



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

Ali Mohammad Abdulrahman Al-Mosawa*, Salim Ali Abdo Al-Jaradi

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: 19-July-2025
Received: 23-August-2025
Accepted: 5-September-2025
Published: 28 October 2025

KEYWORDS

1. well Irrigation
2. Sana'a Basin
3. Pollution Sources
4. Heavy metals
5. Radish Plant

ABSTRACT

This study evaluated soil and plant contamination by heavy metals (Fe, Cu, Zn, Mn) in the Sana'a Basin, Yemen, resulting from irrigation with well water located near three pollution sources: (A) the municipal landfill in Al-Azraqain, (B) sewage effluents in Bani Al-Harith, and (C) stormwater runoff in Al-Rawdah. Four wells were sampled per site, and a pot experiment using radish (*Raphanus sativus* L.) was conducted during the spring season (February–April) to assess enrichment, transfer, and bioaccumulation factors.

Results revealed that Fe and Mn were most concentrated in wells near the landfill (A), likely due to ferrous and metallic waste, while Cu was highest in Bani Al-Harith (B), possibly linked to copper-containing materials and pipelines. Zn levels peaked in Al-Rawdah (C), attributed to stormwater transport across agricultural soils treated with Zn-containing fertilizers and pesticides. Although none of the detected concentrations exceeded permissible irrigation water limits, soil contents of Fe and Mn increased substantially after cultivation (279% and 245% of initial values, respectively), whereas Cu and Zn rose by 32% and 59%.

Enrichment factor (EF) analysis indicated Cu accumulation in soils irrigated with water from all wells. Pollution sources significantly influenced Mn concentrations in both shoots and roots, Fe in roots only, and Zn variably between shoots and roots depending on the site. Radish exhibited effective Zn accumulation in both shoots and roots under irrigation with water from site B, but only in roots under site A, suggesting its potential as a bioindicator for Zn-contaminated soils.

Translocation factor (TF) results showed that radish efficiently absorbed and translocated Cu from roots to shoots at site A, but not at sites B or C. Bioaccumulation factor (BAF) values in radish roots followed the order Zn (1.18) > Cu (0.14) > Mn (0.13) > Fe (0.04). The findings highlight a potential human health risk associated with heavy metal accumulation in edible plants and their entry into the food chain.

تأثير الري بمياه آبار حوض صنعاء القريبة من مصادر تلوث مختلفة على بعض العناصر الثقيلة في التربة ونبات الفجل

علي محمد عبد الرحمن المساوي*، سليم علي عبده الجراي

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

المؤلف: a.almasawaa@su.edu.ye

الكلمات المفتاحية

1. آبار الري
2. حوض صنعاء
3. مصادر تلوث
4. عناصر ثقيلة
5. نبات الفجل

معلومات المقالة

- تاريخ المقالة: 19- يوليو-2025
تاريخ التقديم: 23- أغسطس-2025
تاريخ القبول: 5- سبتمبر-2025
تاريخ النشر: 28 أكتوبر 2025

الملخص:

بهدف تقييم مدى تلوث التربة والنبات في حوض صنعاء بالعناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) الناتج عن الري بمياه الآبار القريبة من ثلاثة مصادر تلوث (A) مقلب نفايات المدينة بمنطقة الأزرقين (B) الصرف الصحي بمنطقة بني الحارث (C) مجرى سيول الأمطار بمنطقة الروضة، أخذت عينات أربعة آبار لكل منطقة، لدراسة سمية وسلوك واستجابة النبات لهذه العناصر الثقيلة. كما تمت زراعة نبات الفجل في تجربة أصص خلال الموسم الربيعي (فبراير-إبريل)، لتقييم عوامل الوفرة والانتقال والتراكم الحيوي لهذه العناصر. أظهرت نتائج التحاليل أن عنصري (Fe, Mn) كانا الأكثر تركيزاً في آبار مقلب نفايات المدينة بمنطقة الأزرقين (A) مقارنة بآبار المنطقة (B) و (C)، وربما يرجع السبب إلى احتواء القمامة على مخلفات المواد الحديدية ومواد معدنية حاوية على هذين العنصرين. أما تواجد (Cu) بتركيز أعلى في منطقة بني الحارث (الصرف الصحي B) فقد يعود إلى استخدام المواد النحاسية والأنابيب التي تحتوي على عنصر النحاس. أما فيما يتعلق باحتواء آبار منطقة الروضة (السائلة C) على أعلى تركيز من عنصر (Zn) فقد يعود السبب إلى أن مياه السيول تجري عبر الترب الزراعية التي تستخدم فيها الأسمدة والمبيدات المحتوية على الزنك. في الوقت الذي لم تبين النتائج وجود تجاوز لحدود تلك العناصر المسموح بها في مياه الري في أي من الآبار المشمولة بالدراسة. إلا أن كمية تركيزي Fe و Mn تراكمت في التربة بعد الزراعة في جميع المواقع المدروسة بحوالي ثلاثة أضعاف إلى ضعفين ونصف كميتها قبل الزراعة أي (279) % لـ Fe و (245) % لـ Mn، في حين أن كمية Cu و Zn في أغلب مواقع الزراعة المدروسة زادت في التربة بعد زراعة الفجل بنسبة (32) % و 59% على التوالي. وفق معامل الوفرة (EF) Enrichment Factor أثرت جميع مياه الآبار المدروسة في تراكم عنصر Cu في التربة بعد زراعة محصول الفجل. كما أثرت مناطق التلوث المدروسة في تركيز عنصر Mn في نبات الفجل بمجموعيه الخضري والجذري معاً، بينما أثرت في تركيز عنصر Fe في المجموع الجذري فقط. كما يتراكم عنصر Zn فقط في المجموع الجذري والخضري عند استخدام مياه ري من آبار منطقة التلوث B، بينما يتراكم عنصر Zn في التربة الملوثة بهذا العنصر. وبناءً على معامل الانتقال (TF) Translocation factor فإن نبات الفجل لديه القدرة على امتصاص عنصر النحاس Cu في منطقة التلوث A ونقله بشكل فعال من الجذور إلى المجموع الخضري، وغير قادر على امتصاص العنصر في منطقة التلوث B, C. وكان ترتيب متوسطات قيمة معامل التراكم الحيوي (BAF) Bioaccumulation factor للمجموع الجذري لنبات الفجل على النحو الآتي: (Zn:1.18>Cu:0.14>Mn:0.13>Fe:0.04). وقد يشكل ذلك خطراً صحياً على الإنسان بسبب تراكم هذه العناصر في أنسجة النبات ودخوله في السلسلة الغذائية للإنسان.

المقدمة:

تتلوث المياه الجوفية عندما تصلها مياه مرت خلال طبقات التربة بحسب مصادر تغذيتها، وأشهر الملوثات تتمثل بالمواد الكيميائية، الكائنات الحية الدقيقة، الأسمدة الأزوتية والتلوث بالعناصر الثقيلة وأخطرها Hg, Pb, Cd [1]، وبحسب تصنيف الفاو [2] تعتبر العناصر الثقيلة هي الأكثر خطورة على الإنسان وباقي عناصر البيئة، وقد رتبت بالتسلسل الآتي حسب الخطورة: $Zn < V < Cu < Mo < As < Cd < Hg < Pb$. كما ينتمي إلى هذه المجموعة Mn, Fe, Ni, Co, Cr . توجد مصادر متعددة لملوثات المياه الجوفية في حوض صنعاء مثل مقالب النفايات للتجمعات السكانية ومياه الصرف الصحي وسيول مياه الأمطار [3]، ويعد تلوث التربة أو النبات بالعناصر الثقيلة أحد أخطر أنواع التلوث الذي يؤدي إلى مشكلات بيئية وصحية كبيرة [4]. وتعتمد المؤشرات المستخدمة في تقييم نوعية مياه الري على المخاطر التي قد تسببها للتربة ونمو النباتات، وتعتبر السُميّة (Toxicity) من أهم المخاطر التي تسببها المياه ذات الجودة المنخفضة للتربة والنباتات التي تروى بهذه المياه [2]. إن طرح أي فضلات من أي مصدر مثل بعض مخلفات المستشفيات والمنازل ومغاسل السيارات وأماكن تغيير الزيوت ومخلفات الصناعات الورقية ومعامل التصوير وغيرها من الملوثات تنتقل إلى شبكة المجاري العامة أو حفر امتصاصية قريبة من آبار المياه فيؤدي إلى تلوثها مما يشكل خطراً لمن يستخدمها [5].

أجرى مجلس حماية البيئة [6] دراسة لتأثير مقلب القمامة على حوض صنعاء، حيث بينت أنه لا توجد مؤشرات واضحة لتلوث مياه الآبار بسبب مقلب النفايات في منطقة الأزرقين. وجد [3] في دراسته حول تقييم التلوث الكيميائي والميكروبي للمياه الجوفية في حوض صنعاء أن هناك تغيرات طفيفة على الكربونات والنيتروجين الامونيومي، كما وجد أن تراكيز العناصر الثقيلة مثل الحديد والرصاص والمنجنيز كانت منخفضة. أشار [7] إلى أن استخدام مياه الصرف الصحي في الزراعة أو تصريفها عبر البيارات يؤدي إلى زيادة تركيز بعض العناصر الكيميائية عن الحد المسموح به في الآبار المجاورة لها، مما يجعلها غير صالحة للشرب أو الري، وأكد [8] أن عدداً من مياه الآبار في منطقة بني الحارث بصنعاء تعاني من ارتفاع في كمية النترات، وأن عدد (5) آبار من أصل (6) قد تلوثت نتيجة لتسرب مياه الصرف الصحي. وتؤكد الدراسة [6] أن برك مياه المجاري تتسبب في تردي نوعية مياه الآبار كيميائياً وبكتيريولوجياً. وأن النشاط الزراعي يعد مصدراً للملوثات الكيميائية والميكروبية (أسمدة ومبيدات وهرمونات وغيرها) الذي يضاف للمياه الجارية المتدفقة مع مياه السيول. ويشير [3] إلى أن مياه الصرف الزراعي مع مياه السيول الجارفة تلوث مياه الآبار بسبب ما تسحب معها من الأسمدة والمبيدات. أوضحت [9] أن تراكم المعادن الثقيلة في التربة يمكن أن ينتقل إلى النباتات الصالحة للأكل ومنها يمكن أن تنتقل إلى الإنسان وتسبب له تأثيراً سميّاً أو سرطانات، ويرى [10] أنه يمكن



النباتات بسهولة بحرقها ثم التخلص الآمن من رمادها [13]، إن دراسة سلوك العناصر الثقيلة يعطي دلالة واسعة لتيسر حركة هذه العناصر وتراكمها في التربة والنبات [11]، ومعرفة كفاءة المعالجة النباتية Phytoremediation Efficiency لبعض الأدلة النباتية - كالفجل - المتكيفة مع البيئة التي يعيش فيها تسمى بالتراكم Accumulation، وتعد هذه الظاهرة إحدى الأساليب الدفاعية لمقاومة سُمية العناصر الثقيلة داخل أنسجة النبات [14]. تعدّ وكالة حماية البيئة الأمريكية أن معامل التراكم (AC) Accumulation coefficient مصطلح خاص للتعبير عن النسبة بين تركيز الملوث في الكتلة الحيوية للنبات إلى تركيز ذات العنصر في التربة [15]، في حين يعتبره [11] مصطلحاً عاماً للتعبير عن انتقال العناصر الثقيلة بين التربة والنبات. إن معامل التراكم الحيوي (BAC) Bioaccumulation coefficient مصطلح يستخدم لتحديد كفاءة تراكم المعادن الثقيلة في النباتات من خلال مقارنة التركيز في أجزاء النبات (الجذور والساق والأوراق) والوسيط الخارجي مثل التربة، وهناك أيضاً معامل تراكم آخر اسمه معامل التراكم الحيوي (BAF) Bioaccumulation factor وهو مصطلح للتعبير عن قدرة النبات على امتصاص العناصر الثقيلة من التربة [12]. لذا استخدم هذا المؤشر في هذا البحث للتعبير عن

