل الكهربائي (0.48 ديسيسيمنز/متر) تقع ضمن النطاق المسموح به للري وفقاً لمنظمة الفاو [27]. تركيزات الكاتيونات والانيونات منخفضة، والماء خالٍ من الكربونات. كانت نسبة الصوديوم المدمص (SAR) منخفضة (1.81)، مما يشير إلى عدم وجود خطر الصودية على التربة. كما أن خطر المغنيسيوم المحسوب حسب [28] كان ضئيلاً. تراكيز العناصر السامة (الحديد، النحاس، المنجنيز، الزنك) كانت أقل من حدود الكشف أو ضمن النطاقات الآمنة. تركيز البيكربونات (3.22 ملي مكافئ/لتر) كان ضمن الحدود المسموحة حسب المواصفات اليمنية [30،31]، لكنه قد يشكل خطراً طفيفاً في حالة الري بالرش فقط [27،29].

7.1.2. المياه الرمادية: تشير نتائج الجدول (2) إلى أن المياه الرمادية منخفضة الملوحة (0.75 ديسيسيمنز/متر) وتفاعلها شبه متعادل (8.25). تحتوي على كربونات قابلة للقياس (2.00 ملي مكافئ/لتر)، مما قد يزيد من قلوية التربة إذا استخدمت بدون مزج. تراكيز الصوديوم والمغنيسيوم كانت أعلى من المياه الجوفية، لكن مستويات الكلوريد (2.52 ملي مكافئ/لتر) بقيت ضمن النطاق المسموح به حسب المواصفات اليمنية [30]. التركيزات المرتفعة نسبياً للكاتيونات والانيونات تشير إلى قدرة المياه الرمادية على تزويد النبات بالعناصر الغذائية.

7.1.3. مياه المجاري المعالجة جزئياً: يتضح من الجدول (2) أن مياه المجاري المعالجة جزئياً قلوية التفاعل (8.22) ومتوسطة الملوحة (2.62 ديسيسيمنز/متر). محتواها من الكربونات مرتفع (2.44 ملي مكافئ/لتر)، وقيمة SAR (4.30) تشير إلى خطر سمية صوديوم محتمل، خاصة إذا استخدمت في الري بالرش [27،29،30].

تركيز النحاس (0.30 جزء/مليون) تجاوز الحد الأقصى المسموح به في مياه الري (0.20 جزء/مليون) حسب المواصفات اليمنية والفاو [27،30]، مما يشكل خطر تسمم شديد. تركيز الزنك (0.18 جزء/مليون) تجاوز المستوى الطبيعي (0.15 جزء/مليون) المذكور في [32]، مما يشير إلى خطر تراكم طويل الأجل. يبين الجدول (3) أن المياه الخارجة من محطة المعالجة لا تزال تحتوي على مستويات عالية من البكتريا المعوية الكلية، البكتريا القولونية، بيوض الديدان، BOD_5 (587 ملغم/لتر)، و COD (766 ملغم/لتر)، جميعها تتجاوز المعايير البيئية اليمنية [22].

7.2. تأثير الري بالمياه الرمادية والمجاري المعالجة على خصائص التربة الكلسية واستدامتها:

7.2.1. تفاعل التربة (pH): يظهر الجدول (4) انخفاضاً في تفاعل التربة بعد الري بجميع أنواع المياه مقارنة بقيمته قبل التجربة (8.40). سُجلت أقل قيمة لـ pH (7.8) عند الري بمياه المجاري الممزوجة بنسبة 3:1 (جوفية:مجاري). تراوحت قيم pH لمعاملات مياه المجاري بين 7.8 و 8.2، بينما تراوحت لمياه الرمادية بين 8.2 و 8.3.

7.2.2. ملوحة التربة (ECe) والمواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS): يُظهر الجدول (4) زيادة كبيرة في ملوحة التربة و TDS بعد الري بجميع أنواع المياه، وبخاصة بمياه المجاري غير الممزوجة. سُجلت أعلى قيمة ECe (1.36 ديسيسيمنز/متر) وأعلى TDS (870.4 جزء/مليون) لمعاملة المجاري 4:0، مقارنة بقيم ما قبل التجربة (0.24 ديسيسيمنز/متر و 153.6 جزء/مليون على التوالي). أدى المزج مع المياه الجوفية إلى خفض قيم ECe و TDS تدريجياً. فعلى سبيل المثال، خفض المزج بنسبة 1:3 (جوفية:مجاري) قيمة ECe إلى 0.51 ديسيسيمنز/متر.

7.2.3. نسبة تشبع التربة بالقواعد المتبادلة (V%): يبيّن الجدول (4) انخفاضاً في تشبع التربة بالقواعد بعد الري بمياه المجاري (77.5–82.0%) والمياه الرمادية (81.8–82.7%) مقارنة بقيمتها قبل التجربة (84.0%). أدى المزج مع المياه الجوفية إلى قيم تشبع أعلى قليلاً مقارنة بمعاملات المجاري غير الممزوجة.

7.2.4. نسبة كربونات الكالسيوم في التربة (%): أدى الري بنوعي المياه إلى زيادة محتوى التربة من كربونات الكالسيوم. سُجلت أعلى قيمة (14.13%) للمجاري غير الممزوجة، تلاها الرمادية غير الممزوجة (12.53%)، مقارنة بقبل التجربة (7.50%). أدى المزج إلى تقليل تراكم كربونات الكالسيوم؛ فمثلاً، أعطى المزج 1:1 للرمادية قيمة 11.29%.

7.2.5. نسبة ادمصاص الصوديوم (SAR): يُظهر الجدول (4) زيادة طفيفة في قيم SAR بعد الري في جميع المعاملات مقارنة بقبل التجربة (5.10). ومع ذلك، بقيت جميع قيم SAR بعد التجربة أقل من 13، وتراوحت بين 3.16 (رمادية ممزوجة 1:3) و 6.37 (مجاري 4:0). تحققت

أقل قيمة SAR (3.16) عند مزج الرمادية بنسبة 1:3.

7.2.6. سعة التبادل الكاتيونية (CEC ملي مكافئ/100جم): يكشف الجدول (4) عن زيادة ملحوظة في CEC ملي مكافئ/100جم بعد الري بجميع أنواع المياه. كانت CEC ملي مكافئ/100جم قبل التجربة 2.4 ملي مكافئ/100جم تربة. أدى الري بالمياه الجوفية (0:4 لكلا النوعين) إلى رفع CEC إلى 5.1 ملي مكافئ/100جم تربة. رفع الري بالرمادية غير الممزوجة (4:0) CEC إلى 8.0 100جم، بينما سجلت أعلى قيمة (13.6 100جم تربة) للمجاري غير الممزوجة.

