Vol.4, No.9, Page 2533- 2561, 2026 https://doi.org/ 10.59628/jast.v4i9.3119 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/

Geochemical Characterization and Environmental Risk Assessment of Al-Azraqain Landfill Leachate Using LPI and Multivariate Statistical Analysis

Foad Mohammed Alshweaa*, Abdulrahman Abdulaziz Salah

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

***Corresponding author**: anafoad.1982@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history: 01-May-2026
Received: 16- June -2026
Accepted: 30-August-2026
Published: 28 September 2026

KEYWORDS

1. Landfill leachate
2. Leachate Pollution Index (LPI)
3. Heavy metals
4. Hierarchical Cluster Analysis (HCA)
5. Environmental risk assessment
6. Al-Azraqain landfill
7. Sana'a
8. Yemen

ABSTRACT

Data on the quality of leachate from the Al-Azraqain landfill in Sana'a, Yemen, is extremely limited. This study aimed to fill this gap by providing the first geochemical characterization of the landfill leachate. Five leachate samples representing all accessible leachate sources within the landfill were collected and analyzed for physicochemical parameters, including pH, EC, TDS, TOC, TKN, and major and heave elements (K, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu, As, U, Pb, and Ni) using Total Reflection X-ray Fluorescence (TXRF). The Leachate Pollution Index (LPI) and Hierarchical Cluster Analysis (HCA) were also applied. The results indicate that the landfill has not yet reached the stable methanogenic phase, as evidenced by slightly acidic pH values and elevated concentrations of organic matter, dissolved salts, and major and heave elements. TXRF analysis indicated elevated concentrations of nickel and uranium in most samples. In Sample 5, collected from the main leachate pond downstream of the landfill, TDS, COD, TKN, Fe, Ni, As, and Cu exceeded the proposed Yemeni discharge standards, reaching 25,100, 10,875, 2,242, 28.155, 9.3, 0.828, and 0.257 mg/L, respectively. LPI values ranged from 24.57 to 32.76, substantially exceeding the safe discharge threshold (7.378), indicating that the leachate poses a significant environmental risk to groundwater and surrounding ecosystems. HCA further revealed a close association between organic load and heavy metals, suggesting may enhanced their mobility. This study provides baseline data to support environmental monitoring and remediation planning and recommends future investigations addressing seasonal variations and the impacts of leachate on surrounding groundwater and soils.

التوصيف الجيوكيميائي وتقييم المخاطر البيئية لعصارة مكب الأزرقين باستخدام مؤشر التلوث (LPI) والتحليل الإحصائي متعدد المتغيرات

فؤاد محمد احمد الشويع*، عبد الرحمن عبد العزيز صلاح
قسم الأراضي والمياه والبيئة ، كلية الزراعة والأغذية والبيئة ، جامعة صنعاء، صنعاء، اليمن.
المؤلف anafoad.1982@gmail.com

معلومات المقالة
تاريخ المقالة: 22-يونيو-٢٠٢٦
تاريخ التقديم: ٠٦-يوليو -٢٠٢٦
تاريخ القبول: ٢٠- يوليو -٢٠٢٦
تاريخ النشر: ٢٨-أغسطس-٢٠٢٦

الكلمات المفتاحية
١. عصارة مكب النفايات
٢. مؤشر تلوث العصارة (LPI)
٣. العناصر الثقيلة
٤. التحليل العنقودي الهرمي (HCA)
٥. تقييم المخاطر البيئية
٦. مكب نفايات الازرقين
٧. صنعاء
٨. اليمن

الملخص:

تعتبر البيانات عن جودة عصارة مكب الازرقين في صنعاء شبة معدومة. تهدف هذه الدراسة الى سد هذه الفجوة واجراء توصيف جيوكيميائي شامل لتلك العصارة. تم جمع خمس عينات تمثل جميع مواقع العصارة في المكب وقياس المؤشرات الفيزيائية والكيميائية مثل pH، EC، TDS، TOC، TKN، والعناصر الاساسية والثقيلة مثل K، Ca، Mn، Fe، Zn، Cu، As، U، Pb و Ni بتقنية TXRF. كما تم حساب مؤشر تلوث العصارة (LPI)، واجراء التحليل العنقودي الهرمي (HCA). تشير النتائج الى ان المكب لم يصل بعد الى المرحلة الميثانية المستقرة، حيث احتوت العصارة على مستويات عالية من الحمل العضوي والاملاح والعناصر الأساسية والثقيلة مع قيم pH تميل الى الحمضية. كما كشف التحليل بتقنية TXRF عن مستويات مرتفعة من النيكل واليورانيوم في معظم العينات. في العينة ٥ المأخوذة من المستنقع الرئيسي أسفل المكب، تجاوزت كلا من TDS، COD، TKN، Fe، Ni، As و Cu المعايير اليمنية المقترحة لتصريف المياه الملوثة الى البيئة بتراكيز بلغت ٢٥١٠٠، ١٠٨٧٥، ٢٢٤٢، ٢٨.١٥٥، ٩.٣، ٠.٨٢٨ و٠.٢٥٧ ملجم/لتر على الترتيب. بناء على قيم LPI التي تراوحت بين ٢٤.٥٧ و٣٢.٧٦ متجاوزة القيمة ٧.٣٧٨ المسموح بها للتصريف الامن في المجاري المائية، تصنف عصارة مكب الازرقين على انها عصارة عالية الخطورة وقد تشكل تهديدا خطيرا على مصادر المياه الجوفية والبيئة المحيطة. كما كشف التحليل التجميعي الهرمي HCA عن ارتباط الحمل العضوي بالعناصر الثقيلة ودوره المحتمل في جعلها اكثر قابلية للحركة. تمثل هذه الدراسة اول توصيف جيوكيميائي لعصارة مكب الازرقين، وتوفر بيانات مرجعية تدعم متخذي القرار لوضع برامج المراقبة والمعالجة المناسبة. كما توصي باجراء دراسات مستقبلية تشمل التغيرات الموسمية وتقييم التأثيرات المحتملة للعصارة على المياه الجوفية والتربة المحيطة.

١. المقدمة:

يعد دفن للنفايات البلدية الصلبة في مكبات النفايات الخيار الأقل تكلفة والأكثر شيوعا لإدارة النفايات على مستوى العالم. ومع ذلك، يمثل تولد العصارة من النفايات التحدي البيئي الأبرز المرتبط بهذه الممارسة [1] تتشكل هذه العصارة نتيجة تغلغل مياه الأمطار والسوائل عبر طبقات النفايات المتحللة، لتنتج سائلا شديد التعقيد يحمل تركيزات عالية من المواد العضوية الذائبة، والأملاح غير العضوية، بالإضافة إلى العناصر الأساسية والثقيلة السامة [3] ,[2].

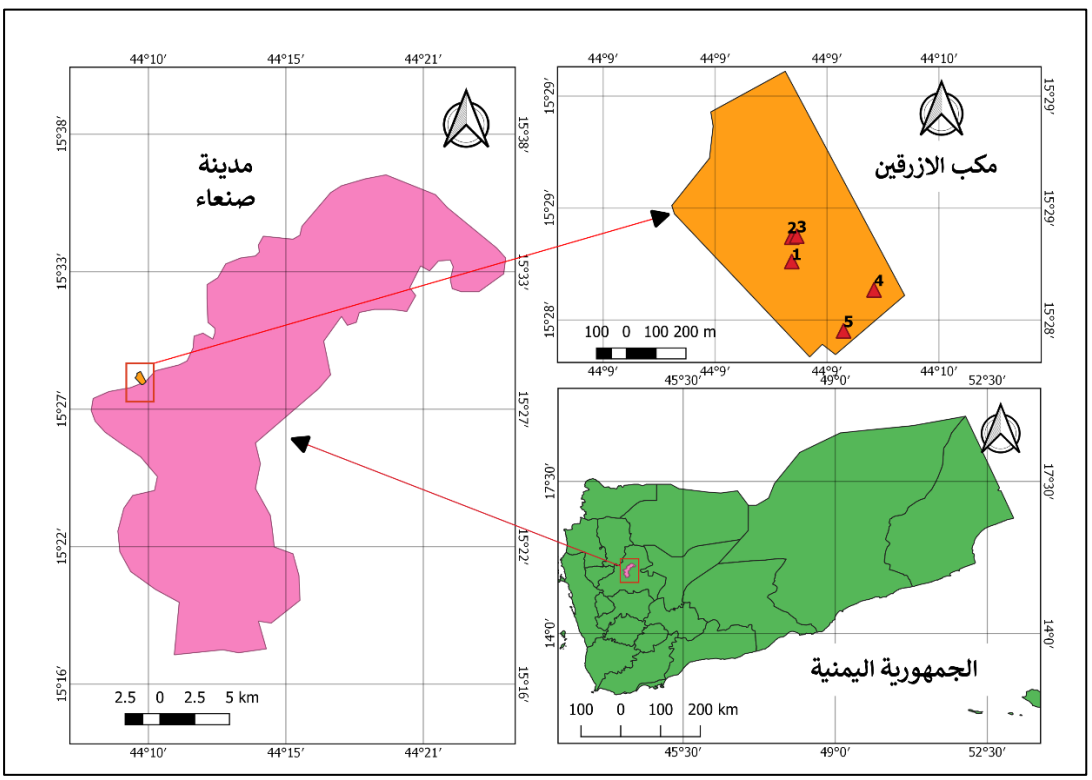
تتفاقم هذه المشكلة البيئية بشكل خاص في الدول النامية، حيث تفتقر غالبية مكبات النفايات إلى أنظمة هندسية قياسية لتبطين القاع أو جمع العصارة ومعالجتها [4]. وفي غياب هذه التدابير الوقائية، تتسرب العصارة بحرية إلى التربة والمياه الجوفية، مما يشكل تهديدا مباشرا للأنظمة البيئية والصحة العامة نتيجة احتمالية انتقال الملوثات، وخاصة العناصر الثقيلة والسامة، إلى السلسلة الغذائية ومصادر مياه الشرب [5]. ولتقييم هذا التهديد كميا، برز "مؤشر تلوث العصارة" (LPI) كأداة معيارية عالمية فعالة لتلخيص الخصائص الكيميائية المعقدة للعصارة في قيمة رقمية واحدة، مما يسهل على صناع القرار تقييم المخاطر البيئية بدقة [7] ,[6]. يعد مكب الأزرقين، الذي بدأ تشغيله عام ١٩٨٠، المكب النشط الوحيد الذي يخدم العاصمة صنعاء والمناطق المجاورة لها [8]. يستقبل المكب يوميا حوالي ١٥٠٠ طن من النفايات غير المفروزة، والتي تشمل المخلفات البلدية، والطبية، والصناعية، ومخلفات البناء والهدم [9]. يفتقر هذا المكب إلى أي أنظمة هندسية لتبطين القاع أو جمع العصارة، مما يؤدي إلى تجمع العصارة المرتشحة في مستنقع مكشوف أسفل المكب. وقد أثبتت دراسة سابقة أن المياه الجوفية المحيطة بمكب الأزرقين قد تلوثت بالفعل بالعناصر الثقيلة نتيجة تسرب هذه العصارة، مما جعلها غير صالحة للاستخدام الآدمي [10]. على الرغم من ثبوت هذا التلوث الهيدرولوجي الخطير، تفتقر الأدبيات العلمية إلى دراسات تقوم بتوصيف المصدر الأساسي لهذا التلوث، وهو "العصارة" ذاتها. فحتى الآن، تكاد تنعدم الأبحاث التي تناولت التوصيف الدقيق للخواص الفيزيائية، والكيميائية، وتراكيز العناصر الثقيلة لعصارة مكب الأزرقين. علاوة على ذلك، لم تقم أي دراسة سابقة بتقييم العبء التلوثي لهذه العصارة بشكل كمي باستخدام مؤشر تلوث العصارة (LPI). إن أية جهود مستقبلية للتخفيف من الآثار البيئية والصحية لمكب الازرقين تتطلب فهما علميا مفصلا لخصائص العصارة المرتشحة منه. بناء على ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة البحثية من خلال: (١) التوصيف الشامل للخصائص الفيزيائية والكيميائية والعناصر الثقيلة لعصارة مكب الأزرقين، و(٢) حساب مؤشر تلوث العصارة (LPI) لأول مرة في هذا الموقع، لتوفير قاعدة بيانات كمية تدعم

صناع القرار في تصميم أنظمة المعالجة والاحتواء المناسبة.