تصنيف النباتات على وفق استجابتها لوجود العناصر الثقيلة في التربة إلى ثلاث فئات هي: الأولى النباتات المستبعدة (المتجنبة) Excluders وهي نباتات تتقاضي امتصاص العناصر الثقيلة عند الحد الممكن لها دون التأثير بكمية هذه العناصر في التربة، سواء كانت عالية أو منخفضة، الثانية النباتات المراكمة Accumulators، وهي نباتات تتراكم العناصر الثقيلة داخلها دون التأثير بكمية هذه العناصر في التربة، سواء كانت عالية أو منخفضة، الثالثة النباتات الدالة Indicators، وهي النباتات التي يكون تركيز العناصر الثقيلة داخلها يعكس تركيز هذه العناصر في التربة أو يساويه. كما يمكن استغلال النباتات المراكمة والنباتات الدالة في عملية استصلاح وإعادة تأهيل الترب الملوثة بالعناصر الثقيلة، ويسمى هذا النوع من الاستصلاح بالاستصلاح بالامتصاص الحيوي (Phytoremediation)، إذ تعمل هذه النباتات على إزالة العناصر من التربة أو التقليل من تأثيرها السلبي [11]. يأتي مصطلح كفاءة المعالجة النباتية Phytoremediation Efficiency، التي يمكن التعبير عنها بمعامل التراكم الحيوي (BAF) Bioaccumulation factor ومعامل الانتقال (TF) Translocation factor اللذين يحسبان تراكيز المعادن الثقيلة في التربة والنبات [12]. وبعد استخدام النباتات في عملية الاستصلاح الحيوي Phytoremediation يمكن التخلص من هذه

ولأن هذه المناطق يسكنها عدد كبير من السكان والمزارعين وتشمل مساحة زراعية كبيرة وبذلك نساهم في حل مشكلة الأمن الغذائي. حيث يعاني حوض صنعاء من استنزاف جائر للمياه، مع وجود مصادر تلوث مختلفة داخل الحوض، لذلك ركز هذا البحث على الأهداف التالية:

- تقييم تراكيز وسميّة بعض العناصر الثقيلة (Mn, Zn, Fe, Cu) في التربة الزراعية ونبات الفجل عند ريّها بمياه الآبار المتأثرة بالتلوث.
- دراسة سلوك بعض العناصر الثقيلة في التربة ومدى استجابة نبات الفجل لامتناس العناصر الثقيلة نتيجة ريّها بمياه تلك الآبار.

3. المواد وطرائق العمل

أجريت دراسة لتحديد أهم مناطق التلوث في حوض صنعاء (أمانة العاصمة)، وتم تحديد عدد (3) مناطق رئيسة لدراستها في هذا البحث، وهي منطقة الأزرقين - والملوثة بنفايات مقلب المخلفات الصلبة (مقلب القمامة) للمدينة التي يرمز لها في هذه البحث بالحرف (A)، ومنطقة بني الحارث - والملوثة بمياه الصرف الصحي (مياه المجاري) التي يرمز لها بالحرف (B)، ومنطقة الروضة - والمتأثرة بالملوثات التي تحملها سيول الأمطار (مجري السائلة) التي يرمز لها بالحرف (C). تم تعيين عدد (4) آبار من كل منطقة تلوث مدروسة في حوض صنعاء (الموضح مواقعها في الشكل 1)، لدراسة تأثير

معامل التراكم (AC)، معامل الانتقال (TF) Translocation coefficient مصطلح عام للتعبير عن انتقال العناصر الثقيلة بين أجزاء النبات [16]، ويرى [11] أن معامل الانتقال (TF) Translocation coefficient مصطلح للتعبير عن العناصر الثقيلة في نظام التربة إلى النبات لتحديد قدرة النبات على امتصاص العناصر الثقيلة ويعد هذه المؤشر من أهم المؤشرات التي تدل على مدى خطورة دخول العناصر الثقيلة إلى السلسلة الغذائية.

2. فرضيات البحث:

- تنتقل العناصر الثقيلة من مصادر التلوث الثلاثة المدروسة إلى المياه الجوفية ومن ثم إلى التربة والنباتات التي تروى بهذه المياه. وتعمل مصادر التلوث هذه لى تدهور مكونات البيئة من تربة ومياه جوفية ونبات.
- تتراكم العناصر الثقيلة في التربة وتنتقل إلى نبات الفجل وتتراكم فيه وفي أي جزء منه (الجذور أم المجموع الخضري) باعتباره من النباتات الدرنية التي تمتص العناصر الثقيلة لكبر حجم الجذور.
- يمكن إستخدام نبات الفجل كمعالج حيوي رخيص الثمن في إستصلاح الأراضي الزراعية الملوثة بعناصر ثقيلة.



متجانسة (من مزرعة كلية الزراعة) لكافة الوحدات التجريبية ذات قوام (نسجه SCL (Texture، محتواها الرطوبي عند التشبع SP 45% وعند السعة الحقلية FC 26% وعند نقطة الذبول PWP 15.1 %، تم قلبها ونخلها وتنظيفها من أي أحجار كبيرة أو مواد غير مرغوب بها، وبعد ذلك تم صب كمية Kg (5) من الحصى في أسفل الاصيص من أجل التهوية، ومن ثم أضيفت كمية Kg (22) من التربة فوق الحصى في كل اص، وبلغ وزن كل أصيص Kg (27) وبعد ذلك تم ري التربة لبدء عملية الزراعة في اليوم التالي. أضيف سماد مركب 20- 10- 20 مكوّن من النيتروجين والفسفور والبوتاسيوم مرة واحدة، وأضيف gm (30) من السماد المركب لعدد (12) أصيص أي بواقع gm (2.5) / اصيص، حيث إن وزن كل من النيتروجين والفسفور والبوتاسيوم gm (1.4) و gm (0.7) و gm (0.4) على التوالي، وتم اذابة السماد في مياه الري لكل أصيص. تم اتخاذ التدابير اللازمة لحماية النباتات من الآفات والأمراض وفق الممارسات والموصي بها لنبات الفجل، وتم عمل رشّة وقائية لنبات الفجل باستعمال مييد الديازينون المحبب (10) % مادة فعالة وبمقدار (6) لمرّة واحدة خلال فترة الزراعة، وأجريت عملية التعشيب دورياً لكافة الوحدات التجريبية. تمت عملية حصاد كل نبات من كل أصيص بعد تبليل التربة بسهولة اخراج النباتات دون أي ضرر وبالتالي تجميعها في اكياس

مصادر التلوث المختلفة على تركيز العناصر السامة المدروسة (بحسب الإمكانيات المتاحة لنا) علاوة على صفات نوعية وجودة المياه، وتم اختيار بئر واحدة ممثلة بطريقة عشوائية من كل منطقة لغرض ري نبات الفجل في تجربة الاصص، أخذت منها كمية مياه كافية وتخزينها في براميل كبيرة محكمة الاغلاق من أجل تجربة الاصص وري نبات الفجل لدراسة تأثير هذه المياه على تركيز العناصر السامة والثقيلة في التربة والنبات. أجريت تجربة اصص بمزرعة كلية الزراعة بجامعة صنعاء في الموسم الربيعي (فبراير - إبريل) التي استمرت لمدة شهر ونصف بدءاً من الزراعة وحتى الحصاد لزراعة نبات الفجل في ظروف مسيطر عليها تراوحت فيها درجة الحرارة بين 4-35 درجة مئوية وبلغت أعلى كمية إشعاع شمسي خلال فترة التجربة $301.3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{Day}$ وأقل كمية إشعاع كانت $127.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{Day}$. قُسمت كل وحدة تجريبية (اصيص) إلى (4) جور توزعت في شكل مربع، وزرعت بذور الفجل على عمق (1-2) cm تقريباً وبوضع عدد (3) بذور / جورة، ثم خففت إلى نبات واحد في كل جورة خلال (9) أيام من تاريخ الزراعة، وكانت المسافة بين النباتات في كل وحدة تجريبية بين (11-13) cm.

استخدمت أصص بلاستيكية لغرض السيطرة على بيئة نمو نبات الفجل بأبعاد (25) cm طول و (24) عرض و (40)cm ارتفاع. جهزت تربة

النباتات إلى معمل كلية الزراعة، حيث جفّت العينات النباتية بجزأها الخضري والجذري على الهواء حتى ثبات وزنها الجاف. وبعد ذلك طحنت العينات النباتية الجزء الخضري لوحده والجزء الجذري لوحده باستعمال طاحونة كهربائية لكل وحدة تجريبية وخط كل جزء نباتي من كل وحدة تجريبية على حده، ووضعها في أكياس حافظة وترقيمها لغرض تقدير الوزن الجاف لكل من المجموع الخضري والمجموع الجذري لكل وحدة تجريبية. تم أخذ 0.5 gm من كل من المجموع الخضري والمجموع الجذري لكل وحدة تجريبية كل على حده، ثم هضمت (Digestion) العينات النباتية المطحونة وفقاً لما جاء في [18] بإضافة 10 ml حامض الكبريتيك إلى الجفنة ثم تسخينها حتى زوال اللون الأسود وتحوله إلى رماد، ثم ترك ليبرد، ثم أضيف 2 ml حامض البير كلوريك، وفق طريقة [21] ويرشح ويخفف إلى 50 ml بالماء المقطر. أخيراً نقلت العينات إلى المختبر لأخذ قراءة العناصر الثقيلة (Fe, Zn, Mn, Cu) بجهاز امتصاص الطيف الذري Atomic Absorption Spectrophotometer وفق طريقة Black & Hartge [22].

بلاستيكية ونقلها إلى المعمل، حيث نظفت بماء نظيف وجففت وفردت على أوراق بيضاء لإجراء القياسات المطلوبة. وتم ري كل أصيص بكمية مياه مقدرة بـ (16,880 ml) خلال (46) يوم حسب معادلة بنمان مونتيث [17]. تم تحليل مياه الآبار المدروسة بحسب الطرق الواردة في [4] ونتائج تحليل مواصفات المياه المدروسة موضحة في الجدول رقم (1). تم جمع عينة التربة قبل وبعد الزراعة لكل وحدة تجريبية بعد خلط ومزج كل وحدة على حده من أجل تداخل التربة مع بعضها للتعبير عن كل واحدة بشكل عام وهي على عمق (0-40 cm)، ثم نقلت التربة إلى معمل كلية الزراعة ليتم تجفيفها هوائياً، ثم نخل التربة بمنخل 2 mm ووضعها في أكياس حافظة وترقيمها ونقلها للمختبر من أجل تحليلها. وأخذ 2 gm من كل عينة تربة لكل وحدة تجريبية، ثم هضمت (Digestion) وفقاً لما جاء في [18] بإضافة 10 ml حامض الكبريتيك إلى الجفنة، ثم تسخينها حتى زوال اللون الأسود وتحوله إلى رماد، ثم يترك ليبرد وإضافة 2 ml حامض البركلوريك، وفقاً لطريقة [7] ويرشح ويخفف إلى 50 ml بالماء المقطر. أخيراً نقلت العينات إلى المختبر وأخذت قراءة العناصر الثقيلة (Fe, Zn, Mn, Cu) بجهاز امتصاص الطيف الذري Atomic Absorption Spectrophotometer وفقاً لطريقة [19]. جمعت النباتات من كل وحدة تجريبية وغسلت بماء نظيف للتخلص من التربة المتبقية فيها، ثم بماء مقطر لإزالة أي أغبرة عالقة عليها وفق توصيات [20]، ثم نقلت