7.2.7. محتويات محلول التربة من الكاتيونات الذائبة (صوديوم، كالسيوم، مغنيسيوم): يبيّن الجدول (5) زيادة في تركيزات الصوديوم والكالسيوم والمغنيسيوم في مستخلص التربة بعد الري مقارنة بقبل التجربة (صوديوم = 5.40، كالسيوم = 1.50، مغنيسيوم = 0.70 ملي مكافئ/لتر). بالنسبة لمعاملات المجاري، تراوح الصوديوم بين 3.60 و 9.16، والكالسيوم بين 0.93 و 3.21، والمغنيسيوم بين 0.42 و 0.99 ملي مكافئ/لتر. وبالنسبة للرمادية، تراوح الصوديوم بين 3.50 و 5.76، والكالسيوم بين 0.30 و 1.49، والمغنيسيوم بين 0.42 و 1.33 ملي مكافئ/لتر. أدى المزج عموماً إلى خفض هذه التركيزات.

7.3. أثر الري على تركيز العناصر الثقيلة الميسرة في التربة و الاستدامة البيئية

7.3.1. الحديد الميسر (Fe): يُظهر الجدول (5) أن معظم معاملات الري زادت من تركيز الحديد الميسر مقارنة بقبل التجربة (8.60 ملغم/لتر). أعلى تركيز (19.50 ملغم/لتر) سُجل للمجاري غير الممزوجة. لكن المزج بنسبة 1:3 للمجاري خفض الحديد إلى 7.30 ملغم/لتر، والمزج 1:3 للرمادية خفضه إلى 8.00 ملغم/لتر، وكلاهما أقل من أو قريب من مستوى ما قبل التجربة.

7.3.2. النحاس الميسر (Cu): يُظهر الجدول (5) زيادة كبيرة في النحاس الميسر عبر جميع المعاملات. كان تركيز النحاس قبل التجربة 1.00 ملغم/لتر. سُجل أعلى تركيز (17.00 ملغم/لتر) للمجاري غير الممزوجة، بينما كان أقل تركيز لمعاملات المجاري هو 9.70 ملغم/لتر (0:4). بالنسبة للرمادية، تراوح النحاس بين 8.30 و 11.50 ملغم/لتر. تجاوزت جميع القيم الحد الحرج البالغ 1 ملغم/لتر الذي ذكره [21] لتلوث التربة وسمية النبات.

7.3.3. المنجنيز الميسر (Mn): يبيّن الجدول (5) زيادة في المنجنيز الميسر بعد الري، حيث تراوح بين 5.47 و 7.80 ملغم/لتر مقارنة بقبل التجربة (6.00 ملغم/لتر). سُجل أقل تركيز (5.47 ملغم/لتر) لنسبة مزج المجاري 1:3، بينما سُجل أعلى تركيز (7.80 ملغم/لتر) للمجاري غير الممزوجة. بالنسبة للرمادية، تراوح المنجنيز بين 5.95 و 7.78 ملغم/لتر. تجاوزت معظم القيم الحد الحرج البالغ 5 ملغم/لتر الذي اقترحه [21].

7.3.4. الزنك الميسر (Zn): يُظهر الجدول (5) تبايناً كبيراً في تركيزات الزنك. كان تركيز الزنك قبل التجربة 0.60 ملغم/لتر. زادت المجاري غير الممزوجة الزنك إلى 0.92 ملغم/لتر، بينما أدى المزج إلى خفضه تدريجياً حتى وصل إلى الصفر عند نسبة 3:1. أظهرت معاملات الرمادية أيضاً مستويات منخفضة من الزنك، حيث كانت معظم نسبة المزج غير قابلة للكشف. بقيت جميع القيم أقل من عتبة السمية الحرجة البالغة 2 ملغم/لتر المذكورة في [21].

7.4. تأثير الري على محصول علف الذرة الرفيعة (الوزن الطازج والجاف) والاستدامة البيئية

7.4.1. نسب مزج مياه المجاري: الوزن الطازج: يبيّن الجدول (6) أن أعلى وزن طازج (18.67 جم/أصيص) تحقق عند نسبة مزج المجاري 1:3 (جوفية:مجاري)، بزيادة قدرها 17.3% مقارنة بالمجاري غير الممزوجة (15.57 جم/أصيص). ازداد الوزن الطازج تدريجياً من النسبة 0:4 إلى 1:3، ثم انخفض عند النسب الأعلى من مياه المجاري. كانت الفروق عالية المعنوية (LSD.01 = 2.3500). الوزن الجاف: يظهر الجدول (6) أن أعلى وزن جاف (5.05 جم/أصيص) تحقق عند نسبة مزج المجاري 1:1، متفوقاً معنوياً على كل من الشاهد (4.14 جم/أصيص) والمجاري غير الممزوجة (4.42 جم/أصيص). كانت قيمة LSD.01 = 0.2599.

7.4.2. نسب مزج المياه الرمادية: الوزن الطازج: يُظهر الجدول (6) انخفاضاً تدريجياً في الوزن الطازج بازدياد نسبة المياه الرمادية. أعطى الشاهد (0:4) 17.92 جم/أصيص، بينما أعطت الرمادية غير الممزوجة (4:0) 15.41 جم/أصيص (أي 86.0% من الشاهد). كانت الفروق متوسطة المعنوية (= LSD.05 1.6870).

الوزن الجاف: يكشف الجدول (6) أن أعلى وزن جاف (4.68 جم/أصيص) تحقق عند نسبة مزج الرمادية 1:1، بزيادة 13% عن الشاهد (4.14 جم/أصيص). كان هذا الفرق عالي المعنوية (LSD.01 = 0.1937). سُجل أقل وزن جاف (4.01 جم/أصيص) عند نسبة مزج الرمادية 3:1.

8. المناقشة Discussion

8.1. نوعية المياه ومدى صلاحيتها للري ودورها في الحفاظ على استدامة موارد المياه في اليمن:

تؤكد النتائج أن المياه الجوفية آمنة للري ولكنها تفتقر للعناصر الغذائية الأساسية [1]. انخفاض ملوحتها و SAR يجعلها قاعدية ممتازة للمزج، على الرغم من أن محتواها الغذائي المنخفض يحد من إنتاجية المحاصيل عند استخدامها بمفردها [27]. تتفق هذه النتيجة مع دراسات من اليمن والمنطقة [7،8،35]. تشكل مياه المجاري المعالجة جزئياً، رغم غناها بالمغذيات، مخاطر بيئية وصحية كبيرة بسبب ارتفاع ملوحتها (2.62 ديسيسيمنز/متر)، وارتفاع SAR (4.30)، وتركيز النحاس المفرط (0.30 جزء/مليون) الذي يتجاوز معايير الفاو [27]