٢. مواد وطرق البحث

٢.١ وصف منطقة الدراسة

يقع مكب نفايات الازرقين عند ١٥.٤٧٦١٤٩٦٧٣ شمالا و٤٤.١٥٤٧٧٥٥٢٠ شرقا (الشكل١)، على ارتفاع ٢٢٣٢ متر فوق سطح البحر، الى الشمال الغربي من مدينة صنعاء. مدينة صنعاء هي العاصمة الادارية والسياسية للجمهورية اليمنية، واكبر مدنها اكتظاظا بالسكان على الاطلاق والذي يقدر تعدادهم بحولي 3,527,430 انسان، وتنمو سنويا بمعدل ٣.٥ [١١]. تتميز مدينة صنعاء التي تقع ضمن المناطق شبة الجافة، بمناخ معتدل طوال العام، حيث يبلغ المتوسط السنوي لدرجة الحرارة حوالي ٢٠درجة مئوية، ويبلغ معدل الامطار السنوي حوالي ٢٤٠ملم/عام [12]. مكب نفايات الازرقين هو المكب الوحيد النشط في مدينة صنعاء ويبعد عن مركزها بحوالي ١٥كيلومتر. تم اختيار موقع المكب قبل اكثر من ٤٠ عام في منطقة الازرقين [8]، مديرية بني الحارث، وهي منطقة زراعية منتجة للعديد من المحاصيل الحقلية، ولكن بسبب الزيادة الكبيرة في عدد السكان والتوسع العمراني المطرد فقد أصبح المكب اليوم قريب جدا من



الشكل ١. منطقة الدراسة واماكن اخذ العينات من مكب نفايات الازرقين، صنعاء، اليمن

التجمعات السكانية، مما يسبب مشاكل بيئية وصحية كبيرة للمجتمعات المحلية [9].

في الوقت الحالي، تشكل النفايات المدفونة في مكب الازرقين جبل من النفايات المدرجة على مساحة ٤٤هكتار تقريبا، وارتفاع يصل الى أكثر من87 متر حسب صور قوقل ارث الملتقطة بتاريخ ٢ مارس ٢٠٢٥. السمات الرئيسية المميزة لمقلب الازرقين هي البنية التحتية السيئة والآليات التالفة، ووجود عدد كبير من جامعي القمامة، والأشخاص غير المصرح لهم، في الموقع، والحرائق المفتوحة المتكررة، وعدم وجود أي وسيلة للحماية من العصارة الراشحة من المخلفات [9]. مؤخرا تم حفر ٢٠٠ بئر على سطح المكب بعمق يصل الى ٣٠متر لحصاد غاز الميثان، المنبعث نتيجة تحلل المواد العضوية، والذي يقوم بدفع العصارة المرتشحة من عمق المكب الى الأعلى.

٢.٢ اخذ العينات

تم اخذ خمس عينات من خمسة اماكن مختلفة من مكب نفايات الازرقين في نهاية شهر نوفمبر ٢٠٢٣. تم عرض البيانات الجغرافية لمواقع اخذ العينات وارتفاعها عن سطح البحر في الجدول (١). العينة ١و٢ اخذتا من اثنين من الابار التي تم حفرها حديثا (٢٠٠بئر) على سطح المكب. العينة ٣ و ٤ اخذتا من احد المجاري الفرعية السطحية فوق متن المكب والمجرى الرئيسي للعصارة اسفل المكب على الترتيب. العينة الخامسة اخذت من المستنقع الرئيسي الذي تتجمع فيه العصارة المرتشحة المتولدة عن المكب. تم اخذ عينة بحجم ٧٥٠مل من كل موقع ووضعت في عبوات بلاستيكية معدة مسبقا ومغسولة بالماء العادي ثم بمحلول من حمض النيتريك ١% ثم بالماء المقطر، ثلاث مرات، وثلاث مرات اخرى بنفس العصارة التي ستعبئ منها.

٢.٣ الطرق التحليلية

قياس الخواص الفيزيائية والكيميائية

تم قياس كلا من درجة الحرارة ودرجة الحموضة والتوصيل الكهربائي واجمالي المواد الصلبة الذائبة في الموقع باستخدام جهاز القياس المحمول "c-600 water quality mater صيني المنشأ، بعد ذلك، تم تقسيم كل عينة الى جزأين،

جدول ١. البيانات الجغرافية لمواقع اخذ العينات وارتفاعها عن مستوى سطح البحر

العينة	الوصف	خط العرض (شمال)	خط الطول (جنوب)	الارتفاع عن سطح البحر (متر)
١	العصارة المأخوذة من بئر حصاد الميثان الأول	١٥.٤٧٥٣٣	٤٤.١٥٤٩	٢٢٤٣.٣
٢	العصارة المأخوذة من بئر حصاد الميثان الثاني	١٥.٤٧٦٠٩	٤٤.١٥٤٩	٢٢٤٣.٧
٣	العصارة المأخوذة من المجرى الفرعي على متن المكب	١٥.٤٧٦١٢	٤٤.١٥٤٩	٢٢٤٣.٨
٤	العصارة المأخوذة من المجرى الرئيسي اسفل المكب	١٥.٤٧٤٤٤	٤٤.١٥٧٤٧	٢٢٣٢
٥	العصارة المأخوذة من المستنقع الرئيسي اسفل المكب	١٥.٤٧٢٩٨	٤٤.١٥٦٧٥	٢٢٣١.٥

تم تحميض الجزء الاول الى درجة حموضة اقل من ٢ باستخدام حمض النيتريك المركز (٣ مل/ عينة) وترك الجزء الثاني من العينة بدون تحميض. وضعت جميع العينات في حاوية تحتوي على الثلج من اجل منع العناصر الثقيلة من الترسب في قاع العبوات. نقلت العينات بعد ذلك الى المعمل التابع لقسم الاراضي والمياه والبيئة بكلية الزراعة والاغذية والبيئة بجامعة صنعاء.

في الجزء الذي لم يتم تحميضه، تم قياس اجمالي المواد الصلبة(TS) عن طريق الفرق في الوزن بعد التجفيف في الفرن الجاف على درجة حرارة ١٠٥مئوية لمدة ٢٤ساعة. تم قياس اجمالي المواد الصلبة المتطايرة (VS) عن طريق الفرق في الوزن بعد الحرق عند درجة حرارة ٥٥٠ مئوية لمدة اربع ساعات، وتم حساب اجمالي الكربون العضوي (TOC) عن طريق قسمة اجمالي المواد الصلبة المتطايرة على المعامل ١.٨. تم حساب قيم الطلب على الاكسجين الكيميائي (COD) باستخدام المعادلة(١) المقترحة من Rosato (٢٠١٧) [13].

$$COD = 0.5 * VS * (32/12) \quad \text{.....(1)}$$

حيث ان:

COD: هي الطلب على الاكسجين الكيميائي.

٠.٥: تمثل الافتراض الشائع ان VS تحتوي في المتوسط على ٥٠% من الكربون العضوي.

VS: هي اجمالي المواد الصلبة المتطايرة.

32/12: نحتاج ٣٢جرام من الاكسجين لاكسدة ١٢جرام من الكربون اكسدة كاملة وعلية فان قيم COD الناتجة تمثل تقديرات نظرية للحمل العضوي وليست قياسات مخبرية مباشرة. تعتمد دقة هذا التقدير على افتراض ان نسبة الكربون العضوي في المواد الصلبة المتطايرة تبلغ في المتوسط ٥٠% وهو افتراض قد يختلف باختلاف تركيب العصارة وخصائص النفايات واختلاف الموسم. وقد اثبتت عدد من الدراسات السابقة وجود علاقة خطية قوية بين المواد الصلبة المتطايرة (VS) والطلب على الاكسجين الكيميائي (COD)، وانه يمكن تقدير قيم COD بالاعتماد على قياسات VS فقط [14], [15], [16]. تم قياس نيتروجين كلداهل الكلي (TKN) (الامونيا والنيتروجين العضوي) في الجزء الذي لم يتم تحميضه باستخدام طريقة كلداهل التي تضمنت هضم ٥مل من العصارة مع ١٥مل من حمض الكبريتيك المركز و٢جرام من خليط من كبريتات البوتاسيوم وكبريتات النحاس بنسبة ١٠ الى ١ على التوالي، كعامل محفز. استمرت عملية الهضم لمدة ٤ ساعات عند درجة حرارة الغليان، تم نقل العينات المهضومة الى دوارق معيارية سعة ١٠٠مل واكمل الحجم الى العلامة بالماء المقطر، تبع ذلك عملية التقطير ثم المعايرة باستخدام حمض الهيدروكلوريك 0.01 مولار.

التحليل المتعدد العناصر باستخدام جهاز TXRF

تم إجراء التحليل العنصري الشامل في مختبر اللجنة الوطنية للطاقة الذرية باستخدام تقنية مطيافية الفلورسنت بالأشعة السينية ذات الانعكاس الكلي (TXRF) بواسطة جهاز S2 PICOFOX من شركة Bruker [17]. يعمل الجهاز بمصدر أشعة سينية من نوع metal-ceramic مبرد بالهواء (MCB50-0.7G) مع أهداف من الموليبدينوم والتنغستن والفضة (Mo, W, Ag)، وبجهد تشغيلي أقصى ٥٠ kV وتيار أقصى ١٠٠٠ µA. الجهاز مزود بكاشف Silicon Drift Detector بمساحة فعالة ١٠ mm^2 ودقة طيفية أقل من ١٦٠ eV عند Mn Kα، مما يوفر حساسية عالية وقدرة دقيقة على الكشف الكمي للعناصر النزرة والثقيلة في العينات البيئية [17].

اعداد العينات للقياس

تم اجراء عملية الهضم الرطب عن طريق اخذ ١٠٠مل من العينة وتم تبخيرها على السخان الكهربائي الى حوالي ١٥مل، بعد التبريد، اضيف اليها ٢٠مل من حامض النيتريك و٥ مل من حامض الكبريتيك المركزين، ووضعت على السخان الكهربائي، استمرت عملية الهضم لمدة ٣ساعات على درجة حرارة الغليان حتى اصبح لونها رائق وتوقف تصاعد اكسيد الكبريت. تم عمل شاهد من الماء المقطر وتمت معاملته بنفس المعاملة التي تلقتها عينات العصارة. تم حفظ العينات المهضومة في عبوات زجاجية محكمة الاغلاق عند درجة حرارة الغرفة لمدة ٢٠ يوم حتى تم اجراء التحليل المتعدد للعناصر باستخدام جهاز TXRF.