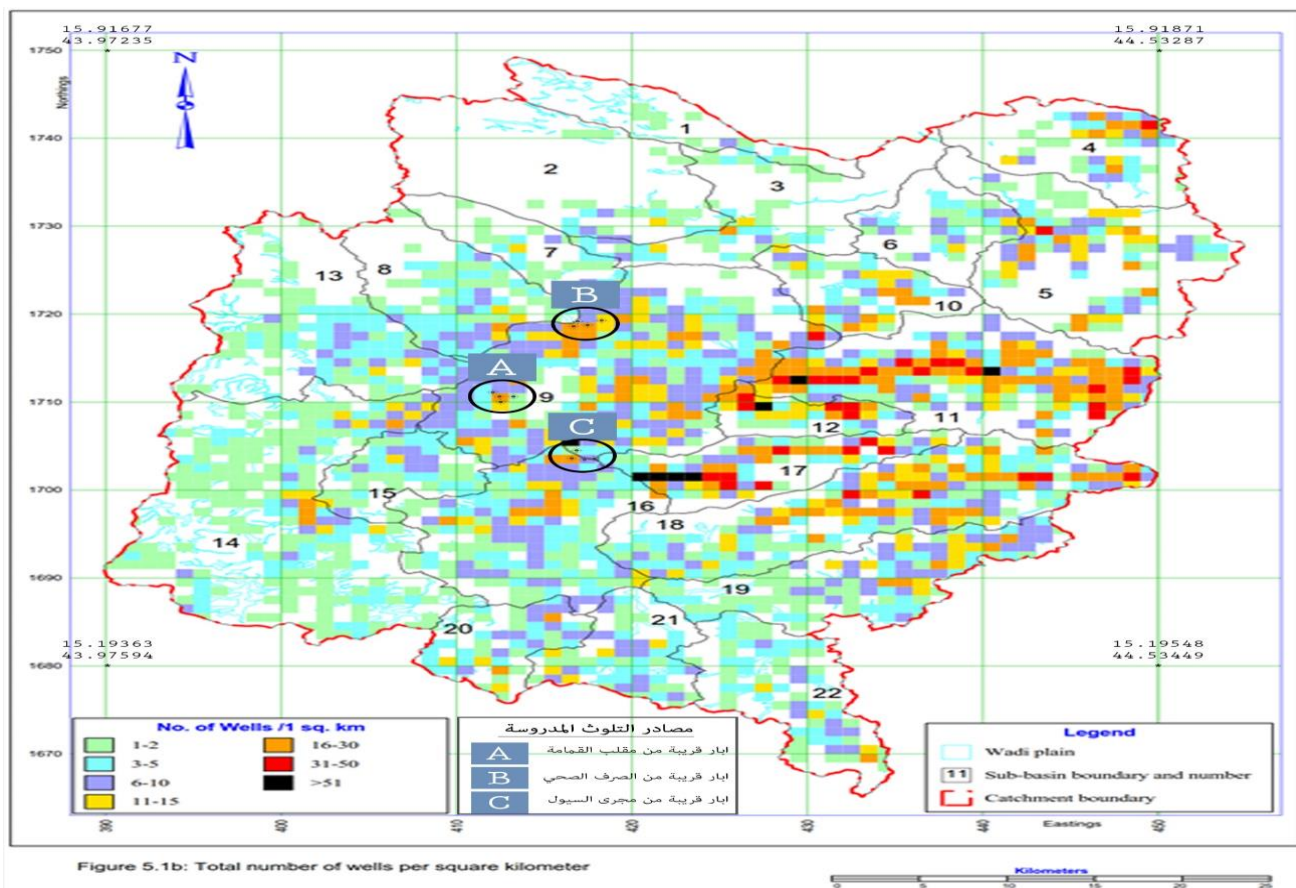


Figure 5.1b: Total number of wells per square kilometer

شكل رقم 1 خريطة توضح مواقع الآبار ومناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء

اقترحه [23]. تم حساب قيمة معامل الوفرة (EF) عبر المعادلة الآتية التي وردت في [24 و 11]:

$$EF = \frac{(Cx/CFe)_{\text{sediment}}}{(Cx/CFe)_{\text{Earth's crust}}}$$

حيث $(Cx/CFe)_{\text{sediment}}$ يمثل نسبة تركيز العنصر Cx إلى تركيز عنصر الحديد CFe في العينة المراد معرفة مدى تلوثها، كما يمثل $(Cx/CFe)_{\text{Earth's crust}}$ نسبة تركيز مرجعية للعنصر إلى نسبة تركيز الحديد في القشرة الأرضية، إذ تم اعتماد عنصر الحديد مرجعية لتقدير معامل

• حساب معامل الوفرة (EF) Enrichment Factor

لتقييم تلوث التربة بشكل أوسع، يمكن تقدير درجة تلوث التربة بالعناصر الثقيلة عبر استخدام معامل الوفرة (EF) Enrichment Factor، ومعامل الوفرة أو عامل الإغناء (EF) Enrichment factor هو مؤشر لتقدير حجم تلوث التربة بالعناصر أو المعادن الثقيلة بسبب النشاط البشري وما مستوى ذاك التلوث في التربة ويقدر وفقاً لما

• حساب معامل الانتقال (TF)

Translocation factor

معامل الانتقال (TF) Translocation factor مصطلح مفضل لتقدير كفاءة استخلاص المعادن لكل نبات أو لكل جزء في النبات [29]، وهو تقدير المعادن في الجذر إلى المجموع الخضري في النبات وتم احتسابه عبر المعادلة الآتية:

$TF = \frac{C_s}{C_r}$ حيث C_s و C_r تمثل تركيز المعادن بالـ mg/Kg في المجموع الخضري والجذر على التوالي، وتشير قيمة $TF < 1$ إلى أن النبات ينقل المعادن الثقيلة بشكل فعال من الجذور إلى المجموع الخضري وفق ما جاء عند [30].

4. التحليل الإحصائي Statistical Analysis

اختبار اعتدال البيانات أو التوزيع الطبيعي للبيانات (Tests of Normality) باختبار كولموغوروف-سميرنوف Kolmogorov-Smirnov واختبار شابيرو-ويلك Shapiro-Wilk، واختبار تجانس البيانات (Test of Homogeneity of Variance) باختبار ليفيني Levene، وذلك لتمييز الاختبارات المعلمية عن الاختبارات غير المعلمية. حيث تم استخدام تحليل التباين للبيانات التي حققت شروط الاختبارات المعلمية (Analysis of Variance) Test ANOVA، وللبيانات التي لم تحقق شروط الاختبارات المعلمية استخدم اختبار Kruskal-Wallis H، وذلك لمعرفة هل هناك فرق معنوي بين معاملات الدراسة أم لا. كما استخدمت الدراسة اختبار أقل فرق معنوي (Least Significant

الوفرة EF في هذه الدراسة، وهناك مراجع يمكن أن يكون مرجع عنصر التلوث فيه (Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd) الناشئة عن طبقة الرواسب الساحلية [25]، وأكثر العناصر المرجعية شهرة هي (Fe) و (Mn) و (Al) و (Sc) [26].

• حساب معامل التراكم الحيوي (BAF)

Bioaccumulation factor

معامل التراكم الحيوي (BAF) Bioaccumulation factor مصطلح للتعبير عن قدرة النبات على امتصاص العناصر الثقيلة من التربة [12]، وتم حساب معامل التراكم الحيوي (BAF) في المعادلة الآتية:

$$BAF \text{ shoot} = (C \text{ shoot}) / (C \text{ soil})$$

$$BAF \text{ root} = \frac{C \text{ root}}{C \text{ soil}}$$

حيث تمثل $C \text{ shoot}$ و $C \text{ root}$ و $C \text{ soil}$ تركيزات المعادن في الجزء العلوي من النبات والجذور والتربة على التوالي، ووفقاً لما ورد عند [27] و [28] فإنه يمكن تصنيف قيمة BAF على النحو الآتي: إذا كانت قيمة $BAF > 1$ فهي تعد نباتات مستبعدة (المتجنبة) Excluder، وإذا كانت قيمة BAF بين 1-10 فهي تعد نباتات مراكمة Accumulator، وإذا كانت قيمة $BAF < 10$ فهي تعد نباتات بالغة التراكم hyper accumulator.

تحقق شروط الاختبار المعلمية استخدم تحليل سبيرمان Spearman، وذلك لقياس مدى وجود ارتباط بين المتغيرات ومقدار الارتباطات في حالة تواجدها (الموضحة في الملحقات 1 و 2 و 3).

4. النتائج والمناقشة

• تقييم سُميّة العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) في مياه الآبار

تم استخدام اختبار اعتدالية توزيع البيانات باستخدام معادلتَي كولموغوروف - سميرونوف Kolmogorov-Smirnov ومعادلة شاببيرو- ويلك Shapiro-Wilk وأوضح أن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي. وتبين نتائج الجدول رقم (1) أن عنصري (Fe, Mn) كانا الأكثر تركيزاً في آبار منطقة التلوث بالقمامة (مقلب الأزرقين A) مقارنة بآبار المنطقة (B) و (C)، وربما يعود السبب إلى احتواء القمامة على خردوات ومواد معدنية حاوية على هذين العنصرين. أما تواجد (Cu) بتركيز أعلى في منطقة بني الحارث (الصرف الصحي B) فقد يعود إلى استخدام المواد النحاسية والأنابيب التي تحتوي على عنصر النحاس. وربما يعود السبب في احتواء آبار منطقة الروضة (السائلة C) أعلى تركيز لعنصر (Zn) إلى أن مياه السيول تجري عبر الترب الزراعية التي تستخدم فيها الأسمدة والمبيدات المحتوية على الزنك. أشارت منظمة FAO إلى أن التركيزات المفرطة من الفلزات الثقيلة في مياه الري سوف تسبب تراكماً غير مرغوب

(Difference) LSD لمقارنة معنوية الفروق بين المتوسطات المعاملات في حالة وجود فرق معنوي بين المعاملات. معامل الارتباط (r) للبيانات التي حققت شروط الاختبارات المعلمية استخدم تحليل بيرسون Person وللبيانات التي لم تحقق شروط الاختبار المعلمية استخدم تحليل سبيرمان Spearman، وذلك لقياس مدى وجود ارتباط بين المتغيرات ودرجة الارتباطات في حالة تواجدها. أجريت تجربة الاصص بتصميم القطاعات العشوائية الكاملة (RCBD) بواقع (3) مكررات لكل منطقة تلوث مدروسة، إذ تم تحديد نوع المتغيرات التابعة Dependent Variables والمتغيرات المستقلة Independent Variables لكل مرحلة في هذا البحث. جرت عملية تجميع كافة بيانات الدراسة وترتيبها باستخدام الحاسوب الآلي ببرنامج إكسل ميكروسوفت اصدار 2016، ومن ثم حللت نتائج الدراسة احصائياً عبر برنامج تحليل البيانات الإحصائي SPSS اصدار رقم 25، إذ تم تطبيق جميع الاختبارات والقياسات الاحصائية عند مستوى معنوية 0.05 وهي على النحو الآتي:

كما تم استخدام اختبار أقل فرق معنوي (Least Significant Difference) LSD لمقارنة معنوية الفروق بين المتوسطات المعاملات في حال وجود فرق معنوي بين المعاملات. ولحساب معامل الارتباط (r) للبيانات التي حققت شروط الاختبارات المعلمية تم استخدام تحليل بيرسون Person، وللبيانات التي لم

Mn ويقل تركيز Zn، وعندما يزيد تركيز Zn في مياه الري، فإن تركيز Mn يقل.

• تقييم التلوث بالعناصر الثقيلة (Fe و Cu)

و Zn و Mn) في التربة الزراعية mg/Kg

تظهر النتائج في جدول رقم (3) أن تركيز العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) في التربة قبل الزراعة أقل من تركيزها بعد الزراعة في جميع مواقع الزراعة المروية بمياه من مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء، ومن الملاحظ أن كمية تركيز Fe و Mn تراكمت في التربة بعد الزراعة، في جميع المواقع المدروسة بحوالي ثلاثة أضعاف إلى ضعفين ونصف كميتها قبل الزراعة أي (279) % لـ Fe و (245) % لـ Mn، في حين أن كمية Cu و Zn في أغلب مواقع الزراعة المدروسة زادت في التربة بعد زراعة الفجل بنسبة (32) % و 59% على التوالي. وكانت أقل نسبة لزيادة تركيز العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) في التربة الزراعية قبل وبعد زراعتها لعنصر Cu عند موقع الزراعة المروي من منطقة التلوث A بنسبة (6) %، في حين كانت أكبر نسبة لعنصر Fe عند موقع الزراعة المروي من منطقة التلوث C بنسبة (310) %، وقد ظهر أن هناك ارتباطاً معنوياً عكسياً بين تركيز Cu في مياه الري مع تركيز Zn في التربة بعد الزراعة ($r = -0.74$) أي أن زيادة تركيز Cu في مياه الري يقلل تركيز Zn في التربة (ملحق 2).

به في أنسجة النبات والحد من النمو، كما أن (Zn, Cu) تعتبر من أخطر العناصر الثقيلة على الرغم من أنها عناصر أساسية للجسم إلا أن تراكيزها العالية يمكن أن تسبب تسمماً وتأثيرات صحية سلبية [31].