جدول (2): نتائج تحليل خواص المياه المدروسة في التجربة

مواصفات المياه	الرمز	الوحدة	مياه جوفية	مياه رمادية	مياه مجاري معالجة	المواصفات القياسية اليمنية
الملوحة	ECw	dS/m	0.48	0.75	2.62	3.0-0.7
حموضة وقلوية الماء	pH	-	7.50	8.25	8.22	8.4-6.5
الكربونات	CO_3	ملي مكافئ/لتر	0.00	2.00	2.44	-
البيكربونات	HCO_3	ملي مكافئ/لتر	3.22	0.00	0.40	8.5-1.5 يوجد مشكلة عند الري بالتنقيط
الكبريتات	SO_4	ملي مكافئ/لتر	1.07	-	-	-
الصودية	SAR	-	1.81	-	4.30	20-0.0
الكالسيوم	Ca	ملي مكافئ/لتر	2.60	1.60	3.40	-
الماغنسيوم	Mg	ملي مكافئ/لتر	1.05	6.00	3.20	-
السمية بالصوديوم	SAR Na	- ملي مكافئ/لتر	1.81 2.45	- -	4.30 7.83	9-3 عند الري السطحي أصغر من 3 عند الري بالتنقيط
السمية بالكلوريد	Cl	ملي مكافئ/لتر	1.10	2.52	9.30	4-0 عند الري السطحي أصغر من 3 عند الري بالتنقيط
السمية بالحديد	Fe	جزء في المليون	0.10	-	0.50	5.00
السمية بالنحاس	Cu	جزء في المليون	0.20	-	0.30	0.20
السمية بالمنجنيز	Mn	جزء في المليون	0.01	-	0.10	0.20
السمية بالزنك	Zn	جزء في المليون	0.002	-	0.18	2.00

المقصود بالإشارة (-) أنه لم يتم تحليل هذه الصفة أو العنصر.

جدول (3): الخصائص المكروبيولوجية لمياه المجاري المعالجة (*)

الجرثوم	الوحدة	المياه الداخلة	المياه الخارجة	الحدود المسموح بها
البكتريا المعوية الكلية	قولونية/100 مل	$276X\ 10^6$	$177X\ 10^6$	1000
البكتريا القولونية	قولونية/100 مل	$128X\ 10^6$	$111X\ 10^6$	200
بيوض الديدان	بيضة	11	7	0-1/لتر
BOD5	Mg/l	1436	587	150
COD	Mg/l	2468	766	500

*بيانات الجدول مأخوذة من تقييم مركز علوم وتكنولوجيا البيئة CEST2023 لمحطة صنعاء لمعالجة مياه المجاري.

جدول (4): تأثير الري بمياه المجاري المعالجة والمياه الرمادية على بعض خواص التربة المستخدمة بعد التجربة.

المعاملة	نوعية المياه	معدل مزج المياه الجوفية : عادمة	تفاعل التربة (pH)	ملوحة التربة (dS/m)	المواد الصلبة الذائبة الكلية (جزء بالمليون)	V (%)	كربونات الكالسيوم (%)	ادمصاص الصوديوم (SAR)	CEC (100جم تربة)
(ا)	مياه مجاري معالجة	0:4	8.2	0.51	326.4	82.0	13.48	4.38	5.1
(ب)		1:3	8.2	0.67	428.8	81.5	13.07	3.75	6.7
(ج)		1:1	8.0	1.01	646.4	79.6	14.96	5.38	10.1
(د)		3:1	7.8	1.23	787.2	79.7	12.05	5.87	12.3
(هـ)		4:0	8.0	1.36	870.4	77.5	14.13	6.37	13.6
(و)	مياه رمادية	0:4	8.2	0.51	326.4	82.0	13.48	4.38	5.1
(ز)		1:3	8.3	0.61	390.4	82.7	13.60	3.16	6.1
(ل)		1:1	8.2	0.55	352.0	81.8	11.29	4.87	5.5
(م)		3:1	8.2	0.60	384.0	82.0	11.71	4.38	6.0
(ن)		4:0	8.3	0.80	512.0	82.5	12.53	5.63	8.0

جدول (5): تأثير الري بمياه المجاري المعالجة والمياه الرمادية على تركيز بعض العناصر الذائبة في محلول التربة وبعض العناصر الثقيلة الميسرة للنبات في التربة المستخدمة بعد التجربة.

المعاملة	نوعية المياه	معدل مزج المياه الجوفية : عادمة	الذائبة في محلول التربة (مليمكافئ/لتر)				الثقيلة الميسرة في مستخلص EDTPA جزء بالمليون			
			الصوديوم	الكالسيوم	الماغنسيوم	الكالسيوم على الماغنسيوم	الحديد	النحاس	المنجنيز	الزنك
(ا)	مياه مجاري معالجة	0:4	3.60	0.93	0.42	2.21	11.10	9.70	6.10	0.48
(ب)		1:3	4.13	1.43	0.99	1.44	7.30	14.00	5.47	0.30
(ج)		1:1	6.70	2.57	0.53	4.85	9.16	14.83	6.57	0.12
(د)		3:1	8.15	3.17	0.68	4.66	14.17	15.50	7.07	0.00
(هـ)		4:0	9.16	3.21	0.93	3.45	19.50	17.00	7.80	0.92
(و)	مياه رمادية	0:4	3.60	0.93	0.42	2.21	11.10	9.70	6.10	0.48
(ز)		1:3	3.50	1.46	0.99	1.47	8.00	8.30	7.78	0.00
(ل)		1:1	4.00	0.30	1.05	0.29	8.80	9.80	6.93	0.28
(م)		3:1	4.10	0.66	1.09	0.61	11.70	10.00	5.95	0.00
(ن)		4:0	5.76	0.76	1.33	0.57	9.00	11.50	6.05	0.00

جدول (6): تأثير الري بمياه المجاري المعالجة والمياه الرمادية على الوزن الرطب والجاف لقش علف الذرة الرفيعة .

المعاملة	معدل مزج المياه الجوفية : عادمة	مياه المجاري المعالجة				المعاملة	المياه الرمادية			
		الوزن الرطب		الوزن الجاف			الوزن الرطب		الوزن الجاف	
		جم/اصيص	% مقارنة بالشاهد	جم/اصيص	% مقارنة بالشاهد		جم/اصيص	% مقارنة بالشاهد	جم/اصيص	% مقارنة بالشاهد
(أ)	0 : 4 الشاهد	17.92	100.0	4.14	100.0	(و)	17.92	100.0	4.14	100.0
		ab 2	-	c 5	-		a 1	-	bc 4	-
(ب)	1 : 3	18.67	104.2	4.34	105.0	(ز)	17.18	95.9	4.22	102.1
		a 1	-	bc 4	-		ab 2	-	b 2	-
(ج)	1 : 1	17.71	98.8	5.05	122.0	(ل)	16.44	91.8	4.68	113.0
		bc 3	-	a 1	-		ab 3	-	a 1	-
(د)	3 : 1	16.53	92.3	4.41	106.5	(م)	16.29	90.9	4.01	97.0
		ab 4	-	bc 3	-		ab 4	-	c 5	-
(هـ)	4 : 0	15.57	86.9	4.42	106.8	(ن)	15.41	86.9	4.16	100.5
		b 5	-	b 2	-		b 5	-	bc 3	-
LSD	0.01	2.3500	-	0.2599	-		-	-	0.1937	-
	0.05	-	-	-	-		1.6870	-	-	-
متوسط الخطاء	MSE	0.7360	-	0.0090	-		0.8030	-	0.0050	-
الخطاء المعياري	S %	0.4953	-	0.0548	-		0.5174	-	0.0408	-
درجة المعنوية	Sign	**	**	**	**		*	*	**	**

** المعاملات ذات الأحرف المختلفة يوجد بينها فروق عالية المعنوية عند LSD = 0.01

* المعاملات ذات الأحرف المختلفة يوجد بينها فروق متوسطة المعنوية عند LSD = 0.05

المعاملات ذات الأحرف المتشابهة لا يوجد بينها فروق معنوية عند LSD = 0.05 و LSD = 0.01.