تم تحليل العينات باستخدام معايير TXRF التالية: إعداد الأنبوب عند ٥٠ كيلو فولت و٦٠٠ ميكرو أمبير. وقت القياس المستخدم ٦٠ ثانية. كما تم اضافة ١٠٠ppm من الكوبلت و١٠٠ppm من النيكل الى عينات العصارة والتحكم كمعيارين داخليين. نظرا للزوجة العالية للعينات بسبب استخدام حمض الكبريتيك المركز في هضم العينات ووقت القياس القصير فقد تم غربلة النتائج بناء على المعايير التالية: إذا كان العدد الصافي للأشعة السينية المكتشفة من العنصر (Net) بعد خصم الخلفية أكبر بكثير من الخلفية (Backgr) وكانت قيمة الخطأ المعياري (Sigma) صغير نسبيا والقيمة الاحصائية X^2 (Chi) قريبة من ١ وكان التركيز الفعلي المقاس للعنصر أكبر من الحد الادنى للكشف LLD، فقد تم اعتبار القياس دقيقا نسبيا مع استبعاد النتائج غير المتوافقة مع هذه المعايير. الجدول (٢) يوضح العناصر التي تم اعتماد نتائجها ومتوسط كلا من الخطأ المعياري واقل تركيز يمكن اكتشافه لكل عنصر.

جدول ٢. العناصر المعتمدة ومتوسط كلا من الخطأ المعياري (Sigma) واقل تركيز يمكن اكتشافه (LLD) لتحليل العصارة بـ TXRF (n = 6)

العنصر	الرمز	Sigma	LLD
		mg/l	
البوتاسيوم	K	٢٢.٩٦٨	١٦.٠٨
الكالسيوم	Ca	٨.٣٤٢	١٠.٣٩٤
المنجنيز	Mn	٠.٤٨٨	٢.٩١٨
الحديد	Fe	٣.٣١٨	٢.٣
الزنك	Zn	٠.٦٥٢	١.١٩١
الزرنيخ	As	٠.٢٢١	٠.٨٦٥
الروبيديوم	Rb	٠.٤٦٧	٠.٩٣٦
السترونتيوم	Sr	٠.٧٣٦	٠.٩٨٨
اليورانيوم	U	٠.٧٥١	١.٩٣٥
الرصاص	Pb	٠.٥٩٨	١.١٦٢
النيكل	Ni	٢.٩٦٧	١.٦
النحاس	Cu	٠.١٦	١.٣٩٩

تمت مقارنة النتائج مع نتائج الدراسات السابقة الإقليمية والدولية المشابهة. كما تمت مقارنتها مع المعايير اليمنية المقترحة لإعادة استخدام مياه الصرف المعالجة الصادرة عن الهيئة اليمنية للمواصفات والمقاييس وضبط الجودة عام ٢٠٠٢، والمنشورة في دليل منظمة الصحة العالمية لإقليم شرق المتوسط (WHO/CEHA, 2006)، والتي تبنت المواصفة الأردنية JS 893/1995 (المحدثة لاحقا إلى JS 893/2002) [18].

٢.٤ حساب مؤشر تلوث العصارة (LPI) leachate pollution index

تم حساب مؤشر تلوث العصارة LPI باستخدام الطريقة الموصوفة في [7]، والتي تتضمن الاجراءات الثلاثة التالية: (١) تحديد قيم او تراكيز الملوثات المدرجة في LPI عن طريق التحليل المعملي للعصارة المرتشحة من مكب نفايات الازرقين؛ (٢) تحديد درجات المؤشر الفرعي لكل ملوث باستخدام المنحنى الخاص به بناء على نتائج التحاليل المعملية المتحصل عليها من الخطوة الاولى؛ (٣) تجميع قيم المؤشرات الفرعية عن طريق ضرب درجات المؤشرات الفرعية المتحصل عليها من الخطوة الثانية في وزن الملوث الخاص به. يتم في الاخير حساب LPI المجمع لجميع الملوثات باستخدام المعادلة (٢) في حال توفر قيم جميع الملوثات او المعادلة (٣) في حال غياب قيم بعض الملوثات الـ١٨ المدرجة في LPI. في هذه الدراسة تم استخدام المعادلة (3).

$$LPI = \sum_{i=1}^{n} w_i * p_i \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots (2)$$

$$LPI = \frac{\sum_{i=1}^{m} w_i * p_i}{\sum_{i=1}^{m} w_i} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (3)$$

حيث ان: LPI هي مؤشر تلوث العصارة المرتشحة من مكب النفايات.

WI هي مجموع اوزان الملوثات المدرجة في LPI حيث ان wi =1 في المعادلة (2)، wi <1 في حال المعادلة (3).

Pi هي مجموع مؤشرات التلوث الفرعية للملوثات المدرجة في LPI.

n هي عدد الملوثات المدرجة في LPI (n =18).

m هي عدد الملوثات المتوفرة من الملوثات المدرجة في LPI (m<18).

٢.٥ التحليل العنقودي الهرمي (Hierarchical Cluster Analysis، HCA)

تم اجراء التحليل العنقودي الهرمي (HCA) لاستكشاف الأنماط السلوكية لـ ٢٠ متغير كيميائي وفيزيائي في عصارة مكب النفايات. يهدف التحليل إلى استكشاف "البصمات الكيميائية" للملوثات وتتبع مصادرها المشتركة من خلال تجميعها في عناقيد (مجموعات) بناء على خصائصها الجيوكيميائية المشتركة. نظرا للتفاوت الهائل والانحراف الشديد في تراكيز الملوثات (من الصفر إلى عشرات الآلاف)، تم تطبيق تحليل مزدوج لتقليل تاثير القيم المرتفعة وضمان دقة النتائج: اولا تم اجراء التحويل اللوغاريتمي log10(x+1) للبيانات وهي من اكثر الطرق موثوقية لتقليل الانحراف، وتقريب البيانات للتوزيع الطبيعي، ومعالجة القيم الصفرية (ND) بشكل رياضي سليم [19]. ثانيا تم اجراء التوحيد القياسي (Z-scores) لمنح جميع المتغيرات أوزان

إحصائية متساوية، مما يضمن أن التجميع يعكس السلوك الكيميائي الحقيقي وليس الحجم المطلق للتركيز.

تم اجراء التحليل ورسم المخطط الشجري قبل وبعد التحويل اللوغاريتمي، في برنامج SPSS Statistics الإصدار ٢٧ من IBM. تم استخدام مقياس "مربع المسافة الإقليدية" لحساب درجة التقارب بين المتغيرات، وخوارزمية "طريقة وارد" (Ward's method) لدمج العناقيد. ولتسهل تفسير النتائج، تم رسم خط قطع وهمي على المخطط الشجري عند المسافة الاقليدية ١٠، مما أتاح تقسيم المتغيرات إلى مجموعات فرعية متجانسة تسهم في تفسير الأنماط الجيوكيميائية وتحديد المصادر المحتملة للملوثات.

جدول ٣. الملوثات المدرجة في LPI واهمية ووزن كل ملوث [7]

No.	الملوث	Pollutant	الأهمية	الوزن
1	الرقم الهيدروجيني	pH	٣.٥٠٩	٠.٠٥٥
2	اجمالي المواد الصلبة الذائبة	Total dissolved solids	٣.١٩٦	٠.٠٥
3	الطلب على الاكسجين البيولوجي	BOD_5	٣.٩٠٢	٠.٠٦١
4	الطلب على الاكسجين الكيميائي	COD	٣.٩٦٣	٠.٠٦٢
5	اجمالي نيتروجين كلداهل	TKN	٣.٣٦٧	٠.٠٥٣
6	نيتروجين الامونيا	Ammonia nitrogen	٣.٢٥	٠.٠٥١
7	اجمالي الحديد	Total iron	٢.٨٣	٠.٠٤٥
8	النحاس	Copper	٣.١٧	٠.٠٥
9	النيكل	Nickel	٣.٣٢١	٠.٠٥٢
10	الزنك	Zinc	٣.٥٨٥	٠.٠٥٦
11	الرصاص	Lead	٤.٠١٩	٠.٠٦٣
12	اجمالي الكروم	Total chromium	٤.٠٥٧	٠.٠٦٤
13	الزئبق	Mercury	٣.٩٢٣	٠.٠٦٢
14	الزرنيخ	Arsenic	٣.٨٨٥	٠.٠٦١
15	المركبات الفينولية	Phenolic compounds	٣.٦٢٧	٠.٠٥٧
16	الكلورايد	Chlorides	٣.٠٧٨	٠.٠٤٨
17	السيانيد	Cyanide	٣.٦٩٤	٠.٠٥٨
18	اجمالي بكتيريا القولون	Total coliform bacteria	٣.٢٨٩	٠.٠٥٢
		Total	٦٣.١٦٥	١

تشير قيم LPI المنخفضة الى إمكانية تلوث اقل بالعصارة المرتشحة من مكب النفايات وتزداد إمكانية التلوث بزيادة قيمة المؤشر

حدود الدراسة

اقتصرت هذه الدراسة على جمع خمس عينات تمثل جميع مصادر العصارة المتاحة في مكب الازرقين خلال شهر نوفمبر ٢٠٢٣ الذي يمثل ذروة موسم الجفاف في المناخ شبه الجاف لمنطقة الدراسة. تشير الدراسات السابقة الى أن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للعصارة تخضع لتغيرات موسمية ملحوظة بناء على معدلات هطول الأمطار وبالتالي فإن هذه النتائج تعكس الخصائص المكانية للعصارة في ظروف الجفاف ولا نهدف الى تعميمها على جميع مكبات النفايات او على جميع فصول السنة. كما ان الهدف من التحليل التجميعي الهرمي كان استكشافيا لتجميع المتغيرات الفيزيائية والكيميائية وليس لتجميع العينات او تصنيف مواقع اخذ العينات. اضافة الى ذلك، واجهت الدراسة بعض القيود الفنية واللوجستية التي حالت دون اجراء بعض القياسات التي تعتبر روتينية وشائعة في مثل هذه الدراسات. ورغم ذلك،

لم يكن لغياب تلك القياسات تأثير على قيمة البحث الحالي وموثوقيته

٣. النتائج والمناقشة

تم عرض نتائج كلا من الاس الهيدروجين (pH) والتوصيل الكهربائي (EC) واجمالي المواد الصلبة الذائبة (TDS) واجمالي المواد الصلبة (TS) واجمالي الكربون العضوي (TOC) واجمالي نيتروجين كلداهل (TKN) والمواد الصلبة المتطايرة (VS) والطلب على الاكسجين الكيميائي (COD) في الجدول (٤).

٣.١ الأس الهيدروجيني (pH)

يعد الاس الهيدروجيني من اكثر المقاييس المستخدمة شيوعا في قياس جودة العصارة المرتشحة من مكبات النفايات البلدية الصلبة على مستوى العالم [6]. تؤدي قيم الاس الهيدروجيني المنخفضة في مكبات النفايات الى زيادة ذوبانية العناصر الثقيلة واحتمال تسربها الى المياه الجوفية والتربة المحيطة بينما يقل هذا التأثير بزيادة قيم الاس الهيدروجين [20].