وبحسب تصنيف FAO والمواصفات اليمينية تبين نتائج الجدول 2 أن تركيز العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn) في مياه الآبار لم تتجاوز الحدود المسموح بها للري، ولم يكن هناك فروق معنوية بين مياه الآبار المدروسة والقريبة من مصادر التلوث المختلفة. ولا توجد علاقة ارتباط بين تركيز Fe وتركيز HCO_3 ، في حين ظهر أن هناك علاقة ارتباط معنوية بين تركيز Cu وكل من pH و Ca و Mg و RSC بقيمة ارتباط (r) -0.61 و 0.66 و 0.69 و -0.71 على التوالي (ملحق 1).

• تقييم سمية العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn)

و Mn) في التربة الزراعية ونبات الفجل عند استخدام مياه آبار من مناطق التلوث المدروسة بحوض صنعاء

أظهرت نتائج التحليل الإحصائي ملحق (2) أن هناك ارتباطاً معنوياً عالٍ بين تركيز Fe مع تركيز Zn و Mn في مياه الري التي استخدمت في ري نبات الفجل بقوة ارتباط (r) -1.0 و 1.0 على التوالي، كما تبين أن هناك ارتباطاً معنوياً عالٍ بين تركيز Zn في المياه وتركيز Mn بقوة ارتباط (r) -1.0، وهذا يدل على أنه كلما زاد تركيز Fe في مياه الري، يزيد معه

جدول (1) نتائج بعض التحليل الكيميائي والفيزيائي في مياه آبار المناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء المستخدمة في ري نبات الفجل



تأثير الري بمياه آبار حوض صنعاء القريية من مصادر تلوث مختلفة على بعض العناصر الثقيلة في التربة ونبات الفجل

مياه من منطقة التلوث C	مياه من منطقة التلوث B	مياه من منطقة التلوث A	الوحدة	مياه من مناطق التلوث في حوض صنعاء والصفات المدروسة	
7.45	7.09	7.57	-	pH	المؤشرات الرئيسية
322	2472	367	mg/l	TDS	
0.52	4.24	0.6	dS/m	EC	
3	29.4	2.45	meq/l	Ca ²⁺	الكاتيونات Cations
1.19	8.01	1.57	meq/l	Mg ²⁺	
1.07	5.05	1.86	meq/l	Na ⁺	
0.09	0.16	0.15	meq/l	K ⁺	
3.6	5.67	3.07	meq/l	HCO ₃ ⁻	الأيونات Anions
0.14	0.78	0.17	meq/l	CO ₃ ²⁻	
2.4	21.4	1.6	meq/l	Cl ⁻	
0.74	1.17	1.31	--	SAR	مؤشرات جودة المياه
0.88	1.82	1.45	--	adj.SAR	
-0.4	-31	-0.8	meq/l	RSC	
0.03	0.06	0.09	mg/l	Fe	بعض العناصر الثقيلة
0.01	0.03	0.02	mg/l	Cu	
0.08	0.03	0.01	mg/l	Zn	
0.06	0.07	0.15	mg/l	Mn	

A = الأزرقين (مقلب نفاية المدينة) ، B = بتي الحارث (مجري الصرف الصحي) ، C = الروضة (مجرى سيول الأمطار) رقم عريض = أكبر قيمة ، رقم تحت خط = أصغر قيمة

- تقدير معامل الوفرة (EF) للترب الزراعية عند استخدام مياه الآبار المدروسة لري نبات الفجل

إن النتائج في جدول رقم (4) توضح أن قيمة EF لعناصر Fe و Zn و Mn في جميع مواقع الزراعة التي تم استخدام مياه الري من مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء أقل من (2)، وهذا يدل على أن لا وفرة في هذه العناصر في التربة الزراعية التي استخدمت مياه الري من مناطق التلوث المدروسة، عدا عنصر Zn في موقع زراعة واحد فقط الذي استخدمت

ولم تظهر النتائج وجود فرق معنوي (عند مستوى 0.05) للعناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) في التربة المروية بمياه آبار مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء بعد زراعة نبات الفجل، ولم تتجاوز جميع العناصر الثقيلة المدروسة في التربة قبل وبعد زراعة نبات الفجل الحدود المسموح بها وفق منظمة الصحة العالمية والواردة في [22] وهذا يدل على أنه لا يوجد تلوث بالعناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) حتى الآن عند استخدام أي مياه آبار من مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء ولكنه قد يحدث مستقبلاً بسبب عامل التراكم.

• تقييم التلوث ببعض العناصر الثقيلة (Fe)

Cu و Zn و Mn) في نبات الفجل mg/Kg

توضح النتائج في جدول رقم (5) عدم وجود فرق معنوي عند مستوى (0.05) لتركيز العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) في المجموع الخضري لنبات الفجل عند استخدام مياه آبار من مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء، وهذه النتائج تتوافق مع نتائج [33]. في عدم وجود فرق معنوي لتركيز عناصر Fe و Zn و Mn في أوراق نبات الفجل عند استخدام نوعية مياه ري مختلفة. كما تبين النتائج - في الجدول نفسه - عدم وجود فرق معنوي عند مستوى 0.05 لتركيز العناصر الثقيلة (Cu و Zn و Mn) في المجموع الجذري لنبات الفجل، ولكن يوجد فرق معنوي لتركيز عنصر Fe في المجموع الجذري للنبات نفسه عند استخدام المياه المدروسة، وكانت أكبر قيمة لتركيز عنصر Fe في المجموع الجذري (533.17) mg/Kg عند استخدام مياه ري من منطقة التلوث B (مجري الصرف الصحي)، وكان أقل تركيز لعنصر Fe في المجموع الجذري لنبات الفجل (496.43) mg/Kg عند استخدام مياه ري من منطقة التلوث A (مقلب قمامة المدينة).

مياه الري من مناطق منطقة التلوث C وبلغ قيمة الـ EF فيها (2.05)، وهذا يعبر عن وجود العنصر بتركيز متوسط في هذا الموقع. كما تبين النتائج بذات الجدول أن قيمة الـ EF لعنصر Cu في موقع الزراعة الذي روي بمياه من منطقة التلوث A ومنطقة التلوث C بلغت (3.5) و (3.9) على التوالي، وهذا يدل على أن عنصر Cu في هذين الموقعين المروية بمياه قريبة من منطقتي التلوث A و C متوفر بتركيز متوسط، في حين أن موقع الزراعة المروي بمياه من منطقة التلوث B، كان قيمة الـ EF فيها (5.2) أكثر من موقع الزراعة المروي بمياه من منطقة التلوث A و C، وهذا يدل على أن جميع المياه المأخوذة من مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء وخاصة مياه منطقة التلوث B لها دور في وجود عنصر Cu معنوياً في التربة الزراعية بعد استخدام المياه للري. ويعزى ذلك إلى زيادة Cu في آبار منطقة الصرف الصحي ببني الحارث B (جدول 1) الذي قد يعود إلى استخدام المواد النحاسية والأنابيب التي تحتوي على عنصر النحاس. وعلى وجه العموم، فإن توفر العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) في التربة الزراعية التي تم ريها بمياه من مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء وتم زراعة نبات الفجل فيها، كان ترتيب العناصر الثقيلة وفق قيمة الـ EF كالآتي - ومرتبة من الأكبر إلى الأصغر -: نحاس ثم زنك ثم منجنيز ثم حديد (Fe>Mn>Zn>Cu).



تأثير الري بمياه آبار حوض صنعاء القريبية من مصادر تلوث مختلفة على بعض العناصر الثقيلة في التربة ونبات القفل

جدول رقم 2: تأثير مناطق التلوث المدروسة بحوض صنعاء في تركيز عناصر الحديد (Fe) والنحاس (Cu) والزنك (Zn) mg/l في مياه الآبار

منطقة التلوث المدروسة	رقم البئر	تركيز الحديد (Fe) mg/l	تقييم صلاحية مياه الري وفق منظمة الأغذية والزراعة FAO	القيمة المسموحة	تركيز النحاس (Cu) mg/l	تقييم صلاحية مياه الري وفق منظمة الأغذية والزراعة FAO	القيمة المسموحة	تركيز الزنك (Zn) mg/l	تقييم صلاحية مياه الري وفق منظمة الأغذية والزراعة FAO	القيمة المسموحة
				5.0 – 0.0			0.2 – 0.0			2.0 – 0.0
منطقة الأزرقين (تلوث مقلب نفايات المدينة)	1	0.06	لا توجد مشكلة	0.01	لا توجد مشكلة	0.14	لا توجد مشكلة			
	2	0.10	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.04	لا توجد مشكلة			
	3	0.28	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة			
	4	0.09	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.01	لا توجد مشكلة			
منطقة بني الحارث (مجارى الصرف الصحي)	1	0.06	لا توجد مشكلة	0.03	لا توجد مشكلة	0.03	لا توجد مشكلة			
	2	0.05	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.06	لا توجد مشكلة			
	3	0.03	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.07	لا توجد مشكلة			
	4	0.04	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.07	لا توجد مشكلة			
منطقة الروضة (مجرى سيول الأمطار)	1	0.03	لا توجد مشكلة	0.01	لا توجد مشكلة	0.08	لا توجد مشكلة			
	2	0.04	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة			
	3	0.06	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.12	لا توجد مشكلة			
	4	0.08	لا توجد مشكلة	0.02	لا توجد مشكلة	0.05	لا توجد مشكلة			
متوسط منطقة التلوث المدروسة										
منطقة الأزرقين	0.13 a	لا توجد مشكلة	0.02 a	لا توجد مشكلة	0.05 a	لا توجد مشكلة				
منطقة بني الحارث	0.05 a	لا توجد مشكلة	0.02 a	لا توجد مشكلة	0.06 a	لا توجد مشكلة				
منطقة الروضة	0.05 a	لا توجد مشكلة	0.02 a	لا توجد مشكلة	0.07 a	لا توجد مشكلة				
متوسط مناطق التلوث المدروسة	0.08 NS	لا توجد مشكلة	0.02 NS	لا توجد مشكلة	0.06 NS	لا توجد مشكلة				
LSD=0.05	0.080	أقل فرق معنوي عند مستوى احتمالية 0.05	0.005	أقل فرق معنوي عند مستوى احتمالية 0.05	0.015	أقل فرق معنوي عند مستوى احتمالية 0.05				

الرقم العريض = أكبر قيمة بين الآبار، الرقم الذي تحته خط = أصغر قيمة بين الآبار،
تدل الأحرف الإنجليزية الصغيرة المختلفة ضمن عمود متوسطات منطقة التلوث بوجود فروق معنوية عند مستوى احتمالية 0.05
* = وجود فروق معنوية عند مستوى احتمالية 0.05 بين كافة المتوسطات للصفة المدروسة، NS = لا يوجد فرق معنوي



جدول (3) تأثير مياه الآبار من مناطق التلوث المدروسة بحوض صنعاء في تركيز بعض العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) في التربة التربة (وزن جاف) وحدود السمية المسموح بها mg/Kg

المسموح به **	الحد	المتوسط العام LSD _{0.05}	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث C	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث B	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث A	مياه مناطق التلوث المدروسة والصفات المدروسة	تركيز العنصر في التربة قبل الزراعة (mg/Kg)
37.000	3.398	3.398				الحديد (Fe)	
100	39.09	39.09				النحاس (Cu)	
300	28.38	28.38				الزنك (Zn)	
2.000	85.34	85.34				المنجنيز (Mn)	
37.000	12.904 ± 1.427 LSD = 1.682	13.969 a ± 1.627	12.457 a ± 1.020	12.287 a ± 1.374	NS الحديد (Fe)		
100	51.85 ± 19.716 LSD = 10.55	51.94 a ± 31.67	62.22 a ± 14.82	41.39 a ± 2.55	NS النحاس (Cu)		
300	45.21 ± 21.056 LSD = 12.67	58.28 a ± 33.03	31.75 a ± 0.95	45.61 a ± 12.38	NS الزنك (Zn)		
2.000	295.09 ± 27.749 LSD = 8.61	298.89 a ± 26.99	296.11 a ± 39.06	290.28 a ± 27.71	NS المنجنيز (Mn)		
<p>A = مقلب نفاية المدينة، B = مجاري الصرف الصحي، C = مجرى سيول الأمطار * = وجود فروق معنوية عند مستوى احتمالية 0.05 بين كافة المتوسطات للصفة المدروسة، NS = لا يوجد فرق معنوي تدل الأحرف الإنجليزية الصغيرة المختلفة ضمن الصف الواحد بوجود فروق معنوية بين المتوسطات عند مستوى احتمالية 0.05 ± = الانحراف المعياري SD، رقم عريض = أكبر قيمة، رقم تحت خط = أصغر قيمة ** بحسب منظمة الصحة العالمية (WHO) وفق ما ورد في [22] و [32]</p>							