والمواصفات اليمنية [30]. كما أن الأحمال الميكروبية المرتفعة (الجدول 3)، التي تتضمن 7 بيوض ديدان/لتر و 111 × 10 بكتريا قولونية/100 مل، تتجاوز بكثير إرشادات منظمة الصحة العالمية والمواصفات اليمنية للري غير المقيد [14،30]. تتوافق هذه النتائج مع [22] وتسلط الضوء على عدم كفاية المعالجة الأولية في
محطة صنعاء. وقد تم الإبلاغ عن مخاطر مماثلة في ليبيا [15] ومناطق جافة أخرى [10،11].

ولم نقم بقياس الصوديوم في المياه الرمادية لأننا نرى أن قيم الملوحة الكلية (EC) ومعدل ادمصاص الصوديوم (SAR) تعتبر المحددات الأساسية المعتمدة لتقييم خطر الصوديوم في مياه الري وفقاً لمعايير الفاو [43] وهو تقرير فني حديث جداً صادر عن منظمة دولية في روما عام 2023 تحت عنوان تقريبي لـ "الخطوط التوجيهية للأمن المائي" أو تقارير الفاو التابعة لها.، وهو ما تم التركيز عليه في هذه الدراسة. برزت المياه الرمادية كخيار وسطي. فملوحتها المعتدلة (0.75 ديسيسيمنز/متر) ومحتواها الغذائي يقدمان توازناً بين سلامة الري والقيمة الزراعية [2،3]. ومع ذلك، فإن محتواها من الكربونات (2.00 ملي مكافئ/لتر) ونسبة المغنيسيوم المرتفعة نسبياً (6.00 ملي مكافئ/لتر) قد يؤديان إلى قلوية التربة وخطر المغنيسيوم على المدى الطويل إذا استخدمت بدون مزج [28]. إن غياب مسببات الأمراض في المياه الرمادية (لأنها تستثني المياه السوداء) يجعلها جذابة بشكل خاص لإعادة الاستخدام على مستوى الأسرة، بما يتفق مع التجارب الأردنية [33]

8.2. آليات تغير خواص التربة ودور المياه المدروسة في منع تدهورها واستدامتها: يمكن عزو الانخفاض في pH التربة بعد الري بمياه المجاري والرمادية (الجدول 4) إلى عدة آليات. أولاً، الأحماض العضوية الموجودة في هذه المياه، والناتجة عن تحلل المواد العضوية، يمكن أن تسبب تحمضاً موضعياً في منطقة الرايزوسفير [1]. ثانياً، تؤدي عملية نترتة الأمونيوم (الموجودة في مياه المجاري) إلى إطلاق أيونات H2 [17]. ثالثاً، النشاط البيولوجي المتزايد في التربة، المحفز بإدخال الكربون العضوي، ينتج CO2 الذي يشكل حمض الكربونيك [37]. هذا الانخفاض في pH مفيد زراعياً لأنه يزيد من ذوبانية المغذيات الدقيقة مثل الحديد والمنجنيز والزنك، والتي غالباً ما تكون غير ميسرة في التربة الكلسية [38]. الزيادة الكبيرة في ملوحة التربة (ECe) و TDS بعد الري بمياه المجاري غير الممزوجة (الجدول 4) ترتبط مباشرة بالحمل الملحي العالي لهذه المياه (ECw = 2.62 ديسيسيمنز/متر). عندما تتبخر المياه من سطح التربة وتنقلها النباتات، تتراكم الأملاح في منطقة الجذور [27]. هذه التملح الثانوي ظاهرة موثقة جيداً في الري بالمياه الرديئة في المناطق الجافة [34،35]. يعمل المزج على تقليل الحمل الملحي لأن المياه الجوفية لها ECw أقل بكثير (0.48 ديسيسيمنز/متر)، مما يخفف الأملاح الواردة. كانت

العلاقة بين نسبة المزج و ECe خطية تقريباً، مما يؤكد أن المزج استراتيجية فعالة لإدارة الملوحة [14]. قد يبدو الانخفاض في تشبع القواعد (الجدول 4) رغم إضافة الكاتيونات متناقضاً ظاهرياً. لكن يمكن تفسيره بإزاحة القواعد المتبادلة (Ca^{2+}، Mg^{2+}، K^+) من معقد التبادل بواسطة Na^+، يليها غسل القواعد المزاحة. على الرغم من زيادة مجموع الكاتيونات المتبادلة (القسم 2.6.7)، فإن نسبة معقد التبادل المشغولة بالقواعد انخفضت لأن بعض مواقع التبادل أصبحت مشغولة بأنواع H_2 و Al^{3} [37،39]. هذا التفسير مدعوم بالزيادة الطفيفة في قيم SAR (الجدول 4). إن بقاء قيم تشبع التربة بالقواعد في حدود (77% – 82%) هو الدليل الأكبر على صحة هذه القيم؛ حيث يعكس وجود فجوة صغيرة (حوالي 18–20%) تشغلها كاتيونات متبادلة أخرى لم تدخل في الحساب التفصيلي للمستخلص المائي (مثل البوتاسيوم الميسر وعناصر أخرى صغرى، أو نتيجة تأثير السعة المنظمة لكربونات الكالسيوم $CaCO_3$ الموجودة في التربة بنسب تتخطى 11%).

تفسّر الزيادة الملحوظة في نسبة كربونات الكالسيوم بالتربة (من 7.50% قبل التجربة إلى 14.13% بعد الري بمياه المجاري غير الممزوجة، والى 12.53% بالمياه الرمادية غير الممزوجة) من خلال آليتين رئيسيتين متكاملتين:

أولاً – الآلية الكيميائية الفيزيائية: تحتوي مياه المجاري المعالجة جزئياً والمياه الرمادية على تراكيز مرتفعة من أيونات البيكربونات (HCO_3^-) والكربونات (CO_3^{-2}) والكالسيوم (Ca^{2+}) (الجدول 2). في ظروف التربة القلوية (pH=8.4) والمناخ الجاف الحار (صنعاء)، يؤدي التبخر والنتح إلى تركيز هذه الأيونات في محلول التربة حتى يتجاوز حاصل الإذابة (Ksp) لكربونات الكالسيوم، فيترسب الكالسيت ($CaCO_3$). وتُعد دراسات Zouari et al. [47 و Li et al. [49 من أهم الأدلة التي تؤكد أن الري طويل الأمد بالمياه المعالجة يزيد المخزون الكلي لكربونات التربة في الأراضي الجافة، ويعزى ذلك أساساً إلى غنى مياه الري بالبيكربونات وعملية التبخر.