تشير نتائج pH الى نطاق حمضي خفيف (٦.٤٤ و٦.٦٥) مع تسجيل اعلى القيم في العينتين ١ و٢ (المأخوذة من الابار) واقلها في العينة ٣. تعد هذه القيم (<٦.٥) من السمات المميزة لمكبات النفايات الصغيرة [21]. حيث يتم تصنيف مكبات النفايات البلدية الصلبة بحسب العمر الى مكبات صغيرة (اقل من ٥ سنوات) ومكبات شابة (من ٥ الى ١٠ سنوات) ومكبات قديمة (اكبر من ١٠ سنوات) [22]. يظهر مكب نفايات الازرقين سمات المكبات الصغيرة رغم انه بدأ في استقبال النفايات في عام ١٩٨٠ ولا يزال هو المكب الوحيد النشط في مدينة صنعاء والمحافظات المجاورة. تتفق قيم pH المسجلة في مكب الازرقين مع تلك المسجلة في مكب هيذرلي بجنوب افريقيا (٦.٥) [23] ومكب محمود بوتي ومكب ساجيان في باكستان (٦.٨) [24]، ومكب الرياض بالسعودية (٦.٢) [25]، بينما كانت اقل من مكب مدينة اب في اليمن (٨.٤٤) [26]. تعزى ذلك الى انخفاض معدل الامطار وبالتالي انخفاض معدل التفاعلات الكيميائية وانخفاض معدل عملية التخفيف واستمرار تدفق النفايات الغنية بالمواد العضوية (حوالي ٦٥%)، ما يعزز الظروف الحمضية.

٣.٢ التوصيل الكهربائي (EC) واجمالي المواد الصلبة الذائبة (TDS)

تعد قيمEC وTDS العالية في عصارة مكبات النفايات البلدية الصلبة دليلا موثوقا على التلوث بالأملاح غير العضوية والمواد العضوية والمعادن الثقيلة الذائبة[28] ,[27]. تراوحت قيم EC بين ٤٠٢٠٠ و٥٠٠٠٠ µS/cm، بينما تراوحت تراكيز TDS بين ٢٠٣٠٠ و٢٥١٠٠ ملجم/لتر. هذه القيم تتجاوز قيمة TDS القصوى (١٥٠٠ ملجم/لتر) المحددة من قبل المعايير اليمنية المقترحة [18]. سجلت العينة رقم ٥ (المأخوذة من المستنقع الرئيسي أسفل المكب) أعلى المستويات لكل من EC (٥٠٠٠٠ µS/cm) وTDS (٢٥١٠٠ ملجم/لتر) والذي قد يكون نتيجة التبخر وزيادة التركيز. تشير هذه النتائج الى خطورة محتملة لهذه العصارة على مصادر المياه والتربة المحيطة خاصة مع عدم وجود أي وسيلة حماية للمستنقع الرئيسي اسفل المكب. بناء على نتائج

دراسة مبكرة، كانت مياه بعض الابار حول مكب الازرقين ملوثة بعدد من العناصر الثقيلة وان مصدر تلك الملوثات هو مكب النفايات [10].

مقارنة بدراسات سابقة، كانت قيم TDS المسجلة في مكب الازرقين اعلى من القيم المسجلة في مكب قرية زندانا في العراق (٢٠١٨ ملجم/لتر) [29]، مكب الصليبية بالكويت (٧٢٦٨.٥ ملجم/لتر) [30]. في حين توافقت مع تلك المسجلة في مكب نفايات برج العرب في مصر (٢٤٩٥٤–٣٠٤٨٢ ملجم/لتر) [31]، ومكب نفايات بير البلح فلسطين (٢٢٣٥٦–٢٥٢٩٦ ملجم/لتر) [32]، ومكب ريفي في اديس ابابا باثيوبيا (١٩٢٢٠–٢٠٩١٠ ملجم/لتر) [33]. من جهة اخرى، كانت اقل من تلك المسجلة في مكب الناصرية للنفايات الخطرة في القاهرة بمصر (٣٨٩٩٠ ملجم/لتر) [34]، والمواقع المغلقة من مكب نفايات همدان في ايران (١٠٩٥٧٢ ملجم/لتر) [35]. يمكن تفسير هذا التباين في قيم TDS بين المواقع المختلفة الى اختلاف الظروف المناخية ونوع النفايات المدفونة والعمليات التشغيلية.

جدول ٤. الخواص الفيزيائية والكيميائية لعينات العصارة الخمس المأخوذة من مكب نفايات الازرقين

المتغير	الرمز	الوحدة	العينة					المعايير اليمنية المقترحة	
			1	2	3	4	5	التصريف الى المجاري المائية والأودية	إعادة تغذية المياه الجوفية
درجة الحرارة	temp	C°	33.3	33.3	24	27	24.2	__	__
الرقم الهيدروجيني	pH	__	6.65	6.64	6.44	6.54	6.53	٦ - ٩	٦ - ٩
التوصيل الكهربائي	EC	µS/cm	46300	44100	42400	40200	50000	__	__
اجمالي المواد الصلبة الذائبة	TDS	mg/l	23100	22100	21300	20300	25100	1500	1500
اجمالي المواد الصلبة	TS	mg/l	32857	24878	43113	22504	40647	__	__
المواد الصلبة المتطايرة	VS	mg/l	18213	9188	26818	7076	8158	__	__
اجمالي الكربون العضوي	TOC	mg/l	10118	5104	14899	3931	4532	__	__
نيتروجين كلداهل الكلي	TKN	mg/l	2242	2242	2802	2242	2242	70	45
نسبة الكربون الى النيتروجين	C/N Ratio	__	4.514	2.277	5.317	1.754	2.022	__	__
الطلب على الاكسجين الكيميائي	COD	mg/l	24278	12247	35748	9433	10875	150	50

٣.٣ الحمل العضوي (COD, TOC)

يعد COD وTOC من اهم مؤشرات التلوث العضوي [٣٦]، [37]. مع إمكانية استبدال COD بـ TOC بسبب العلاقة الخطية القوية بينهما [38]. أظهرت النتائج في الجدول (٤) اختلافات واضحة في COD التي تراوحت بين ٩٤٣٣ –٣٥٧٤٨ ملجم/لتر، مع اعلى قيمة في العينة ٣ (المأخوذة من المجرى الفرعي على متن المكب) والتي تمثل عصارة رشحت عن الجزء النشط من المكب، وأدنى قيمة في العينة ٤. تتجاوز جميع قيم COD المعايير اليمنية المقترحة للتصريف الامن (١٥٠ ملجم/لتر) [18]. مما يشير الى خطر بيئي مرتفع.

تشير قيم COD المرتفعة، خاصة في العينة ٣، إلى أن العصارة المرتشحة لا تزال محملة بنسب عالية من المواد العضوية القابلة للتحلل، نتيجة لاستمرار استقبال المكب للنفايات ذات المحتوى العضوي العالي. على الرغم من أن عمر المكب يتجاوز ٤٥ عام، يفترض من الناحية النظرية وصول المكب إلى مرحلة الاستقرار او المرحلة الميثانية التي تتميز عادة بقيم COD منخفضة (<٣٠٠٠ ملجم/لتر) [2]، إلا أن النتائج الحالية جاءت مناقضة تماما لهذا الافتراض. إضافة الى ذلك، كانت قيمة TOC/COD متقاربة لجميع العينات بمتوسط بلغ ٠.٤٢ وبحسب [39] تصنف عصارة مكب الازرقين بناء على قيمة TOC/COD على انها عصارة شابة (٥-١٠ سنوات). يمكن تفسير ذلك بتاثير "المقبرة الجافة" الناتج عن انخفاض معدل الرطوبة [40]، كما ان وجود كميات هائلة من أكياس النيلون التي تستخدم لمرة واحدة ولا يتم إعادة تدويرها وتحتاج الى مئات السنين لتتحلل [41]، تعمل على عزل النفايات عن الرطوبة. مقارنة بمكبات اخرى. تجاوزت قيم COD في مكب الأزرقين تلك المسجلة في مكب الأغواط في الجزائر (٢١٦٠ ملجم/لتر) [42]، ومكب كركوك في العراق (٩٩٤ ملجم/لتر) [29]. في حين توافقت مع قيم مكب سنندج في ايران (٣٤٦٥٠ ملجم/لتر)[43]، ومكب برج العرب في مصر (١٥٦٢٩ ملجم/لتر) [31]. في المقابل، كانت اقل من تلك المسجلة في مكب كهريزاك في إيران (٦٨٢٥٠ ملجم/لتر) [44]، ومكب الإكيدر في الأردن (٦٤١٠٩ ملجم/لتر) [45].

٣.٤ اجمالي نيتروجين كلداهل الكلي (TKN)

يعد TKN من المؤشرات المهمة على التلوث النيتروجيني وتأثيراته البيئية [46]، وتتراوح قيمه في عصارة مكبات النفايات بين ١٤-٢٥٠٠ملجم/لتر [2]، ويكون اعلى في المكبات الحديثة والنشطة مقارنة بالمكبات القديمة والمغلقة [47]. تراوحت قيم TKN (جدول ٤) بين ٢٢٤٢ و٢٨٠٢ ملجم/لتر، مع اعلى قيمة في العينة ٣ وثبات نسبي في بقية العينات. تعد النفايات العضوية الغنية بالبروتين، المصدر الرئيسي للنيتروجين في مكبات النفايات البلدية الصلبة حيث يؤدي تحللها الى انتاج الامونيا وتراكمها في العصارة [48]. تتجاوز هذه القيم المعايير اليمنية المقترحة للتصريف الامن (٧٠ ملجم/لتر كنيتروجين كلي) [18]، مما يشير الى خطر طويل الأمد على المياه الجوفية والبيئة المحيطة. مقارنة مع دراسات سابقة من مناطق مختلفة، توافقت هذه النتائج مع القيم المرتفعة في مكب حميسي بالجزائر (٤٧٢٠ ملجم/لتر) [49]، ومكب برج العرب في مصر (٥٩٠٣.٥ ملجم/لتر) [50]، ومكب أولاد فايت بالجزائر (٥٢٣٦ ملجم/لتر) [51]، بينما كانت اعلى من تلك المسجلة في مكب قائم شهر في إيران (٥٣٢ ملجم/لتر) [52] ومكب محمود بوتي في باكستان (٤٠٠ ملجم/لتر) [24]. يمكن تفسير ذلك بالمناخ الجاف وانخفاض معدل التخفيف والارتفاع الكبير لطبقات النفايات الذي يناهز ٩٠ مترا في مكب الأزرقين، مما يهيئ ظروف لاهوائية عميقة ومستقرة تعزز من إنتاج الأمونيا وتراكمها، وتحد من فرص تطايرها أو معالجتها طبيعيا.

٣.٥ العناصر الأساسية والثقيلة

قدم التحليل غير المستهدف باستخدام TXRF صورة أولية شاملة للملوثات المعدنية في عصارة مكب الازرقين. كما هو موضح في الجدول (٥). كان متوسط تركيز العناصر، من الأعلى تركيز الى الأدنى كما يلي: K> Fe> Ca> Sr> Ni> Rb والتي بلغت Cu> As> Zn> Mn> U> ٩٠٠.٢١٦، ٥٤.٨٥٧، ٥١.٢٨٢، ١٠.٧٥٥، ١٠.٧٢، ٣.٠٤٨، ٢.٩١٤، ٢.٧٢، ٠.٨٨، ٠.٧١٨، ٠.٠٥١ ملجم/لتر على التوالي.