جدول (4) تأثير مياه آبار من مناطق التلوث المدروسة بحوض صنعاء في معامل الوفرة بمرجعية عنصر Fe

متوسط نبات الفجل (الترتيب)	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث C	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث B	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث A	مياه مناطق التلوث المدروسة والصفة المدروسة للعناصر الثقيلة	درجة تلوث التربة بالعنصر الثقيل (معامل الوفرة) (EF) Enrichment Factor
1.00 (4)	1	1	1	الحديد (Fe)	
4.18 (1)	3.86	5.18	3.5	النحاس (Cu)	
1.71 (2)	2.05	1.25	1.82	الزنك (Zn)	
1.26 (3)	1.18	1.31	1.3	المنجنيز (Mn)	
<p>A = مقلب نفاية المدينة، B = مجاري الصرف الصحي، C = مجرى سيول الأمطار (رقم) = ترتيب العنصر تصاعدياً.</p>					



الفاصوليا السوداء، وبراعم الفجل الأبيض)، ونوع واحد حساس (براعم البازلاء). كما بين أن سبانخ الماء ذات أوراق الصفصاف والخضراوات الورقية منخفضة التحمل (مثل براعم البازلاء) تنتمي إلى النوع المتجنب، حيث تحتوي على نسبة منخفضة من العناصر الثقيلة في كل من البراعم والجذور. قد ينبع ذلك من آلياتها الفعالة لإخراج العناصر الثقيلة أو قدرتها المنخفضة على امتصاصها. وضح التحليل الإحصائي (ملحق 3) أن هناك ارتباطاً معنوياً عكسياً بين تركيز عنصر المنجنيز في النبات وتركيز الملوحة في مياه الري بقوة ارتباط $(r = -0.77)$ ، أي كلما زادت تراكيز الملوحة في مياه الري، قلّ تركيز المنجنيز في نبات الفجل. إن مثل هذه النتائج تتفق مع ما توصل إليه [35] أن محتوى مياه المجاري المعالجة (عالية الملوحة) من العناصر السامة (Zn, Cu) كانت أعلى من الحدود القصوى لتلوث التربة وسمية النبات مقارنة بمياه المساجد والمياه الجوفية. من جانب آخر عثر [36] على مستويات عالية من العناصر الثقيلة (Cr, Ni, Pb, Cd)، بالإضافة إلى البوتاسيوم والكالسيوم والمغنيسيوم، في السبانخ. وبالنظر إلى تركيز العناصر الثقيلة في كلٍّ من المجموع الخضري والمجموع الجذري لنبات الفجل، فإن تركيز (Fe و Cu و Zn و Mn) في جميع مواقع الزراعة المروية بمياه آبار من مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء

وعند دراسة تراكيز العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) لكافة نبات الفجل (المجموع الخضري والجذري معا) بينت نتائج جدول رقم (5) أنه لا يوجد فرق معنوي لتراكيز كل من Fe و Cu و Zn عند استخدام مياه آبار من مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء، ولكن يوجد فرق معنوي عند معنوية (0.05) لتركيز عنصر Mn في نبات الفجل بشكل كامل (مجموع خضري ومجموع جذري)، إذ كانت أكبر قيمة لتركيز عنصر Mn عند استخدام مياه الري الواقعة في منطقة التلوث C والمتمثلة بمجرى سيول الأمطار، وأقل قيمة لتركيز عنصر Mn عند استخدام مياه الري الواقعة في منطقة التلوث B والمتمثلة بمجاري الصرف الصحي. ومن الملاحظ أن تركيز جميع العناصر المدروسة في جميع مواقع الزراعة في مجموع الجذور أكبر من تركيز العناصر في المجموع الورقي بنسبة (44) % لجميع العناصر المدروسة، عدا عنصر النحاس في موقع الزراعة المروي بمياه آبار منطقة التلوث بنفاية المدينة A. حيث كان تركيز النحاس في المجموع الخضري أكبر من تركيزه في المجموع الجذري بنسبة 4%. وبحسب ما ذكر [34] بأن ذلك قد يكون مرتبطاً ببيئة الجذور، أو إفرازاتها، أو خصائص فسيولوجية أخرى. حيث أوضح في دراسته أن هناك ثلاثة أنواع من الخضراوات الورقية عالية التحمل (باك تشوي، الملفوف الثلجي، تاكياكي)، وأربعة أنواع متوسطة التحمل (يو ماي كاي، السبانخ المائي، براعم



جدول (5) تأثير مياه آبار من مناطق التلوث المدروسة بحوض صنعاء في تركيز العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) داخل

نبات الفجل (وزن جاف) mg/Kg

الحـد المسموح به **	المتوسط العـام LSD _{0.05}	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار الواقعة في منطقة التلوث C	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار الواقعة في منطقة التلوث B	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار الواقعة في منطقة التلوث A	مياه مناطق التلوث المدروسة والصفات المدروسة لكل عنصر ثقيل	
1.000	356.31 ± 36.06 LSD = 23.12	349.1 ab ± 46.10	371.47 a ± 50.58	348.35 a ± 1.15	الحديد ^{NS} (Fe)	تركيز العنصر في المجموع الخضري للنبات (mg/Kg)
73	7.28 ± 0.73 LSD = 0.80	6.8 b ± 0.10	7.43 ab ± 1.16	7.6 a ± 0.52	النحاس ^{NS} (Cu)	
100	35.51 ± 2.50 LSD = 2.67	33.77 a ± 2.70	36.33 a ± 2.72	36.43 a ± 1.89	الزنك ^{NS} (Zn)	
200	21.39 ± 2.23 LSD = 3.57	21.27 a ± 0.49	19.67 a ± 2.80	23.23 a ± 1.50	المنجنيز ^{NS} (Mn)	
1.000	513.03 ± 19.66 LSD = 36.73	509.5 a ± 6.85	533.17 b ± 11.68	496.43 a ± 17.95	* الحديد (Fe)	تركيز العنصر في المجموع الجزري للنبات (mg/Kg)
73	7.83 ± 0.65 LSD = 1.03	8.33 b ± 0.50	7.87 ab ± 0.72	7.3 a ± 0.35	النحاس ^{NS} (Cu)	
100	50.50 ± 3.66 LSD = 3.27	51.87 a ± 6.00	51.03 a ± 2.40	48.6 a ± 1.75	الزنك ^{NS} (Zn)	
200	38.42 ± 3.41 LSD = 5.77	41.3 b ± 1.35	38.43 ab ± 3.02	35.53 a ± 3.27	المنجنيز ^{NS} (Mn)	
1.000	434.67 ± 23.62 LSD = 29.92	429.30 a ± 25.73	452.32 a ± 27.51	422.39 a ± 8.70	الحديد ^{NS} (Fe)	متوسط تركيز العنصر في النبات (mg/Kg)
73	7.56 ± 0.24 LSD = 0.20	7.57 a ± 0.23	7.65 a ± 0.30	7.45 a ± 0.23	النحاس ^{NS} (Cu)	
100	43.01 ± 2.10 LSD = 1.17	42.82 a ± 3.35	43.68 a ± 2.20	42.52 a ± 0.63	الزنك ^{NS} (Zn)	
200	29.91 ± 1.18 LSD = 2.23	31.28 b ± 0.51	29.05 a ± 0.38	29.38 a ± 0.89	* المنجنيز (Mn)	
A = مقلب نفاية المدينة، B = مجاري الصرف الصحي، C = مجرى سيول الأمطار						
* = وجود فروق معنوية عند مستوى احتمالية 0.05 بين كافة المتوسطات للصفة المدروسة، ^{NS} = لا يوجد فرق معنوي						
تدل الأحرف الإنجليزية الصغيرة المختلفة ضمن الصف الواحد بوجود فروق معنوية بين المتوسطات عند مستوى احتمالية 0.05						
± = الانحراف المعياري SD، رقم عريض= أكبر قيمة، رقم تحته خط= أصغر قيمة						
** بحسب منظمة الصحة العالمية (WHO) وفق ما ورد في [22].						

[37]، حيث لم يكن هناك فروقات جوهرية بين أشجار

مصدات الرياح (مريمه. دمس) والحشائش النامية

لم تتجاوز حدود السمية المسموح بها وفق منظمة

الصحة العالمية [22]. وهذه النتيجة تتفق مع دراسة

منطقة التلوث A (مقلب نفاية المدينة). كما تبين النتائج في ذات الجدول أن قيمة BAF أقل من (1) لعناصر (Fe, Cu, Mn) في كل من المجموع الجذري والمجموع الخضري في جميع مواقع زراعة نبات الفجل، وكانت أكبر قيمة لـ BAF في المجموع الجذري للعناصر المذكورة سابقاً هي (0.184) لعنصر Cu وأقل قيمة لـ BAF كانت (0.02) لعنصر Fe، وكانت أكبر قيمة لـ BAF في المجموع الخضري هي (0.176) لعنصر Cu، وأقل قيمة لـ BAF (0.04) لعنصر Fe، وهذا يدل على أن نبات الفجل يعد نباتاً منخفض التراكم لعناصر بحسب [12] ومتوسط التراكم لهذه العناصر بحسب [36]. وفي دراسة [38] التي شملت تحديد تركيزات (Al)، (Fe)، (Co)، (B)، (Pb)، (As)، (Cd)، (Se)، (Cu)، و (Zn) في ثلاثة محاصيل (القمح، والكرنب، والسبانخ)، تبين أن السبانخ يحتوي على نسبة عناصر أعلى من القمح والكرنب. وكان الاستهلاك اليومي المقدر (EDI) لكل عنصر في كل محصول أقل من الحد المسموح به. وكان مؤشر الخطر (HI) للأنواع النباتية الثلاثة، ومعامل الخطر المستهدف (THQ) أقل من مستوى العتبة ($1 >$). وأشارت تلك الدراسة إلى أن استهلاك القمح والسبانخ والكرنب ليس له أي تأثير يُذكر على صحة الإنسان نظراً لوجود مستويات مرتفعة من المعادن الثقيلة في تلك المنطقة المرتفعة في جبال الهيمالايا. وفي دراسة قام بها [36] على

طبيعياً (شام أباد) فيما يتعلق بالعناصر (Mn, Fe)، فيما وجد أن مستويات الزنك كانت عالية جداً في الحشائش مقارنة بالأشجار.

استجابة نبات الفجل لبعض العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn) عند استخدام مياه الآبار المدروسة

لمعرفة سلوك نبات الفجل في امتصاص العناصر الثقيلة من التربة أو البيئة التي يعيش فيها، تم الاعتماد على معامل التراكم الحيوي (BAF) Bioaccumulation factor الذي يركز على امتصاص العناصر الثقيلة من التربة إلى جذور وارواق النبات، وكذا على معامل الانتقال (TF) Translocation factor الذي يركز على استخلاص العناصر الثقيلة داخل النبات من الجذور إلى الأوراق، وفي المحاور الآتية سوف يتم مناقشة هذين المعاملين بشكل تفصيلي.