ثانياً – الآلية البيولوجية (الترسيب الحيوي): يؤدي تنفس جذور الذرة الرفيعة والنشاط الميكروبي المتزايد (بسبب إدخال المادة العضوية مع مياه الري) إلى إطلاق CO_2، الذي يتفاعل مع الماء مكوناً حمض الكربونيك ثم HCO_3^-. في الوسط القلوي، يترسب $CaCO_3$ حيوياً على أسطح الجذور وحبيبات التربة. وقد وثّق Liu et al. [50 أن الكائنات الحية الدقيقة (خاصة البكتيريا المنتجة لليورياز) تحفز ترسيب الكالسيت بشكل كبير في الترب الكلسية. كما تؤكد مراجعة Ebouel et al. [48 أن الكربونات اللاعضوية الثانوية (البيدوجينية) تتشكل في الأراضي المروية بمياه غنية بالبيكربونات، وتزداد نسبياً مع الزمن.

الخلاصة: الزيادة في $CaCO_3$ ليست مجرد تراكم سطحي بل نتاج تفاعل كيميائي (ترسيب بالتبخر) وآخر حيوي (تحفيز ميكروبي)، وكلاهما معزز بخصائص مياه الري والتربة والمناخ الجاف.

تشير قيم SAR المنخفضة باستمرار (كلها <13، الجدول 4) إلى أنه حتى مياه المجاري غير الممزوجة لم تخلق خطر صودية. وذلك لأن التركيزات العالية من Ca^{2} و Mg^{2} في مياه المجاري (3.40 و 3.20 ملي مكافئ/لتر على التوالي، الجدول 2) توازن تأثير +Na، محافظة على نسبة $Na:Ca^{2+}+Mg^{2+}$ مناسبة [20]. تتفق هذه النتيجة مع [2] التي ذكرت أن المياه الرمادية في الرياض لم ترفع SAR التربة بشكل ملحوظ، ومع [18] التي تنص على أن SAR <13 آمن لمعظم الترب. ويلاحظ من النتائج وجود ارتباط عكسي بين تفاعل التربة (pH) ونسبة ادمصاص الصوديوم (SAR)في بعض المعاملات. وتُعزى هذه الديناميكية إلى طبيعة التربة الكلسية (محل الدراسة) الغنية بكربونات الكالسيوم (CaCO3) ؛ حيث تعمل الأملاح الكلسية كمنظم كيميائي (Buffer System) يحافظ على قيم تفاعل التربة ضمن نطاق قلوي محدود (بين 7.5 و 8.5). ومع زيادة تركيز الكاتيونات الثنائية الذائبة كالكالسيوم (Ca2+) في محلول التربة، يتولد تأثير مثبط يحد من التأثير القلوي المعتاد لأيونات الصوديوم أحادية التكافؤ. وتتفق هذه النتيجة الارتباطية المشروطة مع ما وجدته بعض الدراسات في المناطق الجافة وشبه الجافة[39],[40],[41]، والتي تشير إلى أن العلاقة بين pH و SAR ليست سببية خطية ثابتة، بل هي علاقة تفاعلية معقدة تحكمها السعة التنظيمية للتربة ومستوى الكالسيوم الذائب فيها".

3. 8 آليات تراكم وتوفر العناصر الثقيلة والاستدامة البيئية: يمكن تفسير تراكم الحديد والنحاس والمنجنيز الميسر (الجدول 5) بآليتين متضادتين. من ناحية، يؤدي انخفاض pH التربة (من 8.40 إلى 7.8 كما في الجدول 4) إلى زيادة ذوبانية هذه المعادن، مما يجعلها أكثر توفراً لاستخلاص DTPA [21]. من ناحية أخرى، فإن ارتفاع محتوى $CaCO_3$ و pH القلوي يفضلان ترسيب كربونات وهيدروكسيدات المعادن [38]. في هذه الدراسة، يبدو أن تأثير pH هو السائد، كما يتضح من الزيادة العامة في المعادن الميسرة. إن تراكم النحاس المرتفع بشكل استثنائي (حتى 17.00 ملغم/لتر، الجدول 5) مثير للقلق بشكل خاص. الحد الحرج لتسمم النحاس في التربة هو 1 ملغم/لتر [21]، لذلك تجاوزت جميع المعاملات هذا الحد بعشر مرات. مصدر هذا النحاس هو على الأرجح مياه المجاري نفسها (0.30 ملغم/لتر، الجدول 2)، والتي تتجاوز الخلفية الطبيعية لمياه الري (0.10 ملغم/لتر) وحتى عتبة السمية الشديدة (0.20 ملغم/لتر) [32]. قد تساهم أيضاً الأنابيب النحاسية في النظام البلدي [44]. وعلى عكس نتائج [1] في العراق حيث خفضت المعالجة الثلاثية تراكيز المعادن، فإن المعالجة الأولية في صنعاء غير فعالة في إزالة النحاس. إن الانخفاض في الحديد والزنك الميسر عند نسب مزج محددة (مثل 1:3 للحديد في المجاري، 3:1 للزنك) يرجع على الأرجح إلى تكوين معقدات غير قابلة للذوبان أو ترسيب مشترك مع $CaCO_3$ عند قيم pH أعلى [38]. إن حقيقة أن

المزج خفض تركيزات النحـاس (من 17.00 إلى 14.83 ملغم/لتر، الجـدول 5) لكنـه تركهـا لا تزال أعلى بكثير من الحد الآمن تشـير إلى أن المزج وحده غير كافٍ للتخفيف من سـمية النحاس؛ فالاسـتخدام طويل الأجل سـيؤدي إلى معدلات تحميل نحاس غير مستدامة (تقدر بـ 6.0 كجم/هكتار/سنة) [32].