٣.٥.١ البوتاسيوم (K)

اشارت النتائج الى ان البوتاسيوم كان اعلى العناصر تركيزا في عصارة مكب الازرقين، وتم اكتشافه في جميع العينات التي خضعت للدراسة، بتراكيز تراوحت بين 667 و1282.1ملجم/لتر. تقع هذه القيم ضمن المدى العالمي للبوتاسيوم في عصارة مكبات النفايات الذي يتراوح بين ٥٠ و٣٧٠٠ ملجم/لتر[2]. يمكن تفسير هذه القيم المرتفعة الى ارتفاع كمية النفايات العضوية التي يستقبلها المكب والتي تعد المصدر الرئيسي للبوتاسيوم [1]، والسلوك المحافظ لايونات البوتاسيوم التي تظهر تفاعل طفيف مع عمليات الامتزاز والترسيب وتكوين المعقدات ولا تدخل في تفاعلات الاكسدة والاختزال، والطريقة الوحيدة للتقليل تراكيزها مع الوقت هي الغسيل [2]. لذلك، يعتبر البوتاسيوم مؤشرا موثوقا على تلوث العصارة وحالة التخفيف [54] ,[53]. مقارنة مع دراسات سابقة، كانت قيم البواتاسيوم في عصارة مكب الازرقين أعلى من تلك المسجلة في مكب الصليبية في الكويت (٤٦٨.٦٤ ملجم/لتر) [30]، ومكب بهالسوا في الهند (٤٠ ملجم/لتر) [54]. في المقابل، كانت اقل من المستويات العالية المسجلة في مكب دير البلح في فلسطين (٤٣٤٥.٥ ملجم/لتر) [32]، ومكب همدان في إيران (٩٨٣٣ ملجم/لتر) [35]، ومكبي الدار البيضاء ومراكش في المغرب (٢٠٥٢.٢٦ و٢٩٣٨.٨٢ ملجم/لتر على التوالي) [55]، ومكب مدينة اب في اليمن (4833.33 ملجم/لتر) [26].

٣.٥.٢ الكالسيوم (Ca)

على النقيض من البوتاسيوم، ظهر الكالسيوم في عينتين فقط (العينة ٣ و١) من أصل خمس عينات خضعت للتحليل، بقيم تراوحت بين ١٣٠.٤١ و١٢٦.٣ ملجم/لتر. تعد نفايات البناء والهدم والرماد، المصادر الرئيسية للكالسيوم كما يعد الحمل العضوي العالي عامل أساسي في تعزيز ذوبانيته [56]، وهو ما يفسر ظهوره في العينة ٣ و١. في المقابل، يمكن تفسير غيابه في بقية العينات بالطبيعة الايونية الشديدة التفاعل للكالسيوم، وقدرته العالية على الارتباط بمواقع التبادل الكاتيوني على اسطح غرويات التربة والنفايات الأخرى اثناء جريان العصارة في المكب [2]. بشكل عام، كانت قيم الكالسيوم في عصارة مكب الازرقين ضمن الحدود العالمية التي تتراوح من ١٠ الى ٧٢٠٠ ملجم/لتر [3]، واقل من المعايير اليمنية المقترحة للتصريف الامن (٢٠٠ ملجم/لتر) [18]. بيئيا، يؤدي تسرب الكالسيوم الى عسر المياه الجوفية وهو ما تؤكده دراسة سابقة لـ١٢ بئر حول مكب الازرقين [10].

٣.٥.٣ الحديد (Fe)

تم اكتشاف الحديد في ٤ من أصل ٥ عينات، مع تسجيل اعلى تركيز في العينات ٢ و١ (المأخوذة

من البئرين) والتي بلغت ١٨٨.١٨ و٥٠.٣٣٩ ملجم/لتر على التوالي، بينما انخفضت في العينات السطحية الأخرى. يمكن ان يعزى ارتفاع تركيزه في العينات العميقة الى الظروف الاختزالية السائدة التي تزيد من ذوبانية الحديد، وظروف الاكسدة والترسيب في العينات السطحية [57] ,[2]. بشكل عام، تقع هذه القيم ضمن الحدود العالمية للحديد التي يتراوح بين ٣–٥٥٠٠ ملجم/لتر [2]. رغم ذلك، تجاوزت تلك القيم المعايير اليمنية المقترحة للتصريف الامن (٥ ملجم/لتر) [18]. المصدر الرئيسي للحديد في مكبات النفايات هو نفايات الحديد والفولاذ التي يتم دفنها بصورة مختلطة مع النفايات الأخرى [57]. يمكن ان يؤدي تعرض الانسان لتراكيز عالية من الحديد الى اضطرابات في الجهاز الهضمي وتلف الانسجة وتصبغات مميزة في الجلد [58] وتكون تلك التاثيرات مضاعفة عند الأطفال [59].

مقارنة مع دراسات سابقة، كانت هذه القيم اعلى من تلك المسجلة في مكب الصليبية المغلق (١.٧٨ ملجم/لتر) في الكويت [30]، ومكب الإسكندرية (6.314 ملجم/لتر) في مصر [31]، ومكب حميسي (12.4 ملجم/لتر) في الجزائر [49]. في حين كانت مقاربة لتلك المسجلة في مكب الرياض (167.61 ملجم/لتر) في السعودية [25]، ومكب قائم شهر (81.9 ملجم/لتر) في ايران [52]، ومكب مدينة اب (45.87 ملجم/لتر) في اليمن [26]. في المقابل، كان متوسط تركيز الحديد في عصارة مكب الازرقين اقل بكثير من تلك المسجلة في مكب الدار البيضاء (2199.68 ملجم/لتر) ومكب مراكش (474.606 ملجم/لتر) في المغرب [55]. تعود تلك الاختلافات الى طبيعة المواد المدفونة ومرحلة التحلل التي يمر بها المكب وحالة التشغيل التي تؤثر بشكل مباشر على تركيز الملوثات في العصارة.

٣.٥.٤ العناصر الثقيلة

تم العثور على المنجنيز (Mn) في العينة ١ فقط بتركيز بلغ ١٣.٦٤٤ ملجم/لتر. تقع هذه القيمة ضمن المدى العالمي لتراكيز المنجنيز في عصارة المكبات في المرحلة الحمضية والذي يتراوح بين ٠.٠٣ و٦٥ ملجم/لتر [3]. هذه القيمة تتجاوز المعايير اليمنية المقترحة للتصريف الامن (٠.٢ ملجم/لتر) [18]. يعزى وجود المنجنيز في عصارة المكبات إلى التخلص العشوائي من النفايات المعدنية والمطلية بالمعادن، مثل البطاريات، والأجهزة الكهربائية، ومصابيح الإضاءة، والدهانات، والزجاج [60]. تتحكم عمليات الاكسدة والاختزال في ذوبانية وانتقال العنصر الى المياه الجوفية، وقد وجد في دراسة مبكرة ان ٤ من اصل ١٢ بئر حول مكب الازرقين كانت ملوثة بالمنجنز [10]. يمكن تفسير التباين الكبير في تركيز المنجنيز وبقية العناصر الثقيلة المدروسة، بين مواقع اخذ العينات المختلفة الى التباين المكاني وعدم تجانس النفايات داخل المكب والذي يؤدي الى وجود نقاط ساخنة لا تتجاوز مساحتها ١٠% من مساحة المكب، تكون فيها تراكيز الملوثات اعلى بـ ٢٠ –١٠٠٠ مرة من المناطق المجاورة لها [2]،

جدول ٥. نتائج تحليل العناصر الأساسية والثقيلة في عينات العصارة الخمس المأخوذة من مكب نفايات الازرقين

المتغير	الرمز	الوحدة	العينة					المعايير اليمنية المقترحة لـ	
			١	٢	٣	٤	٥	التصريف إلى المجاري المائية والأودية	إعادة تغذية المياه الجوفية
البوتاسيوم	K	mg/l	٦٦٧	٦٦٥.٦١	١٢٨٢.١	٨١٦.٩٧	١٠٦٩.٤	___	___
الكالسيوم	Ca	mg/l	١٢٦	ND	١٣٠.٤١	ND	ND	٢٠٠	٢٠٠
المنجنيز	Mn	mg/l	١٣.٦	ND	ND	ND	ND	٠.٢	٠.٢
الحديد	Fe	mg/l	٥٠.٣	١٨٨.١٨	ND	٧.٦٥١	٢٨.١٥٥	٥	٥
الزنك	Zn	mg/l	٢.٧٨	ND	٠.٤٥٩	٠.٥٤٩	٠.٦١٣	٥	٥
النحاس	Cu	mg/l	ND	ND	ND	ND	٠.٢٥٧	٠.٢	٠.٢
الزرنيخ	As	mg/l	١.٦٧	ND	١.٠٩٣	ND	٠.٨٢٨	٠.٠٥	٠.٠٥
الروبيديوم	Rb	mg/l	٢.٤٥	٢.٧٨٤	٣.٤٨٢	٣.٠٦٩	٣.٤٥٧	___	___
السترونتيوم	Sr	mg/l	١٣.٤	١٠.٢٣٨	١١.٨٠٩	٨.٤٧٩	٩.٨٤٩	___	___
اليورانيوم	U	mg/l	٤.٢	٣.٤٣٨	٣.٣٦	ND	٣.٥٧١	___	___
الرصاص	Pb	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	٠.٢	٠.٢
النيكل	Ni	mg/l	١٠.٥	٣.١	٥.٤	٢٥.٣	٩.٣	٠.٢	٠.٢

ND: لم يتم اكتشافه

تم اكتشاف الزنك في ٤ من اصل ٥ عينات بتراكيز تراوحت بين٠.٤٥٩ و٢.٧٧٧ ملجم/لتر. هذه القيم تقع ضمن المدى العالمي في المكبات التي تمر بالمرحلة الحامضية (٠.١ – ١٢٠ ملجم/لتر) [3]، وهي اقل من المعايير اليمنية للتصريف الامن (٥ ملجم/لتر) [18]. يشير وجود الزنك في عصارة مكب نفايات الازرقين الى ان المكب يتلقى نفايات صناعية مثل البطاريات والمصابيح الفلورانسية وشاشات التلفزيونات والدهانات الاصطناعية [35], [57], [61]. تم اكتشاف الزرنيخ في ٣ من اصل ٥ عينات بتراكيز تراوحت بين ٠.٨٢٨ و١.٦٦٥ ملجم/لتر. تتجاوز هذه القيم المعايير اليمنية المقترحة للتصريف الامن (٠.٠٥ ملجم/لتر) [18]. تشير هذه القيم الى ان المكب يتلقى النفايات الالكترونية وشرائح الكمبيوتر وشاشات العرض البلوري السائل إضافة الى نفايات الأسمدة الزراعية [6]. تساهم الظروف اللاهوائية الاختزالية في عمق المكب والاس الهيدروجيني المائل