• معامل التراكم الحيوي (BAF)

تبين النتائج في جدول رقم (6) أن معامل التراكم الحيوي (BAF) في كل من المجموع الجذري والمجموع الخضري في جميع مواقع الزراعة لنبات الفجل، كانت مرتبة من الأكبر إلى الأصغر على النحو الآتي: زنك ثم نحاس ثم منجنيز ثم حديد ($Zn > Cu > Mn > Fe$)، وتبين النتائج - أيضاً - أن قيمة BAF في المجموع الجذري أكبر من المجموع الخضري لنبات الفجل، عدا عنصر Cu فقط في موقع الزراعة الذي استخدمت فيه مياه آبار قريبة من

في عمليات الأيض، وهي الهدف الرئيس لتراكم هذه العناصر [41,40]، إذ تؤدي العناصر المرتبطة بالبروتينات والإنزيمات والأحماض الأمينية إلى اضطرابات في وظائف أعضاء الكائنات الحية [42]. وتختلف النباتات في كمية العناصر المتراكمة فيها، حيث تتحكم قدرتها على الانتقال بين الجذور والمجموع الخضري في نسبة تراكمها. تتميز النباتات المراكمة بزيادة تركيز العناصر في المجموع الخضري مقارنة بالجذور. كما أن ارتفاع تركيز العناصر الثقيلة في المجموع الخضري لبعض النباتات يشير إلى خطورة استخدامها في التربة الملوثة، رغم أنها تعتبر مستبعدة للعناصر الثقيلة حسب معامل التراكم الحيوي (BAF) [43]. مما سبق يمكن القول إن نبات الفجل يمكن عده نباتاً مراكماً لعنصر الزنك في المجموع الخضري والمجموع الجذري، وهذا النتيجة مفيدة لاستخدام نبات الفجل مؤشراً للتلوث بالزنك، وقد تكون هناك خطورة في أكل نبات الفجل الذي ينمو في بيئة فيها تلوث بعنصر الزنك، في حين لا يعد نبات الفجل مراكماً لعناصر الحديد والنحاس والمنجنيز. وعند التطرق إلى الجزء المأكول من نبات الفجل (المجموع الجذري)، نجد أن متوسط قيمة BAF لكافة مواقع الزراعة كانت مرتبة على النحو الآتي:

$$(Zn:1.18 > Cu:0.14 > Mn:0.13 > Fe:0.04)$$

بوحدة mg/Kg، وهذه النتائج تتوافق مع النتائج التي وردت في [44] BAF لنبات الفجل، إذ كانت قيم BAF مرتبة على النحو الآتي:

$$(Zn:1.09 > Cu:0.19 > Mn:0.06 > Fe:0.04)$$

الخضراوات الورقية عالية التحمل (مثل الباك تشوي) التي أظهرت قدرات قوية على تراكم المعادن الثقيلة، كما نظم ضغوط المعادن الثقيلة بشكل إيجابي العناصر المعدنية في جذورها. في المقابل، غالباً ما أظهرت الخضراوات الورقية الحساسة (مثل براعم البازلاء) محتوى منخفضاً من العناصر المعدنية في جذورها، وهو ما كان نتيجة لاستراتيجيتها لتقليل امتصاص المعادن الثقيلة. تقدم هذه النتائج رؤى أساسية حول آليات مقاومة التلوث المشترك بالمعادن الثقيلة في الخضراوات الورقية وفي نبات الفجل، مما يدعم جهود المعالجة النباتية والإنتاج الآمن. في حين كانت قيمة BAF أكبر من (1) لعنصر الزنك في المجموع الجذري لجميع مواقع الزراعة عدا موقع الزراعة الذي تم فيه استخدام مياه ري قريبة من منطقة التلوث C (مجرى سيول الأمطار)، وقد يعود السبب إلى احتواء مياه آبار تلك المنطقة على كمية أعلى من Zn (جدول رقم 1) والذي قد يعود إلى أن مياه السيول تجري عبر التربة الزراعية التي يستخدم فيها الأسمدة والمبيدات المحتوية على الزنك. وكانت قيمة BAF أكبر من (1) لعنصر الزنك في المجموع الخضري لموقع الزراعة الذي تم فيه استخدام مياه ري قريبة من منطقة التلوث B (مجري الصرف الصحي) فقط. من المعلوم أنه إذا زادت تراكيز العناصر الثقيلة عن الحدود المسموح بها، تصبح النباتات غير صالحة للاستهلاك [39]. يتباين التراكم الحيوي للعناصر الثقيلة وفقاً لنوع الكائن الحي وعمره وجنسه والأعضاء المستهدفة. وتعتبر الأنسجة الأعضاء الأكثر نشاطاً



عنصر النحاس من الجذور إلى مجموعه الخضري،
يليه عنصر الزنك ثم الحديد وأخيراً المنجنيز
(Cu:0.89>Zn:0.70>Fe:0.69>Mn:0.58)

ويمكن القول إن نبات الفجل يعد - نوعاً ما - نباتاً
مناسباً لاستخلاص (Phytoextraction) عنصر
النحاس في حين لا يعد نباتاً مناسباً لاستخلاص
عناصر الزنك والحديد والمنجنيز، وهناك دراسة في
المغرب [31] لنبات الفجل توافق هذه النتائج وتستخدم
في ريها مياه الصرف الصحي بمستويات مختلفة وجد
فيها أن متوسط قيمة TF لجميع مستويات مياه
الصرف الصحي لعنصر النحاس والزنك 0.91 و0.89 على التوالي. في الدراسة نفسها وجد [31] أن
قيمة TF لعنصر الزنك تزداد مع زيادة تركيزه في
التربة المزروعة بنبات الفجل وتصل قيمة TF إلى
ما يقارب 1. وفي هذه الدراسة تبين أن قيمة TF
لعنصر الزنك (0.70)، وهذا لأن قيمة الزنك في
التربة كان كمتوسط (42.08) mg/Kg، ومن هنا
يمكن القول إن نبات الفجل يعد نباتاً مؤشراً مراكماً
للعنصرين النحاس والزنك، في حين لا يعد نباتاً مراكماً
لعنصري الحديد والمنجنيز، وهنا يمكن القول إن زراعة
نبات الفجل في أي مواقع ملوثة بعنصري النحاس
والزنك سيشكل خطراً على الإنسان بسبب تراكم هذه
العناصر في أنسجة نبات الفجل.

وهذا يدل على أن نبات الفجل يمتص عنصر الزنك
من البيئة التي يعيش فيها بشكل فعال ويعدّ نباتاً
مراكماً لعنصر الزنك.

• معامل الانتقال (TF)

يتم قياس قدرة النبات على نقل العناصر الثقيلة من
الجذر إلى الجزء العلوي من النبات عبر استخدام
معامل الانتقال (TF) [45]، وتشير النتائج في جدول
رقم (6) إلى أن أكبر قيمة لمعامل الانتقال (TF)
لجميع العناصر الثقيلة المدروسة، كانت في موقع
الزراعة الذي تم فيه استخدام مياه الري في منطقة
التلوث A (مقلب نفاية المدينة)، إذ بلغت أكبر قيمة للـ
TF (1.04) لعنصر النحاس وأقل قيمة (0.65)
لعنصر المنجنيز.

تبين النتائج في جدول رقم (6) أن قيمة TF أقل
من (1) لجميع العناصر الثقيلة المدروسة، وفي جميع
مواقع الزراعة، عدا عنصر النحاس في موقع الزراعة
الذي تم فيه استخدام مياه الري في منطقة التلوث A
(مقلب نفاية المدينة) فقط، إذ بلغت قيمة TF لنبات
الفجل (1.04)، أي إن عنصر النحاس ينتقل من
الجذر إلى المجموع الخضري لنبات الفجل بشكل فعال
ولا يتم تخزينه في الجذر كما في باقي العناصر الثقيلة
المدروسة. ومن الملاحظ أن قيمة TF لنبات الفجل
كمتوسط لجميع مواقع الدراسة اقتربت إلى قيمة (1)
لعنصر النحاس، وهذا يشير إلى أن نبات الفجل ينقل



جدول (6) تأثير مياه آبار من مناطق التلوث المدروسة بحوض صنعاء في قيمة معامل التراكم ومعامل الانتقال لنبات الفجل لبعض

العناصر الثقيلة (Fe و Cu و Zn و Mn)

متوسط نبات الفجل (الترتيب)	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث C	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث B	موقع الزراعة المروي بمياه الآبار من منطقة التلوث A	مياه مناطق التلوث المدروسة والمعاملات المدروسة للعناصر الثقيلة
معامل التراكم الحيوي (BAF) Bioaccumulation factor				
0.04 (4)	0.036	0.043	0.040	الحديد (Fe)
0.15 (2)	0.160	0.126	0.176	النحاس (Cu)
1.19 (1)	0.890	1.607	1.066	الزنك (Zn)
0.13 (3)	0.138	0.130	0.122	المنجنيز (Mn)
0.03 (4)	0.025	0.030	0.028	الحديد (Fe)
0.14 (2)	0.131	0.119	0.184	النحاس (Cu)
0.84 (1)	0.579	1.144	0.799	الزنك (Zn)
0.07 (3)	0.071	0.066	0.080	المنجنيز (Mn)
معامل الانتقال (TF) Translocation factor				
0.69 (3)	0.685	0.697	0.702	الحديد (Fe)
0.93 (1)	0.816	0.944	1.041	النحاس (Cu)
0.70 (2)	0.651	0.712	0.750	الزنك (Zn)
0.56 (4)	0.515	0.512	0.654	المنجنيز (Mn)

A = مقلب نفاية المدينة، B = مجاري الصرف الصحي، C = مجرى سيول الأمطار
رقم عريض = أكبر قيمة، رقم تحته خط = أصغر قيمة (رقم) = ترتيب العنصر تصاعدياً.

- لم تبين النتائج وجود تجاوز لحدود تلك العناصر المسموح بها في مياه الري في أي من الآبار المشمولة بالدراسة. إلا أن كمية تركيز Fe و Mn تراكمت في التربة بعد الزراعة في جميع المواقع المدروسة بحوالي ثلاثة أضعاف إلى ضعفين ونصف كميتها قبل الزراعة أي (279) % لـ Fe و (245) % لـ Mn، في حين أن كمية Cu و Zn في أغلب مواقع الزراعة المدروسة زادت في التربة بعد زراعة الفجل بنسبة (32) % و 59% على التوالي.

5. الاستنتاجات والتوصيات

يستنتج من هذه الدراسة ما يأتي:

- أظهرت النتائج أن عنصري (Fe, Mn) كانا الأكثر تركيزاً في آبار مقلب نفاية المدينة بمنطقة الأزرقين (A) مقارنة بآبار المنطقة (B) و (C). كما بينت تواجد (Cu) بتركيز أعلى في منطقة بني الحارث (الصرف الصحي B) واحتواء آبار منطقة الروضة (السائلة C) على أعلى تركيز من عنصر (Zn).



- وفق معامل الوفرة (EF) فإن جميع مياه آبار ري مناطق التلوث المدروسة في حوض صنعاء تؤثر في تواجد عنصر Cu في التربة بعد زراعة وري محصول الفجل، ومياه آبار الري في منطقة التلوث C (بمجرى سيول الأمطار) تؤثر في وجود عنصر Zn في التربة بعد زراعة محصول الفجل.
- مناطق التلوث المدروسة تؤثر في تركيز عنصر Mn في نبات الفجل بمجموعه الخضري والجذري معاً، وليس في المجموع الخضري أو الجذري على حدة، وتؤثر - أيضاً - في تركيز عنصر Fe في المجموع الجذري فقط لنبات الفجل.
- من العناصر الثقيلة المدروسة يتراكم عنصر Zn فقط في المجموع الجذري والخضري عند استخدام مياه ري من آبار منطقة التلوث B، ويتراكم العنصر (Zn) في المجموع الجذري فقط عند استخدام مياه ري من آبار منطقة التلوث A في حوض صنعاء، ومن هذه النتيجة يمكن عدّ نبات الفجل نباتاً مؤشراً مراكماً لعنصر Zn في الترب الملوثة بهذا العنصر، وهذا قد يشكل خطراً على الإنسان بسبب تراكم هذه العناصر في أنسجة نبات الفجل ودخوله في السلسلة الغذائية للإنسان.
- متوسط قيمة معامل التراكم الحيوي (BAF) للمجموع الجذر لنبات الفجل المروية بمياه آبار من مناطق التلوث المدروسة مرتبة على النحو الآتي: زنك ثم نحاس ثم منجنيز ثم حديد
($Zn:1.18 > Cu:0.14 > Mn:0.13 > Fe:$)
(0.04).
- وفق معامل انتقال (TF) فإن نبات الفجل لديه القدرة على امتصاص عنصر Cu فقط من العناصر المدروسة عند استخدام مياه آبار من منطقة التلوث A (مقلب نفاية المدينة)، وشبه قادر على امتصاص ذات العنصر عند استخدام مياه آبار منطقة التلوث B (مجارى الصرف الصحي)، وغير قادر على امتصاص العنصر عند استخدام مياه آبار من منطقة التلوث C (مجرى سيول الأمطار) في حوض صنعاء، وهذا قد يشكل خطراً على الإنسان بسبب تراكم هذه العناصر في أنسجة نبات الفجل ودخوله في السلسلة الغذائية للإنسان.