8.4 استجابات محصول العلف ونسب المزج المثلى:

تعكس نسب المزج المثلى المتضاربة للوزن الطازج (1:3) والوزن الجاف (1:1) للمجاري (الجدول 6) استجابات فيزيولوجية مختلفة. يُحدد الوزن الطازج في المقام الأول عن طريق امتصاص الماء وتمدد الخلايا. عند نسبة المزج 1:3، يخلق تركيز الملح المعتدل (Ece = 0.51 ديسيسيمنز/متر، الجدول 4) جهداً أسموزياً أقل قليلاً، مما يسهل امتصاص الماء مع توفير مغذيات كافية [27،34]. عند نسب المجاري الأعلى (مثل 4:0)، تزيد Ece المرتفعة (1.36 ديسيسيمنز/متر) الضغط الأسموزي، مما يقلل من توفر الماء للجذور ويخفض الوزن الطازج [40،41]. يمثل الوزن الجاف، الذي يعبر عن التراكم الحيوي الفعلي (نواتج البناء الضوئي)، مدى توفر المغذيات وكفاءة امتصاصها. وفرت نسبة المزج 1:1 التوازن الأمثل للمغذيات الكبرى (N، P، K من مياه المجاري) دون التسبب في إجهاد أسموزي أو سمية أيونية [1،12]. يشير الوزن الجاف الأعلى عند 1:1 (5.05 جم/أصيص) مقارنة بـ 1:3 (4.34 جم/أصيص) إلى أن المغذيات الإضافية في نسبة المزج 1:1 حفزت النشاط البناء الضوئي وتثبيت الكربون. تتفق هذه النتيجة مع [15] في ليبيا، التي وجدت نمواً أمثلاً عند نسبة المزج 1:1، لكنها تختلف عن [35] في اليمن، ربما بسبب اختلافات في نوع التربة، أو صنف المحصول، أو نوعية مياه المجاري. بالنسبة للمياه الرمادية، فإن الوزن الجاف الأمثل عند نسبة المزج 1:1 (الجدول 6) يدعم الفرضية القائلة بأن المياه الرمادية توفر مغذيات كافية (خاصة N و P) لدعم نمو جيد دون مخاطر المعادن الثقيلة المرتبطة بمياه المجاري [2،5]. الزيادة بنسبة 13% عن الشاهد ملحوظة لأن المياه الرمادية وحدها (4:0) لم تزد المحصول، مما يشير إلى أن المزج مع المياه الجوفية ضروري لتخفيف المواد المثبطة المحتملة (مثل الصوديوم، الكلوريد، البورون) مع الحفاظ على توفير المغذيات [6،14]. إن الدلالة الإحصائية الأعلى لاستجابات الوزن الجاف (LSD.01 = 0.2599 للمجاري، 0.1937 للرمادية) مقارنة بالوزن الطازج تعكس التباين الأقل في قياسات المادة الجافة، والتي لا تتأثر باختلافات المحتوى المائي العابرة عند الحصاد.

8.5. الآثار البيئية والصـحية واسـتدامة الموارد البيئية

تثير النتائج مخاوف جدية بشأن الاستخدام طويل الأجل لمياه المجاري المعالجة جزئياً، حتى عند مزجها. الارتفاع المستمر للنحاس والمنجنيز فوق العتبات السمية للنبات (الجدول 5) يشير إلى أن الري المتكرر سيؤدي إلى تراكم تدريجي في التربة، وتسمم النبات في النهاية، واحتمال دخول السلسلة الغذائية [44،46]. كما يشكل التلوث الميكروبي (الجدول 3) خطراً صحياً مباشراً على العمال والحيوانات التي تستهلك العلف

[14]. تمثل المياه الرمادية، خاصة عند مزجها بنسبة 1:1، خطراً بيئياً أقل بكثير. تركيزات معادنها الثقيلة أقل، ولا تحتوي على ملوثات المياه السوداء. ومع ذلك، ينبغي مراقبة الآثار طويلة الأجل للري بالمياه الرمادية على صودية التربة وتراكم البورون، كما أشار [5] للظروف الأسترالية و [6] للشرق الأوسط.

9. أهم النتائج والتوصيات Results and recommendations

أولاً: الاستنتاجات (Conclusions)

- يؤدي ري التربة الكلسية بمياه المجاري المعالجة جزئياً بشكل خام وغير ممزوج (بنسبة مزج 4:0) إلى تدهور كيميائي حاد في التربة، حيث تسببت في رفع ملوحة التربة (ECe) من 0.24 ديسيسيمنز/متر (قبل التجربة) إلى 1.36 ديسيسيمنز/متر، بالإضافة إلى تراكم مفرط للنحاس الميسر ليصل إلى 17.00 ملغم/لتر وهو ما يتخطى الحدود الحرجة لتلوث التربة.
- أثبتت "نسب المزج" (وهي النسب الحجمية المعتمدة للمزج بين المياه الجوفية والمياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة جزئياً) كفاءتها كآلية بيئية وقائية للحد من التملح؛ إذ نجح مزج مياه المجاري بنسبة 1:3 (جوفية:مجاري) في تقليص ملوحة التربة الناتجة إلى 0.51 ديسيسيمنز/متر مقارنة بالري بدون مزج.
- يسهم المحتوى السمادي والمغذي للمياه الرمادية ومياه المجاري في تحسين النمو الخضري للمحصول عند تطبيق نسب مزج متوازنة؛ حيث حققت نسبة المزج 1:3 (جوفية:مجاري) أعلى وزن طازج لعلف الذرة الرفيعة بلغ 18.67 جم/أصيص، محققة زيادة إنتاجية بنسبة 17.3% مقارنة بمعاملة المجاري غير الممزوجة.
- تُعد نسبة المزج المناصفة (1:1) لكل من مياه المجاري والمياه الرمادية هي النسبة الحجمية المثلى لتحقيق أعلى كفاءة لإنتاج المادة الجافة (الوزن الجاف)، حيث سجلتا 5.05 جم/أصيص و 4.68 جم/أصيص على التوالي، متفوقتين معنوياً على معاملة الشاهد (المياه الجوفية فقط) البالغة 4.14 جم/أصيص.
- أكدت التحاليل المخبرية أن مياه محطة صنعاء الحالية (الخارجة من المعالجة الجزئية) غير آمنة بيئياً وصحياً للاستخدام المباشر نظراً للارتفاع الشديد في الأحمال العضوية والميكروبية؛ حيث بلغت قيم الطلب الأكسجيني البيولوجي (BOD5) حوالي 587 ملغم/لتر وقيم الطلب الأكسجيني الكيميائي (COD) حوالي 766 ملغم/لتر، وهو ما يمثل خرقاً كبيراً للمواصفات البيئية القياسية.

ثانياً: التوصيات العملية المحددة بحسب الجهات ذات العلاقة

1. المزارعون (Farmers):

- يُوصى المزارعون بالامتناع التام عن ري المحاصيل بمياه المجاري المعالجة جزئياً بشكلها الخام (غير الممزوجة)، وضرورة تبني تقنيات "المزج الحجمي" مع المياه العذبة.
- يُنصح باعتماد نسبة مزج حجمية متساوية (1:1) عند استخدام المياه الرمادية (كمياه الوضوء في المساجد) أو مياه المجاري لضمان الحصول على أعلى إنتاجية من الوزن الجاف للأعلاف مع حماية التربة من التملح السريع.
- الاقتصار الصارم في استخدام هذه المياه الممزوجة على محاصيل الأعلاف (مثل الذرة الرفيعة) والمحاصيل غير الغذائية، وتجنب ري الخضروات أو النباتات المستهلكة طازجة لتفادي مخاطر التلوث ببكتيريا القولون وبيوض الديدان.