الى الحمضية في العينات السطحية في تحرير الزرنيخ وجعلة في صورة ذائبة سهلة الحركة ويمكن ان ينتقل بسهولة الى المياه الجوفية أسفل المكب. يؤدي وجود الزرنيخ في مياه الشرب بتركيز ٠.٠١ ملجم/لتر الى مخاطر صحية سرطانية وغير سرطانية واضطرابات عصبية وامراض القلب والاوعية الدموية [62]. تتوافق قيم الزرنيخ في عصارة مكب الازرقين مع تلك المسجلة في مكب بهالسوا (١.٨٦ ملجم/لتر) في الهند [54]، والموقع المغلق من مكب همدان (١.٤٨ ملجم/لتر) في إيران [35]، ومكب الرياض (١.٣٢٨ ملجم/لتر) في السعودية [25]. في المقابل، كانت تراكيز الزرنيخ في عصارة مكب الازرقين اعلى بكثير من القيم المسجلة في مكب الصليبية (٠.١٦ ملجم/لتر) في الكويت [30]، ومكب محمود بوتي (٠.٢ ملجم/لتر) في باكستان [24]، ومكب الإكيدر (٠.٠٩٢ ملجم/لتر) في الأردن [45]. أظهرت نتائج تحليل TXRF وجود اليورانيوم في ٤ من اصل ٥ عينات خضعت للدراسة، بقيم تراوحت بين ٣.٣٦ و٤.٢٠٤ ملجم/لتر. نظرا لان هذه القيم تعد عالية جدا مقارنة بالقيمة الارشادية لليورانيوم في مياه الشرب (٠.٠٣ ملجم/لتر) [62]، ولأنه تم الحصول عليها باستخدام تقنية TXRF فقط، فانه يجب تفسيرها بحذر باعتبارها مؤشرات أولية تتطلب التحقق مستقبلا باستخدام تقنيات تحليل مرجعية مثل ICP-MS او ICP-OES قبل اعتمادها بصورة نهائية. اليورانيوم هو احد العناصر الثقيلة شائعة الانتشار في الطبيعة، بما في ذلك جميع أنواع التربة والصخور والبحار والمحيطات والمياه الجوفية [63]. قد يؤدي التعرض طويل المدى لليورانيوم الى الفشل الكلوي وامراض الجهاز التنفسي وخصوصا عند الأطفال [62]. نادرا ما يتم الإبلاغ عن وجدود اليورانيوم في عصارة مكبات النفايات البلدية الصلبة. يمكن تعليل ذلك بان اغلب الدراسات التي تناولت تقييم جودة عصارة المكبات كانت تستهدف عناصر بعينها. ومع ذلك، فقد ابلغ عدد من الباحثين عن وجود اليورانيوم في مكبات النفايات. ابلغ Fermo واخرون (١٩٩٩) عند تحليل رماد من محرقة نفايات بلدية صلبة باستخدام تقنية TXRF عن وجود اليورانيوم بتركيز اقل من ٢٠ جرام/كجم من الرماد [64]. كما تم العثور على اليورانيوم في التربة المحيطة بمكب نفايات كاربونج-ملكا في ماليزيا (٣-١٠ ملجم/كجم) في جميع النقاط التي تم فحصها حول المكب [65]. يمكن ان يكون مصدر اليورانيوم في عصارة مكبات النفايات البلدية الصلبة طبيعيا نتيجة وجوده في التربة والصخور المحيطة التي تستخدم لتغطية النفايات، او من مصادر أخرى بشرية كدفن نفايات البناء والهدم ونفايات السيراميك ونفايات الأسمدة الفسفورية والنفايات الطبية، والتي تحتوي في الغالب على تراكيز متفاوتة من اليورانيوم [63]. أظهرت النتائج المعروضة في الجدول (٥) وجود مستمر لعنصر النيكل (Ni) في كافة العينات المدروسة، بقيم تراوحت بين ٢٥.٣ و ٣.١ ملجم/لتر. تشير التراكيز العالية من النيكل في جميع العينات الى وجود مصدر ثابت ومستمر للملوثات المحتوية على العنصر. تعد نفايات

منتجات الطلاء والبطاريات والمصابيح والأدوات المعدنية وسبائك الفولاذ المقاوم للصدأ وصنابير المياه المصدر الرئيسي للنيكل في عصارة مكبات النفايات [66] ,[45]. تتجاوز هذه القيم المعايير اليمنية المقترحة للتصريف الامن (٠.٢ ملجم/لتر) [18]. وبسبب سميته العالية وخواصه المسرطنة، حددت منظمة الصحة العالمية القيمة ٠.٠٧ ملجم/لتر كحد اقصى لتركيز النيكل في مياه الشرب [62]. بمقارنة هذه النتائج مع مكبات محلية وإقليمية مشابهه نجد ان تركيز النيكل في عصارة مكب الازرقين كانت اعلى بكثير من تلك المسجلة في مكب الإسكندرية (٠.٠٩٦ ملجم/لتر) في مصر [31]، ومكب الصليبية المغلق (٠.١٥ ملجم/لتر) في الكويت [30]، ومكب حميسي (٠.٣٣ ملجم/لتر) في الجزائر[49]. حتى في المكبات التي تعاني من سوء الإدارة وضعف في عملية الفرز مثل مكب مدينة إب (١.٧٥ ملجم/لتر) في اليمن [26]، ومكب كركوك (٢.٤٢ ملجم/لتر) في العراق [29]. لم تصل فيها تراكيز النيكل الى المستوى العالي المسجل في عصارة مكب الازرقين (متوسط ١٠.٧٢ ملجم/لتر). المكبات الوحيدة التي تسجل مثل هذه التراكيز المرتفعة من النيكل هي مكبات النفايات الخطرة مثل مكب برج العرب (٣٧.٢ ملجم/لتر) [67]، ومكب الناصرية (٣٨.٥ ملجم/لتر) [68] في مصر. يمكن ان يعزى التباين الكبير بين تركيز النيكل في عصارة مكب الازرقين والتراكيز المسجلة في مكبات أخرى الى نوع النفايات والمرحلة التي يمر بها المكب والاس الهيدروجيني للعصارة والظروف المناخية السائدة. يستقبل مكب الازرقين النفايات المختلطة من كل الأنواع بما في ذلك النفايات الصناعية والالكترونية والمعادن والتي تعد من النفايات الخطرة ومصدر رئيسي للنيكل والعناصر الثقيلة الأخرى [69]، كما ان التركيز العالي للمواد العضوية الذائبة والغرويات في مكب الازرقين تشكل معقدات معدنية ذائبة مع العناصر الثقيلة بما في ذلك النيكل وتجعلها ذائبة في العصارة. إضافة الى ذلك لا يزال المكب نشط وفي مرحلة انتاج الاحماض (pH ٦.٥٦) والتي تساهم بشكل كبير في اذابة النيكل والعناصر الثقيلة الأخرى ورفع تركيزها في العصارة. كما ان نقص معدل الامطار يجعل من عملية التخفيف بالغسيل غير مؤثرة مما يبقي تراكيز الملوثات مرتفعة حتى بعد أكثر من ٤٥ سنة من بدء تشغيل المكب. نظرا للطبيعة الطبوغرافية المنحدرة لمكب الازرقين من الشمال الى الجنوب باتجاه العاصمة صنعاء، حيث تتجمع جميع العصارة المرتشحة من النفايات في المستنقع الرئيسي أسفل المكب، والتي تم تمثيلها في العينة ٥، فان تراكيز الملوثات في هذا المستنقع هي التي تملك التاثير الأكبر على المياه الجوفية والتربة المحيطة. تجاوزت قيم الحديد والنحاس والزرنيخ والنيكل في العينة ٥ المعايير اليمنية المقترحة بتراكيز بلغت ٢٨.١٥٥، ٠.٢٥٧، ٠.٨٢٨، ٩.٣ ملجم/لتر على التوالي. كما بلغ تركيز اليورانيوم ٩.٣

ملجم/لتر، متجاوزا القيمة (٠.٠٣ ملجم/لتر) المقترحة إضافة الى ذلك تم اكتشاف النحاس في العينة ٥ حصرا بتركيز بلغ ٠.٢٥٧ ملجم/لتر. هذه القيمة تتجاوز المعايير اليمنية المقترحة للتصريف الامن (٠.٢ ملجم/لتر) [18]. يمكن تفسير ذلك بالظروف الهوائية التي تعمل على اكسدة كبريتيد النحاس الى كبريتات النحاس ($CuSO_4$) الذائبة [2]، وتاثير التبخر من سطح المستنقع الذي يزيد من تركيز الملوثات. يؤدي التعرض قصير الأمد لتراكيز عالية من النحاس في مياه الشرب الى تهيج مباشر في الجهاز الهضمي، لذلك يجب ان لا يتجاوز تركيز النحاس في مياه الشرب القيمة الارشادية ٢ ملجم/لتر المحددة من قبل منظمة الصحة العالمية [62].

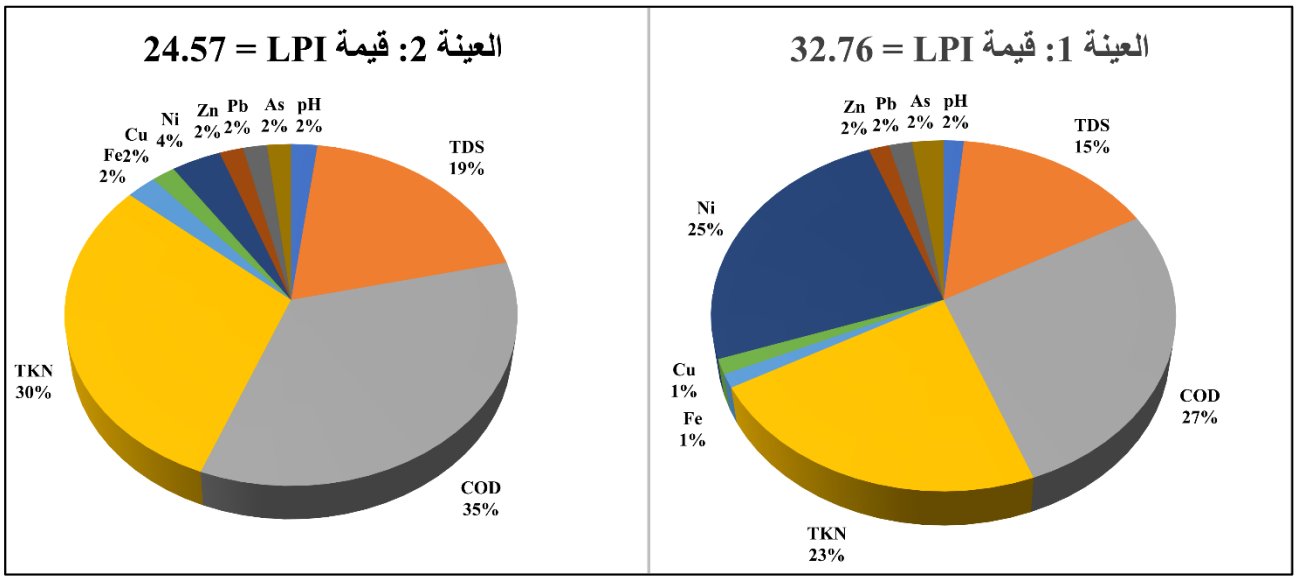
تشير هذه النتائج مجتمعة إلى أن المستنقع الرئيسي أسفل المكب يمثل المصدر الأكثر تأثير على المياه الجوفية والتربة المحيطة. وعليه، فإن تقييم خطورة المستنقع الرئيسي لا يستند فقط إلى تراكيز الملوثات المقاسة، وإنما إلى دوره الهيدرولوجي باعتباره نقطة التجميع النهائية للعصارة، حيث تزداد احتمالية تسرب الملوثات إلى التربة والمياه الجوفية وخصوصا في ضل غياب أي وسائل حماية أو نظام لجمع ومعالجة العصارة.