4. إجراء تجارب على نباتات أخرى مثل الكرنب والسبانخ لبيان قدرتها على امتصاص العناصر الثقيلة وتراكمها.

• متوسط قيمة TF لنبات الفجل المروية بمياه آبار من مناطق التلوث المدروسة مرتبة على النحو الآتي: نحاس وزنك وحديد ومنجنيز
(Cu:0.93>Zn:0.70>Fe:0.69>Mn:0.56).

وبناءً على ما تقدم نوصي بالآتي:

- إجراء المزيد من التجارب لتأكيد النتائج المتحصل عليها وإمكانية استخدام نبات الفجل في إعادة تأهيل الترب الملوثة بالعناصر الثقيلة فيما يسمى بالاستصلاح الحيوي (Phytoremediation).
- عدم زراعة نبات الفجل في المناطق التي تتركز فيها عنصري Zn و Cu في حالة استخدام المحصول للأكل، ويمكن استخدام نبات الفجل في معالجة الترب الملوثة بـ Zn و Cu ونقله سماداً في ترب لا تتوفر فيها عنصري النحاس والزنك.

الاقتراحات العلمية والتطويرية

1. توسيع نطاق العناصر المدروسة لتشمل عناصر أكثر سمية مثل Ni و Pb و Cd.
2. إضافة تحليل للبكتيريا والملوثات العضوية لتقييم جودة مياه الآبار بصورة أشمل.
3. إجراء تجارب حقلية موازية لتعزيز نتائج تجربة الأصص (pot experiment).



الملاحق:

ملحق (1): معامل الارتباط Correlations مؤشرات جودة مياه آبار الري المدرسة

Zn mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	RSC meq/l	adj.SAR meq/l	SAR meq/l	Cl meq/l	CO3 meq/l	HCO3 meq/l	K meq/l	Na meq/l	Mg meq/l	Ca meq/l	EC ds/m	TDS mg/l	pH	معامل الارتباط P=Pearson S=Spearman
-0.104	-.610*	0.294	.747**	-0.054	0.149	-.782**	-0.292	-.746**	-0.332	-0.459	-.629*	-.705*	-.621*	-.621*	1.000	pH
0.074	0.557	-0.067	-.951**	0.564	0.354	.698*	.837**	.625*	0.565	.925**	.799**	.937**	1.000**	1.000		TDS mg/l
0.074	0.557	-0.067	-.951**	0.564	0.354	.698*	.837**	.625*	0.565	.925**	.799**	.937**	1.000			EC ds/m
-0.014	.658*	-0.166	-.965**	0.305	0.063	.790**	.778**	.779**	0.459	.774**	.802**	1.000				Ca meq/l
-0.248	.692*	-0.073	-.869**	0.368	0.246	0.531	.695*	0.559	.692*	.758**	1.000					Mg meq/l
0.069	0.457	-0.030	-.813**	.811**	.644*	.581*	.884**	0.489	.706*	1.000						Na meq/l
0.183	0.116	-0.468	-0.498	0.506	0.419	0.475	.701*	0.482	1.000							K meq/l
0.153	0.508	-.605*	-.705*	0.047	-0.260	.936**	0.568	1.000								HCO meq/l
-0.046	0.360	-0.188	-.746**	.640*	0.463	0.569	1.000									CO3 meq/l
0.248	0.464	-0.574	-.715**	0.219	-0.096	1.000										Cl meq/l
-0.014	0.014	0.329	-0.137	.926**	1.000											SAR meq/l
-0.002	0.208	0.196	-0.364	1.000												adj.SAR meq/l
0.077	-.709**	0.064	1.000													RSC meq/l
-0.481	0.254	1.000														Fe mg/l
-0.573	1.000															Cu mg/l
1.000																Zn mg/l

* الارتباط عند مستوى معنوي 0.05 (ثنائي الذيل). Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** الارتباط عند مستوى معنوي 0.01 (ثنائي الذيل). Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



ملحق (2): معامل الارتباط Correlations بين بعض العناصر الثقيلة وتواجدها في المياه والتربة والنبات

Mn نبات	Zn نبات	Cu نبات	Fe نبات	Mn نبات جذري	Zn نبات جذري	Cu نبات جذري	Fe نبات جذري	Mn نبات خضري	Zn نبات خضري	Cu نبات خضري	Fe نبات خضري	Mn تربة بعد	Zn تربة بعد	Cu تربة بعد	Fe تربة بعد	Mn مياه	Zn مياه	Cu مياه	Fe مياه	معامل الارتباط P=Pearson S=Spearman
-0.662	-0.185	-0.264	-0.053	-.791*	-0.316	-.697*	-0.264	0.425	0.450	0.582	0.158	-0.105	-0.053	-0.369	-0.422	1.000**	-1.000**	0.500	1.000	Fe مياه S
-.767*	0.106	0.105	0.527	-0.474	0.000	-0.429	0.580	-0.186	0.423	0.370	0.316	-0.053	-.738*	0.211	-0.369	0.500	-0.500	1.000		Cu مياه S
0.662	0.185	0.264	0.053	.791*	0.316	.697*	0.264	-0.425	-0.450	-0.582	-0.158	0.105	0.053	0.369	0.422	-1.000**	1.000			Zn مياه S
-0.662	-0.185	-0.264	-0.053	-.791*	-0.316	-.697*	-0.264	0.425	0.450	0.582	0.158	-0.105	-0.053	-0.369	-0.422	1.000				Mn مياه S
0.243	-0.300	0.528	0.234	0.002	-0.109	0.170	0.010	0.361	-0.343	0.092	0.302	0.597	0.483	-0.195	1					Fe تربة بعد P
0.099	.821**	0.470	-0.293	0.160	0.639	0.237	0.178	-0.319	0.441	0.100	-0.481	0.426	-0.567	1						Cu تربة بعد P
0.234	-0.393	0.033	-0.350	-0.200	-0.133	0.068	-0.600	.714*	-0.536	-0.008	0.050	0.050	1.000							Zn تربة بعد S
0.037	0.391	.671*	0.103	-0.170	0.173	-0.186	0.025	0.244	0.401	0.519	0.121	1								Mn تربة بعد P
-0.192	-0.242	-0.042	.923**	0.031	-0.301	-0.593	0.384	0.218	0.035	0.460	1									Fe نبات خضري P
-0.290	0.496	0.234	0.025	-0.561	0.234	-.792*	-0.151	0.591	0.571	1.000										Cu نبات خضري S
-0.162	0.499	0.209	0.015	-0.121	-0.112	-0.443	-0.027	-0.080	1											Zn نبات خضري P
-0.224	-0.105	0.160	-0.218	-.706*	0.084	-0.385	-0.496	1.000												Mn نبات خضري S
-0.215	0.000	-0.009	.709*	0.336	0.019	-0.034	1													Fe نبات جذري P
0.298	-0.272	0.237	-0.322	0.509	0.000	1.000														Cu نبات جذري S
0.261	.805**	0.091	-0.222	0.128	1															Zn نبات جذري P
.760*	0.039	-0.262	0.164	1																Mn نبات جذري P
-0.236	-0.184	-0.036	1																	Fe نبات P
-0.169	0.204	1																		Cu نبات P
0.131	1																			Zn نبات P
1																				Mn نبات P

* الارتباط عند مستوى معنوي 0.05 (ثنائي الذيل). Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** الارتباط عند مستوى معنوي 0.01 (ثنائي الذيل). Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



تأثير الري بمياه آبار حوض صنعاء القريية من مصادر تلوث مختلفة على بعض العناصر الثقيلة في التربة ونبات الفجل

ملحق (3): معامل الارتباط *Correlations* بين بعض العناصر الثقيلة ومؤشرات مياه الآبار المدروسة ومؤشرات نمو وإنتاج نبات الفجل

إنتاج الفجل (g/m ²)	الوزن الكامل (g/m ²)	إنتاج الفجل (g/m ²)	الوزن الكامل (g/m ²)	قطر الجذر (cm)	طول الجذر (cm)	المساحة الورقة / نبات (cm ²)	عدد الأوراق (No.)	ارتفاع النبات (cm)	سرعة الإنبات (day)	نسبة الإنبات (%)	RSC meq/l	adj. SAR meq/l	SAR meq/l	Cl meq/l	CO ₃ meq/l	HCO ₃ meq/l	K meq/l	Na meq/l	Mg meq/l	Ca meq/l	EC	pH	معامل الارتباط S=Spearman
0.067	0.150	0.050	0.383	0.317	0.083	33*	583	0.250	0.220	0.186	0.369	0.369	0.422	0.053	0.369	0.053	0.369	0.369	0.053	0.369	0.053	0.053	P نربة بعددي
0.583	0.367	0.217	0.200	0.050	0.033	350	150	0.517	0.153	0.220	0.211	0.211	0.369	0.580	0.211	0.580	0.211	0.211	0.211	0.580	0.211	0.580	P نربة بعددي
0.800**	0.683*	0.600	0.350	0.650	0.317	0.033	0.133	0.017	0.525	0.305	0.38*	0.738*	0.053	0.685*	0.738*	0.685*	0.738*	0.738*	0.738*	0.685*	0.738*	0.85*	S نربة بعددي
0.050	0.067	0.067	0.400	0.250	0.250	0.633	0.533	0.483	0.136	0.119	0.053	0.053	0.105	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	P نربة بعددي
0.017	0.167	0.233	0.067	0.300	0.083	0.367	0.467	0.167	0.475	0.458	0.316	0.316	0.158	0.158	0.316	0.158	0.316	0.316	0.158	0.316	0.158	0.158	P نبات خضري
0.142	0.192	0.293	0.017	0.100	0.36*	0.117	0.033	0.427	0.119	0.340	0.370	0.370	0.582	0.212	0.370	0.212	0.370	0.370	0.212	0.370	0.212	0.212	S نبات خضري
0.360	0.418	0.025	0.167	0.301	0.192	0.167	0.117	0.167	0.060	0.204	0.423	0.423	0.450	0.026	0.423	0.026	0.423	0.423	0.026	0.423	0.026	0.423	P نبات خضري
0.597	0.429	0.571	0.101	0.244	0.647	0.008	0.311	0.143	0.436	0.068	0.186	0.186	0.425	0.611	0.186	0.611	0.186	0.186	0.186	0.611	0.186	0.611	P نبات خضري
0.650	0.500	0.750*	0.083	0.550	0.483	0.467	0.567	0.117	0.966**	0.203	0.580	0.580	0.264	0.43**	0.580	0.43**	0.580	0.580	0.580	0.43**	0.580	0.843**	P نبات خضري
0.305	0.271	0.322	0.068	0.136	0.661	0.051	0.051	0.322	0.086	0.276	0.429	0.429	0.697*	0.268	0.429	0.268	0.429	0.429	0.268	0.429	0.268	0.268	S نبات خضري
0.067	0.150	0.167	0.533	0.283	0.450	0.267	0.067	0.50*	0.017	0.407	0.000	0.000	0.316	0.316	0.000	0.316	0.000	0.000	0.316	0.000	0.316	0.316	P نبات خضري
0.233	0.017	0.100	0.500	0.417	0.367	0.350	0.550	0.283	0.119	0.627	0.474	0.474	0.791*	0.316	0.474	0.316	0.474	0.474	0.474	0.316	0.474	0.316	P نبات خضري
0.417	0.300	0.567	0.133	0.567	0.317	0.433	0.533	0.100	0.881**	0.322	0.527	0.527	0.053	0.580	0.527	0.580	0.527	0.527	0.527	0.580	0.527	0.580	P نبات
0.383	0.200	0.467	0.150	0.167	0.233	0.517	0.317	0.017	0.237	0.339	0.105	0.105	0.264	0.369	0.105	0.369	0.105	0.105	0.105	0.369	0.105	0.369	P نبات
0.218	0.109	0.159	0.477	0.192	0.502	0.360	0.285	0.45**	0.009	0.272	0.106	0.106	0.185	0.291	0.106	0.291	0.106	0.106	0.106	0.291	0.106	0.291	P نبات
0.167	0.360	0.368	0.36*	0.28*	0.042	0.402	0.477	0.494	0.204	0.800**	0.67*	0.767*	0.662	0.106	0.767*	0.106	0.767*	0.767*	0.767*	0.106	0.767*	0.106	P نبات

* الارتباط عند مستوى معنوي 0.05 (ثنائي الذيل). Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
** الارتباط عند مستوى معنوي 0.01 (ثنائي الذيل). Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



Journal of Environmental Protection, 5(2) (2017) 52-60.
https://doi.org/10.12691/env-5-2-4.