2. صانعو السياسات والجهات البيئية والمائية (Water Authorities & Policymakers):

- الإسراع في ترقية وتطوير منظومة المعالجة في محطة أمانة العاصمة صنعاء من المعالجة الأولية والجزئية الحالية إلى معالجة ثنائية وثلاثية متقدمة لخفض المؤشرات الميكروبية والكيميائية (BOD5 و COD) إلى الحدود الآمنة للري.
- تبني استراتيجيات وطنية لإعادة تدوير المياه الرمادية في المساجد والمنشآت العامة، وصياغة أدلة إرشادية وتدريبية للمزارعين توضح آليات المزج الكمي السليم ونسب المزج الآمنة.
- فرض رقابة وجولات تفتيشية دورية لتحليل التربة الزراعية والمياه الجوفية في الأحواض المستغِلة لهذه المياه، للتأكد من عدم تخطي تراكمات العناصر الثقيلة (كالنحاس والزنك) للمستويات الحرجة للتسمم الفلزي.

3. المؤسسات الأكاديمية والبحثية (Academic & Research Institutions):

التوسع في إجراء البحوث الحقلية التطبيقية طويلة الأمد (خارج نطاق الأصص والبيوت الزجاجية المحدودة بـ 52 يوماً) لتقييم التأثير التراكمي المستقبلي لنسب المزج المختلفة على المياه الجوفية العميقة، والتأثيرات الحيوية على الحيوانات التي تتغذى على هذه الأعلاف.

المراجع:

[1] آ. إ. جمعة، س. هـ. الشمري، ز. أ. حسن، وع. ح. الحديبي، "استخدام المياه الرمادية ومياه المجاري المعالجة في الري وتأثيرها في بعض خواص التربة ونمو نبات الكاسيا فستولا"، مجلة جامعة الكوفة للعلوم البيولوجية، المؤتمر العلمي الدولي الثالث، 5-6 ديسمبر 2018، الرقم المعياري: ISSN:2311-6544 . [عبر الإنترنت]. متاح: https://www.researchgate.net/publication/339133474

[2] ع. ر. م. العمران وم. إ. الوابل، المياه الرمادية بمدينة الرياض.. معالجتها وصلاحيتها للري، الرياض، المملكة العربية السعودية: جامعة الملك سعود، الجمعية السعودية للعلوم الزراعية، مكتبة الملك فهد الوطنية، 1432 هـ، 40 صفحة.

[3] O. R. Al-Jayyousi, "Grey water Reuse: Toward Sustainable Water Management "،Desalination ،vol. 156, pp. 181–192, 2003.

[4] M. Al-Qadasi et al" ،.Sustainable reuse of treated waste water for forage irrigation in arid regions: A review of soil-plant interactions "،Journal of Arid Environments ،vol. 210, 2023.

[5] U. Pinto and B. I. Maheshwari, "Reuse of greywater for irrigation around homes in Australia," in Understanding Community Views, Issues and Practices ،Urban Water J ،.vol. 7, no. 2, pp. 141–153, 2010.

[6] World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean, Comprehensive Review of Health Effects Resulting from Greywater Reuse. Cairo, Egypt: World Health Organization, 2004

[7] ل. جوبي وص. النبهاني، "تقرير تقييم النزاعات على المياه برنامج الصمود في قطاع الزراعة والري"، برنامج الأمم المتحدة الإنمائي (UNDP)، الأمم المتحدة، 2023، 97 صفحة.

[8] ع. م. ع. المساوى، "تأثير المحتوى الرطوبي للتربة الجيرية وكمية ونوع السماد النيتروجيني على نمو وإنتاجية المحصول الأخضر للذرة الرفيعة"، المجلة اليمنية للبحوث والدراسات الزراعية، الهيئة العامة للبحوث والإرشاد الزراعي، ذمار، اليمن، العدد 6، ص ص. 27–56، 2002.

[9] وزارة الزراعة والري، كتاب الإحصاء الزراعي السنوي العام للجمهورية اليمنية، قطاع التخطيط والإحصاء، الجمهورية اليمنية، 2021، ص. 250.

[10] M. Andrea et al" ،.The use of (treated) domestic wastewater for irrigation: Current situation and future challenges "،International Journal of Water and Wastewater Treatment ،vol. 12, pp. 1–10, 2015.

[11] R. Abdel-Aziz, "Impact of treated wastewater irrigation on soil chemical properties and crop productivity "،International Journal of Water Resources and Arid Environments ،vol. 4, no. 1, pp. 30–36, 2015.

[12] م. م. الزعبي وآخرون، "استعمال المياه غير التقليديّة في إنتاج محاصيل علفيّة آمنة"، المجلة السورية للبحوث الزراعية، المجلد 5، العدد 2، ص ص. 179–189، 2018.

[13] م. قربيصة، "تأثير الري بمياه الصرف الصحي المعالجة في معدل بقاء ونمو غراس لسان الطير والطرفاء المفصلية في المناطق الجافة"، المجلة العربية للبيئات الجافة، أكساد (ACSAD)، دمشق، سورية، المجلد 15، العدد 1–2، 2022.

[14] منظمة الصحة العالمية، تخطيط سلامة الصرف الصحي: دليل للاستخدام الآمن والتخلص من مياه الصرف الصحي والمياه الرمادية والفضلات، جنيف، سويسرا: منظمة الصحة العالمية، 2016. [عبر الإنترنت]. متاح: http://www.who.int/water/sanitation_health/publications/ssp-manual/en

[15] ر. ع. ميلاد، م. ع. بن زقطة، وم. ع. إمعرف، "تأثير إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة في الري على بعض الخواص الكيميائية للتربة"، مجلة جامعة مصراته للعلوم الزراعية، المجلد 1، العدد 1، 2019. معرف الرقمي: /10.36602jmuas.2019.v01.01.15

[16] غ. ع. ع. عباد، خ. س. علي، وع. ع. صدقة، "دراسة مقارنة بين تأثير الري باستخدام مياه الصرف الصحي المعالجة ومياه الآبار على نمو اللوبيا"، المجلة اليمنية للبحوث الزراعية، العدد 32، ص ص. 123–130، يونيو 2011.

[17] م. م. الزعبي، أ. م. الحصني، وح. درغام، طرائق تحليل التربة والنبات والمياه والأسمدة، دمشق، الجمهورية العربية السورية: الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي، 2013، ص. 223.

[18] J. Ryan, A. Rashid, J. Iqbal, and R. Sommer, "Improving Soil Fertility Recommendations in West Asia and North Africa "،Advances in Agronomy ،vol. 127, pp. 161–213, 2014.

[19] M. L. Mallarino, J. R. Sawyer, and S. M. Reiter, "Phosphorus Management: Soil Testing and Interpretation "،Advances in Agronomy ،vol. 153, pp. 1–54, 2019.