٣.٦ مؤشر تلوث العصارة (LPI)

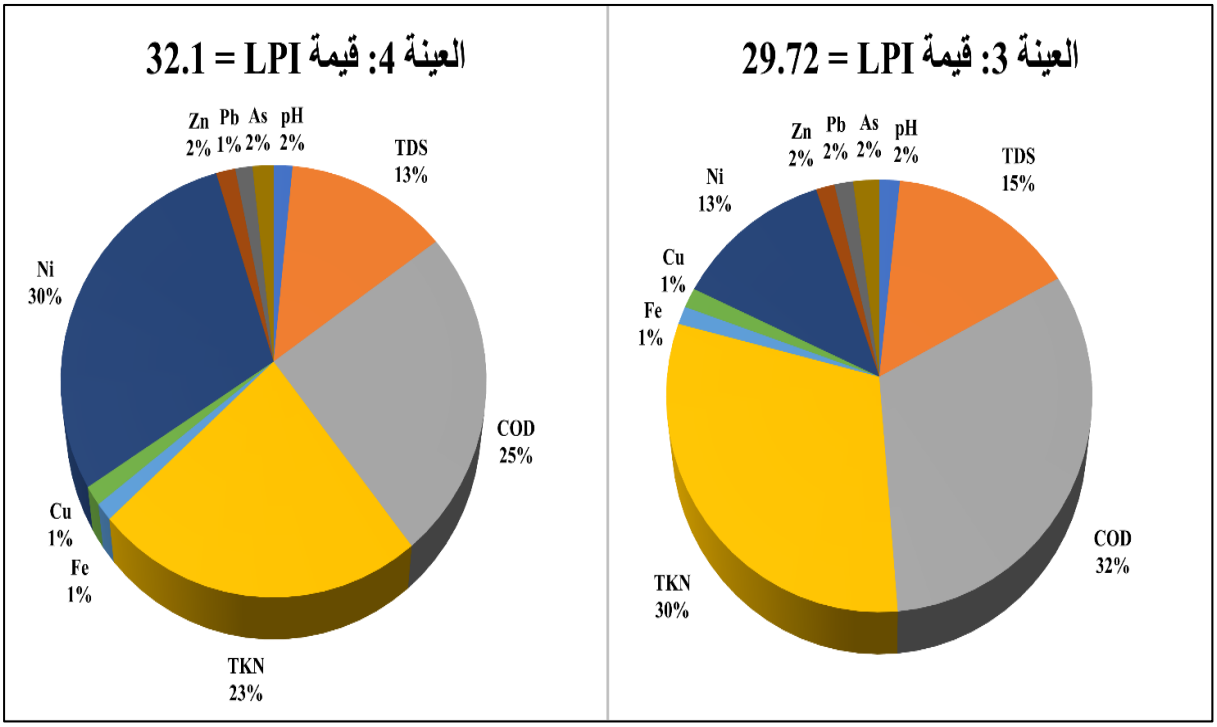
كان الهدف من حساب قيم مؤشر تلوث العصارة (LPI) لمكب الازرقين، الموضح في الجدول (٦)، هو تقييم احتمالية ان تؤدي تلك العصارة الى تلويث المياه الجوفية اسفل المكب، ولمقارنتها مع قيم LPI التي تم من قبل منظمة الصحة العالمية في مياه الشرب. الإبلاغ عنها من مكبات أخرى في مناطق مشابهه. أظهرت النتائج وجود تباين في قيم مؤشر تلوث العصارة بين مواقع اخذ العينات المختلفة. بلغت ادنى قيمة ٢٤.٥٧ في العينة ٢ (الماخوذه من البئر الثاني). بينما بلغت اقصى قيمة ٣٢.٧٦ في العينة ١ (الماخوذة من البئر الاول)، تلتها العينات ٤ (الماخوذة من المجرى الرئيسي أسفل المكب) و٥ (الماخوذة من المستنقع الرئيسي اسفل المكب) بقيم متقاربة بلغت ٣٢.١٠ و ٣١.٩١ على التوالي. تتجاوز هذه القيم المرتفعة بشكل كبير القيمة القياسية للمؤشر (٧.٣٧٨) المسموح بها لتصريف العصارة الى المياه السطحية [70]. كما تصنف احتمالية التلوث بالعصارة بناء على قيم LPI الى ثلاث فئات: عالية (٢٦.٥) ومتوسطة (٢٣.٦) ومنخفضة/مستقرة (١٧.٥) [6]. وبناء عليه، يمكن تصنيف عصارة مكب الازرقين ضمن العصارة شديدة الخطورة وقد يكون لديها إمكانية عالية لإحداث التلوث في جميع المواقع التي تضمنتها للدراسة. كما هو موضح في الشكل (٢)، يعزى ارتفاع قيم LPI في مكب الأزرقين بشكل رئيسي إلى المساهمات الفردية لأربعة ملوثات أساسية هي: COD و TKN و Ni و TDS. يشكل الحمل العضوي (COD) المساهم الأكبر بنسبة تتراوح بين ٢٤.٧٢% و٣٤.٦٠% من إجمالي قيمة المؤشر في المواقع المختلفة، يليه TKN بنسبة مساهمة تراوحت بين ٢٢.٧٧% و٣٠.٣٧%، مما يعكس التحلل الكثيف للنفايات العضوية وبقايا الطعام الغنية بالبروتينات.

كما يبرز الدور الخطير والمتباين لعنصر النيكل (Ni) الذي ساهم بنسبة عالية جدا وصلت إلى ٢٩.٦١% في العينة ٤ (الماخوذه من المجرى الرئيسي اسفل المكب) و٢٤.٦٧% في العينة ١ (الماخوذه من البئر الأول)، مما يشير الى وجود بؤر تلوث تتركز فيها نفايات صناعية أو إلكترونية خطرة. وأخيرا، تساهم المواد الصلبة الذائبة (TDS) بنسبة ملحوظة تتراوح بين ١٣.٣٨% و١٩.٣٥%. في المقابل، كانت مساهمة بقية المؤشرات (الأس الهيدروجيني، والحديد، والنحاس، والزنك، والزرنيخ) منخفضة حيث لم تتجاوز ٢.٥% لكل منها. تشير هذه النتائج الى أن الخطورة العالية لعصارة المكب ناتجة بشكل مباشر عن التخلص من النفايات العضوية والنفايات الصناعية او الالكترونية الخطرة ونفايات البناء والهدم والرماد.

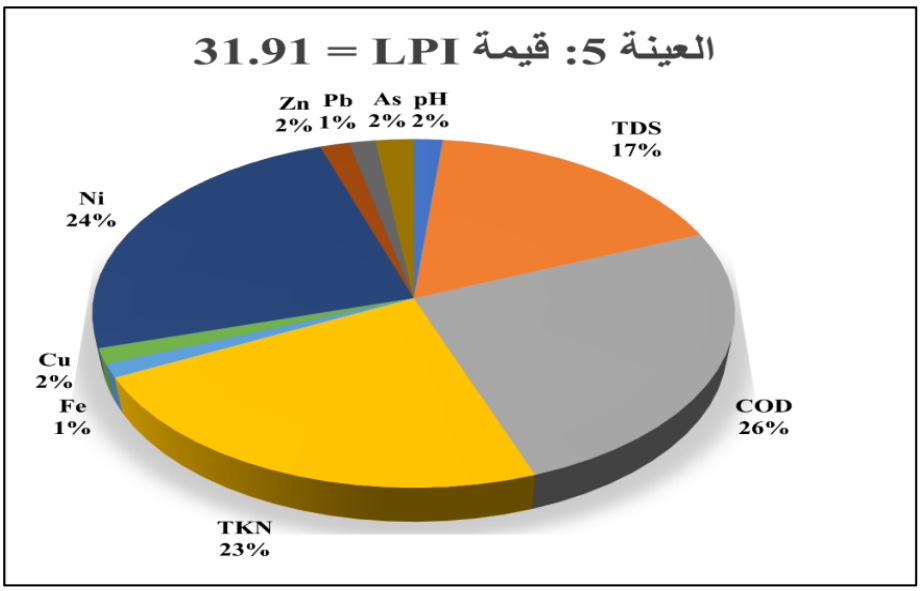
وعند مقارنة هذه النتائج إقليميا وعالميا، نجد أن التلوث في مكب الأزرقين (بمتوسط LPI يفوق ٣٠ لبعض العينات) يتجاوز بوضوح التلوث المسجل في مكبات المدن الكبرى مثل نيودلهي بالهند، والتي تراوحت قيم مؤشرها بين ٢٠.٢٨ و ٢٦.٦١ [54]، ومكب كركوك في العراق الذي سجل ٦.٦٥١ قبل المعالجة [29]، ومكب مدينة كانبور(٦.٤٤-٦.٩١) في الهند [71]. في المقابل، تتوافق هذه المستويات في الأزرقين مع المكبات العشوائية شديدة التلوث كمكب دابا النشط في مدينة كولكاتا الهندية (34.02) [53]، رغم أنها تبقى أقل من الحالات المتطرفة جدا كمكب مدينة فاس في المغرب الذي سجل قيمة هائلة بلغت ٨٨.٨ نتيجة التراكيز الاستثنائية للحمل العضوي [72].



الشكل ٢ أ. المساهمة الفردية للملوثات المختلفة في قيمة LPI للعينات المأخوذة من عمق المكب



الشكل ٢ ب. المساهمة الفردية للملوثات المختلفة في قيمة LPI للعينات المأخوذة من المجاري السطحية



الشكل ٢ جـ. المساهمة الفردية للملوثات المختلفة في قيمة LPI للعينة المأخوذة من المستنقع الرئيسي

جدول ٦. حساب مؤشر تلوث العصارة LPI لعينات العصارة الخمس المأخوذة من مكب نفايات الازرقين