المراجع:

- [13] D. Comis, Green remediation. Journal of Soil and Water Conservation (51) (1996) 184-187.
- [14] زحلان، ربيعة توفيق، استجابة بعض النباتات لإضافة كميات مختلفة من حمأة محطة عدرا، جامعة دمشق - كلية العلوم - قسم علم الحياة النباتية (2015).
- [15] USEPA, Introduction to Phytoremediation, Cincinnati, Ohio, U.S: Environmental Protection Agency (2000).
- [16] L. Marchiol, S. Assolari, P. Sacco, G. Zerbi, Phytoextraction of heavy metals by canola, Brassicanapus and radish, Raphanus sativus grown on multicontaminated soil, Environmental Pollution (132) (2004) 21-27.
- [17] ريشارد، ج. الين، البخر- نتج للمحاصل، دليل تقدير الاحتياجات المائية، (ترجمة: فوزي بن سعيد عواد و محمد ابراهيم السعود) جامعة الملك سعود، الرياض (2006) ص: 27. <https://doi.org/9789960379845>.
- [18] S. J. Haswel, Atomic Absorption Spectrometry Theory, Design and Application (Vol. 5th ed), W.K. University of HUL- HUG (1990).
- [19] C. A. Black, K.H. Hartge, Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed. (Ed. Klute A.), American Society of Agronomy Inc. and Soil Science Society of America (1986) 363-376.
- [20] E. A. Loop, A. Fink, Total iron as useful index of Fe-status of crop, J. plant nutrition 7 (1984) 69-79.
- [21] M.S. Gresser, G.W. Parson, Sulfuric and perchloric acid digestion of plant material for the determination nitrogen, phosphorous, potassium, calcium and Magnesium, Analytical chemical Acta(109) (1979) 431-436.
- [22] M. AL-Jaboobi, A. Zouahri, M. Tijane, A. El Housni, Z. Mennane, H. Yachou, M. Bouksaim, Evaluation of heavy metals pollution in groundwater, soil and some vegetables irrigated with wastewater in the Skhirat region, Morocco, J. Mater. Environ. Sci., 3 (5) (2014) 961-966. <https://doi.org/2028-2508>.
- [1] B. Sharma, M. K. Chettri, MONITORING OF HEAVY METALS IN VEGETABLES AND SOIL OF AGRICULTURAL FIELDS OF KATHMANDU VALLEY. ECOPRINT, 12 (2005) 1-9.
- [2] FAO, Water quality for agriculture irrigation and draining. (R. S. Ayers, W. D. Westcot, Eds.) Rome, FAO (1985).
- [3] الخليدي، عبدالحكيم غالب حسان، تقييم التلوث الكيميائي والميكروبي للمياه الجوفية في حوض صنعاء، جامعة صنعاء، كلية الزراعة، رسالة ماجستير (2007).
- [4] بكر، محمد نبيل ونجم، عبد الواحد يوسف و خليل، كمال السيد ويحيى، عبد الرحمن يحيى، طرائق تحليل التربة والنبات والمياه، الإدارة العامة لمشروع تقدير خصوبة التربة، الهيئة العامة لصندوق الموازنة الزراعية، مصر (1999).
- [5] عبدالرضا، كاظم عبدالرضا، دراسات بكتيريولوجية على مياه بعض الآبار المستعملة كمصدر لمياه الشرب، رسالة ماجستير، كلية العلوم، جامعة بغداد، العراق (1981).
- [6] مجلس حماية البيئة، تقرير المتابعة حول تلوث المياه الجوفية في حوض صنعاء، مجلس حماية البيئة، صنعاء (1993).
- [7] El-Zaemy, A Wastewater Practice In Yemen, Workshop on Wastewater Reuse Practice in Yemen, WHO (1992).
- [8] حيدر، عبد الرحمن عبدالله، تقييم الاثر البيئي لاستخدام مياه الصرف الصحي في ري المحاصيل الزراعية في اب وذمار وصنعاء، حلقة مناقشة تقييم الاثر البيئي لاستخدام مياه الصرف الصحي في الري، وزارة التخطيط والتعاون الدولي، صنعاء (2005) ص: 82.
- [9] جركس، امل، استخدامات مياه الصرف الصحي في الري، المجلة العربية لإدارة مياه الري، المنظمة العربية للتنمية الزراعية، الخرطوم، السودان (3) (2000) 57-51.
- [10] S. P. McGrath, F.J. Zhao, E. Lombi, Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. Adv. Agronomy(75) (2002) 1– 56.
- [11] الفراج، عبدالله بن سلمان والوايل، محمد بن ابراهيم والشهراني، تثبيت بن سفر ومغربي، سالم العزب عبدالله والسويلم، محمد بن سليمان، تلوث التربة والنبات بالعناصر الثقيلة في منطقة مهد الذهب وتأثيرها بالبعد عن المنجم، المملكة العربية السعودية، قسم علوم التربة، مركز البحوث الزراعية (2009).
- [12] Y. A. El-Amier, S. M. Alghanem, F. M. Alzuaibr, Bioaccumulation and Translocation of Heavy Metals from Coastal Soil by Wild Halophytes. American



[33] الطه، علي حسين محمد، وفاخر، سلوى جمعة، وعبد الحليم، نجلاء منصور،
تأثير نوعية مياه الري في بعض الصفات الخضريية والجذرية لنبات الفجل
Raphanus sativus L. و محتواه من العناصر المعدنية و الثقيلة، كلية الزراعة،
جامعة البصرة، العراق (2016) 13-1.

[34] Nataša P. NTkoITć*, MTlan K. BorTšOv,
SloboHanka P. PaYOvTć, DanTYOla D. ArsOnov,
MTlan D. ŽupunskT, COMPARATIVE
ASSESSMENT OF MINERAL ELEMENTS AND
HEAVY METALS ACCUMULATION IN
VEGETABLE SPECIES, Food and Feed Research, 41
(2) (2014) 115 - 123.

[35] المساوي، علي محمد عبدالرحمن، مقارنة تأثير المصادر التقليدية لمياه الري
بمياه المجاري المعالجة على الخواص الفيزيائية والكيميائية ومحتوى المعادن السامة
للتربة الكلسية، المجلة اليمنية للبحوث والدراسات الزراعية، الهيئة العامة للبحوث
والإرشاد الزراعي، نمار، الجمهورية اليمنية (2006) 33-52.

[36] Yuan Meng , Liang Zhang, Liping Li, Linquan
Wang, Yongfu Wu, Tao Zeng, Haiqing Shi, Zeli Chang,
Qian Shi and Jian Ma, Zeli Chang, Qian Shi and Jian
Ma, Accumulation Characteristics of Trace Elements in
Leafy Vegetables with Different Heavy Metal
Tolerances Under Cd and as Stress. Agronomy MDPI
47(15) (2025) 1790.

[37] المنصوري، جمال علي قاسم سيف وعثمان، مختار دائل محمد والوداعي،
أحمد محمد، تقدير مؤشرات النوعية في التربة المروية بالمياه العادمة الصناعية في
منطقة المراوحة بالحديدة، الجمهورية اليمنية، مجلة اتحاد الجامعات العربية للعلوم
الزراعية، جامعة عين شمس، القاهرة 24 (2) (2016) 420-417.

[38] Arup Giri, Vijay K. Bharti, Sahil Kalia, Somen
Acharya, Bhuvnesh Kumar, O. P. Chaurasia, Health
Risk Assessment of Heavy Metals Due to Wheat,
Cabbage, and Spinach Consumption at Cold-Arid High
Altitude Region Biological Trace Element Research 200
(2021) 4186–4198. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-03006-4> (2022).

[39] جمعة، غفران فاروق والانباري، رياض حسن، تقييم التلوث بالعناصر الثقيلة
في الاراضي الزراعية الواقعة في منطقة جسر دبالى، المجلة العراقية لبحوث
السوق وحماية المستهلك، 2 (3) (2010) 116-104.

[40] F.E. Ekpo,N. Agu, U. Udoakpan, Influence of
heavy metals concentration in three common fish,
sediment and water collected within quarry environment,

[23] R. A. Sutherland, Bed sediment associated trace
metals in an urban stream, Environ Gelo(39) (2000) 611-
627.

[24] G. S. Abraham, P. J. Parker, Assessment of heavy
metal Enrichment factors and the degree of
contamination in marine sediment from Tamaki Estuary,
New Zealand, Environ. Monit. Assess (136) (2008) 227-
238.

[25] G. Muller, Index of geoaccumulation in sediments
of the Rhine River, GeoJournal, 2 (1969) 108–118.

[26] K. Loska, J. Cebula, J. Pelczar, D. Wiechula, J.
Kwapuliński, Use of enrichment, and contamination
factors together with geoaccumulation indexes to
evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik
Water Reservoirin Poland, Water, Air, Soil Pollut.
(1997) 93, 347.

[27] A. Baker, Accumulators and excluders- Strategies in
the response of plants to heavy metals, J. Plant Nutri. 1-4
(3) (1981) 643-654.

[28] L. Ma, K. Komar, C. Tu, W. Zhang, Y. Cai, E.
Kenelly, A Fern that hyper-accumulates arsenic.
Nature(409) (2001) 579-582.

[29] J.W. Huang, J. Chen, W.R. Berti, S. D.
Cunningham, Phytoremediation of lead-contaminated
soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction,
Environ. Sci. Technol. (31) (1997) 800-805.

[30] R. Brooks, A. Baker, Terrestrial higher plants which
hyperaccumulate metallic elements. A review of their
distribution, ecology and phytochemistry, Biorecovery
(1) (1989) 81-126.

[31] O. EL-Mahdi, H. EL-Mahdi, L. Mustapha, L.
Ahmed, R. El-Housseine, A. Ouzair, Bio-accumulation
of the metal elements traces by the radish (Raphanus
sativus) cultivated on grounds amended by muds of a
sewage treatment plant, J. Mater. Environ. Sci. 3(3)
(2012) 469-476.

[32] الخطيب، السيد احمد، سلوك الملوثات في التربة، المكتبة المصرية للطباعة
والنشر والتوزيع، الاسكندرية (2004).



Akamkpa LG Area, Cross River State, Nigeria, European Journal of Toxicological Sciences (2013).

[41] C. Shivakumar, B. Thippeswamy, M. Tejaswikumar, S. Prashanthakumar, Bioaccumulation of heavy metals and its effect on organs of edible fishes located in Bhandra River Karnatka, Int. J. Res. Fisheries and Aquacult, 4 (2) (2014) 90-98.

[42] V. Filipović, B. Raspor, Metallothionein and metal levels in cytosol of liver, kidney and brain in relation to growth parameters of *Mullus surmuletus* and *Liza aurata* from the Eastern Adriatic Sea, Water research 37(13) (2003) 3253-3262.

[43] المطيري، عبدالإله بن عبدالله، مدى تراكم العناصر الثقيلة في نباتات المراعي النامية في المنطقة المحيطة بمنجم مهد الذهب، المملكة العربية السعودية (2015).

[44] عبدالمجيد، أحمد عبد الفتاح محمد و أبو السعود، إسلام إبراهيم أحمد، أضواء على التلوث البيئي بين الواقع والتحدى والنظرة المستقبلية، المكتبة المصرية للطباعة والنشر، الإسكندرية، مصر، (2007) ص: 231.

[45] Y. Joonki, C. Xinde, Z. Qixing, Q. M. Lena, Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of the Total Environment(368) (2006) 456–464. Retrieved from www.elsevier.com/locate/scitotenv.