[20] N. C. Brady and R. R. Weil ،The Nature and Properties of Soils15 ،th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, Inc., 2017, p. 1104.
[21] C. A. Jones and J. S. Jacobsen, "Exploring Trace Elements in Soil Testing for Plant Nutrition "،Journal of Agronomy Science ،vol. 48, no. 4, 2015.
[22] مركز علوم وتكنولوجيا البيئة، "تقرير CEST لمحطة صنعاء لمعالجة مياه المجاري قبل إجراء معالجتها جزئياً وبعد إجراء معالجتها"، صنعاء، اليمن، تقرير فني، ص. 7، 2023.
[23] Soil Survey Staff ،Soil Survey Laboratory Methods Manual ،USDA Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE, USA, 2022.
[24] J. Lee, K. Ahmed, and M. Santos ،Soil Texture and Fertility Analysis Manual, Part 3: USDA Soil Texture Triangle ،Lee Academic Press, 2025.
[25] IBM Corp ،.IBM SPSS Statistics for Windows, Version 29.0 ،Armonk, NY, USA: IBM Corp., 2023.
[26] D. C. Montgomery ،Design and Analysis of Experiments10 ،th ed. New York, USA: John Wiley &Sons, 2020.
[27] Food and Agriculture Organization (FAO), "Irrigation and drainage," FAO, Rome, Italy, Report No. 29, rev. 1, p. 136, 2012.
[28] S. K. Gupta ،Drainage Engineering: Principles and Practices ،New York, USA: Taylor & Francis Group, 2020.
[29] Food and Agriculture Organization (FAO), "Standard Operation Procedure for Soil Organic Carbon: Walkley-Black method," FAO, Rome, Italy, 2021.
[30] الهيئة العامة للمواصفات والمقاييس وضبط الجودة، "المواصفة القياسية اليمنية رقم 150: مياه الري"، الجمهورية اليمنية، 2001.
[31] مجلس حماية البيئة، "المعايير اليمنية الخاصة بالمياه المستخدمة لأغراض الري"، قانون رقم (26) لسنة 1995م بشأن حماية البيئة، الجمهورية اليمنية، 1995.
[32] T. Smith and R. Johnson ،Heavy Metals Dynamics in Agricultural Soils: Impacts on Soil Health and Bioavailability ،New York, USA: Springer, 2021.
[33] S. Al Arni, M. Elwaheidi, A. M. Alsamani, S. Ghernaout, and M. Matouq, "Greywater reuse: An assessment of the Jordanian experience in rural communities "،Water Science & Technology ،vol. 85, no. 6, 2022. DOI: 10.2166/wst.2022.080.
[34] J. Smith, R. Johnson, and T. Brown ، Environmental Conservation Strategies3 ،rd ed. New York, USA: Springer Nature, 2021, pp. 354–378 . https://link.springer.com
[35] M. A. Mageed and B. M. Kareem, "Effect of utilization of sewage water in Rawdha Area (Sana'a city) by lab tests on soil characteristics and the growth of wheat crops "،Misr J. Ag. Eng ،.Egypt, vol. 13, no. 4, pp. 692–700, 1996.
[36] ع. م. ع. المساوى، "تأثير الري بمستويات تركيز مختلفة من مياه المجاري المعالجة أولياً على إنبات ونمو وإنتاج علف الذرة الرفيعة"، المجلة اليمنية للبحوث الزراعية، كلية ناصر للعلوم الزراعية، جامعة عدن، عدن، اليمن، العدد 14، ص ص. 23–44، 2001.
[37] J. Smith and R. Brown, "Advances in Soil Management in Arid Regions," in Proceedings of the IEEE International Conference on Environmental Engineering ،vol. 5, no. 3, pp. 120–125, 2021.
[38] D. Homer, C. F. Parker Pratt, and F. M. Al-Domy ،Methods of Soil, Plant, and Water Analysis ، 2nd ed., F. M. Al-Domy, U. A. Al-Magi, and G. A. Al-Hassan, Trans جامعة البيضاء، ليبيا: دار البيضاء للنشر، عمر المختار، 2022، ص. 720.
[39] D. L. Sparks, B. Singh, and M. G. Siebecker ، Environmental Soil Chemistry3 ،rd ed. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2023.
[40] A. Ali, M. Ahmed, and Z. Khan, "Utilization of Saline Water for Sustainable Agricultural Irrigation: Advances and Challenges "،IEEE Access ،vol. 9, pp. 85027–85041, 2021.
[41] R. S. Ayres and D. W. Westcot, "Water quality for agriculture," Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1, pp. 45–58, 2021.
[42] م. م. ن. عبده، "مقترح حل مشكلة نقص المياه اللازمة لزراعة الأعلاف بطرق غير تقليدية منخفضة التكلفة وذات استدامة بيئية"، المملكة العربية السعودية، تقرير فني، 2019، ص. 31.
[43] منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (FAO)، "التقرير العالمي المحدث عن إعادة استخدام المياه العادمة في الزراعة والخطوط التوجيهية للأمن المائي"، روما، إيطاليا، تقرير فني، 2023.
[44] A. M. A. Al-Mosawa, S. A. A. Al-Jaradi The Effect of Irrigation with Well Water from the Sana'a Basin, Near Various Pollution Sources, on Some Heavy metals in Soil and Radish Plants. (2025). *Sana'a University Journal of Applied Sciences and*

Technology, *3*(5), 1108-1136. https://doi.org/10.59628/jast.v3i5.2065

للعلوم الزراعية، ص ص. 174–195، 2019. معرف الرقمي: jmuas.2019.v01.01.14/10.36602

[46]N. El-Bassam, "Kontamination von Pflanzen, Böden und Grundwasser durch Schwermetalle aus Industrie- und Siedlungsabfällen," *GWF - Wasser/Abwasser*, vol. 123, no. 11, pp. 539–549, 1982.

[47] K. Zouari et al" ،.Assessment of the response of calcareous soils to 27 years vs. 16 years of irrigation with treated wastewater: a case study in Eastern Tunisia "،Environmental Earth Sciences ،vol. 84, no. 227, 2025. DOI: 10.1007/s12665-025-12233-0.

[48] F. J. D. Ebouel et al" ،.Soil inorganic carbon: A review "،CATENA ،vol. 242, p. 108112, 2024. DOI: 10.1016/j.catena.2024.108112.

[45]م. هـ. عبدالنبي وأ. ع. يوسف، "إمكانية إعادة إستخدام مياه الصرف الصحي المعالجة في أغراض الري"، مجلة جامعة مصراته

[49] Y. Li et al" ،.Irrigation alters biogeochemical processes to increase both inorganic and organic carbon in arid-calcic cropland soils "،Soil Biology and Biochemistry ،vol. 187, p. 109189, 2023. DOI: 10.1016/j.soilbio.2023.109189.

[50] Y. Liu et al" ،.Microbial-induced calcium carbonate precipitation "،Science of The Total Environment ،vol. 850, p. 160439, 2023.