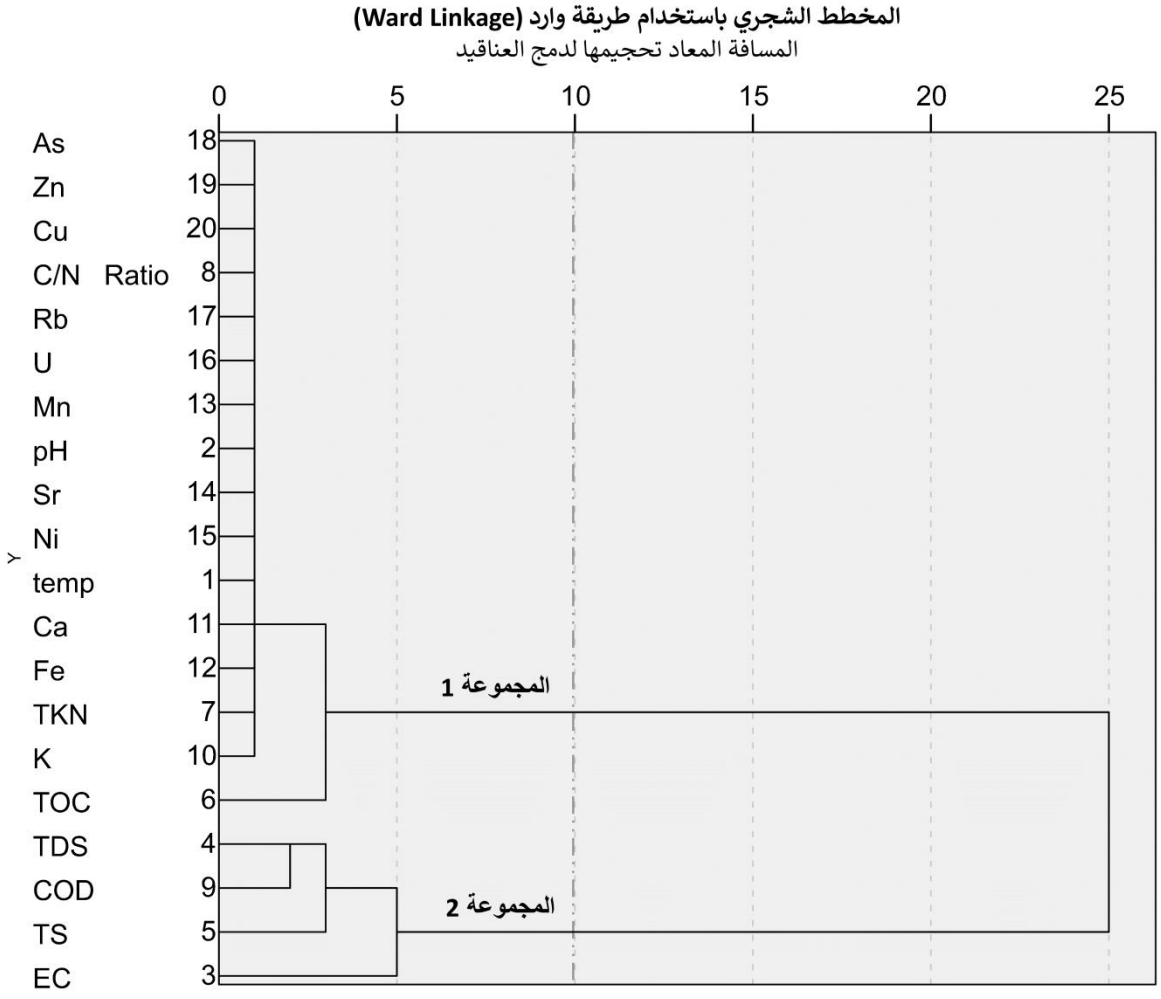
الملوث	التركيز					قيمة التقييم الفردي p_i					الوزن النسبي w_i	التقييم المرجع للتلوث $p_i w_i$				
	العينة															
	١	٢	٣	٤	٥	١	٢	٣	٤	٥		١	٢	٣	٤	٥
pH	٦.٦٥	٦.٦٤	٦.٤٤	٦.٥٤	٦.٥٣	٥	٥	٥	٥	٥	٠.٠٥٥	٠.٢٧٥	٠.٢٧٥	٠.٢٧٥	٠.٢٧٥	٠.٢٧٥
TDS	٢٣١٠٠	٢٢١٠٠	٢١٣٠٠	٢٠٣٠٠	٢٥١٠٠	٥٥	٥٢	٥٠	٤٧	٦٠	٠.٠٥	٢.٧٥	٢.٦	٢.٥	٢.٣٥	٣
COD	٢٤٢٧٨	١٢٢٤٧	٣٥٧٤٨	٩٤٣٣	١٠٨٧٥	٧٩	٧٥	٨٣	٧٠	٧٢	٠.٠٦٢	٤.٨٩٨	٤.٦٥	٥.١٤٦	٤.٣٤	٤.٤٦٤
TKN	٢٢٤٢	٢٢٤٢	٢٨٠٢	٢٢٤٢	٢٢٤٢	٧٧	٧٧	٩٣	٧٧	٧٧	٠.٠٥٣	٤.٠٨١	٤.٠٨١	٤.٩٢٩	٤.٠٨١	٤.٠٨١
Total Fe	٥٠.٣٤	١٨٨.٢	٠	٧.٦٥١	٢٨.١٦	٥	٧	٥	٥	٥	٠.٠٤٥	٠.٢٢٥	٠.٣١٥	٠.٢٢٥	٠.٢٢٥	٠.٢٢٥
Cu	٠	٠	٠	٠	٠.٢٥٧	٥	٥	٥	٥	٥	٠.٠٥	٠.٢٥	٠.٢٥	٠.٢٥	٠.٢٥	٠.٢٥
Ni	١٠.٥	٣.١	٥.٤	٢٥.٣	٩.٣	٨٥	١٠	٤٠	١٠٠	٨٢	٠.٠٥٢	٤.٤٢	٠.٥٢	٢.٠٨	٥.٢	٤.٢٦٤
Zn	٢.٧٧٧	٠	٠.٤٥٩	٠.٥٤٩	٠.٦١٣	٥	٥	٥	٥	٥	٠.٠٥٦	٠.٢٨	٠.٢٥	٠.٢٥	٠.٢٨	٠.٢٨
Pb	٠	٠	٠	٠	٠	٥	٥	٥	٥	٥	٠.٠٦٣	٠.٣١٥	٠.٢٥	٠.٢٥	٠.٢٥	٠.٢٥
As	١.٦٦٥	٠	١.٠٩٣	٠	٠.٨٢٨	٧	٥	٧	٥	٦	٠.٠٦١	٠.٤٢٧	٠.٢٥	٠.٣٥	٠.٣٠٥	٠.٣٦٦
المجموع											٠.٥٤٧	١٧.٩٢١	١٣.٤٤١	١٦.٢٥٥	١٧.٥٥٦	١٧.٤٥٥
العينة												١	٢	٣	٤	٥
قيمة LPI												٣٢.٧٦	٢٤.٥٧	٢٩.٧٢	٣٢.١	٣١.٩١

جميع القيم مبلغ عنها بوحدة (mg/l) ما عدى pH

٣.٧ التحليل العنقودي الهرمي

يعد التحليل التجميعي الهرمي (HCA) أداة إحصائية قوية لتجميع المتغيرات أو العينات في مجموعات متجانسة بناء على خصائصها الكيميائية [71]. وتكمن أهمية هذا التحليل في قدرته الكبيرة على كشف الأنماط السلوكية غير المرئية في كميات ضخمة ومعقدة من البيانات، وتحويلها الى مخطط شجري يمكن من خلاله رؤية أوجه التشابه بسهولة [61].

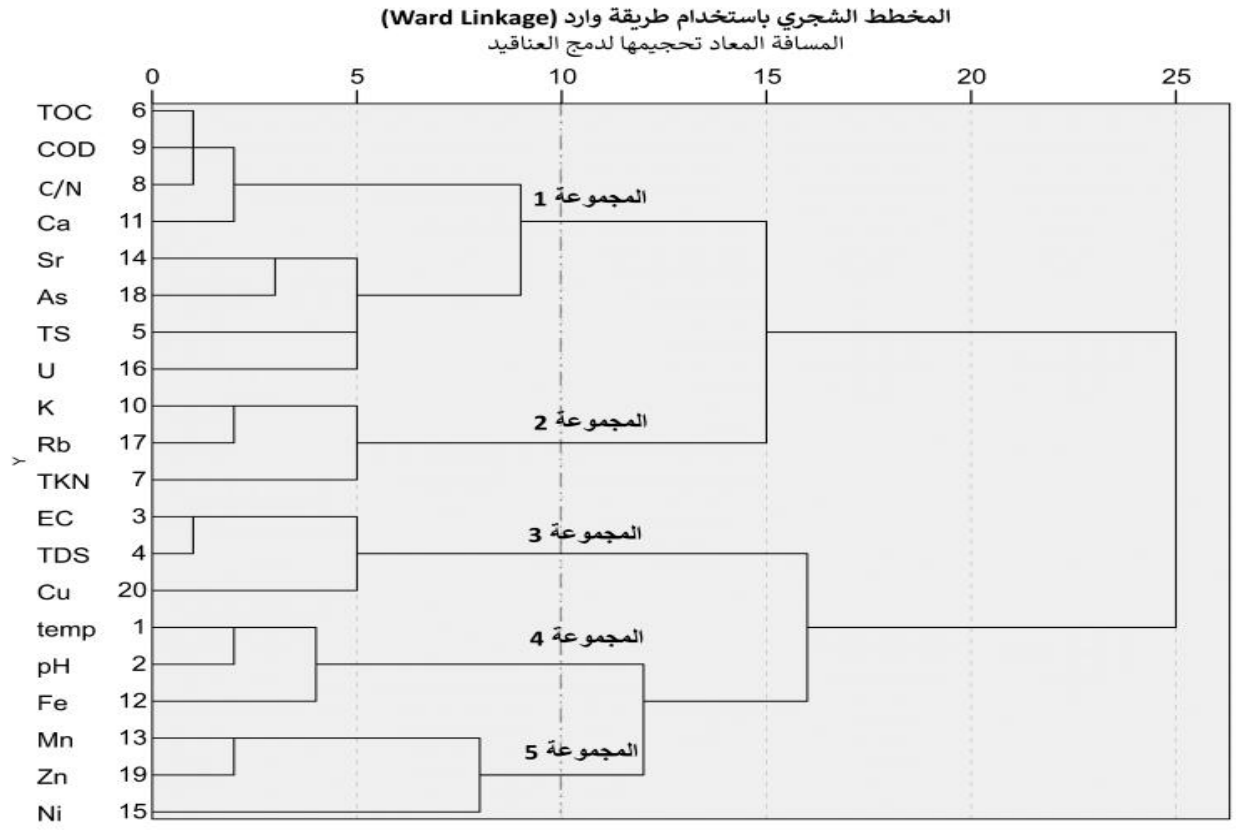
يعرض المخطط الشجري الموضح في الشكل (٣) نتائج مجموعتين رئيسيتين بناء على تراكيزها الكيميائية. المجموعة الاولى تضمنت ١٦ صفة مقاسة في حين ضمت المجموعة الثانية ٤ صفات فقط وهي TDS، COD، TS وEC. يشير هذا التوزيع الى الفروقات الكبيرة بين تراكيز الصفات المقاسة بدلا من التوزيع بناء على الخواص الكيميائية الحقيقية، وهو قصور شائع عند التعامل مع بيانات متباينة تتراوح بين >١ كما هو الحال مع تراكيز العناصر الثقيلة وعشرات الالاف كما في EC وTDS [73].



الشكل ٣. المخطط الشجري للخواص الكيميائية بدون التحويل اللوغاريتمي

في المقابل أسفر اجراء HCA بعد التحويل اللوغاريتمي، الى انشاء بنية شجرية أكثر دقة ومنطقية. الشكل (٤) يوضح انه عند رسم خط القطع الوهمي عند المسافة ١٠، تم الحصول على خمس مجموعات رئيسية ذات خواص كيميائية متشابهة.

تضمنت المجموعة الأولى كلا من الحمل العضوي وبعض العناصر (TOC, COD, C/N, Ca, Sr, As, TS, U)، والتي تشير الى العلاقة الجيوكيميائية الوثيقة بين الحمل العضوي وذوبانية العناصر (Ca, Sr) [73], [56]، وتكوين معقدات مع العناصر الثقيلة (U, As) [74]، مما يجعلها اكثر قابلية للحركة داخل العصارة. وتضمنت المجموع الثانية (K, Rb, TKN) وهي عناصر لا تتاثر بدرجة استقرار المكب وتضل تراكيزها ثابته مع مرور الوقت [3]، وتضمنت المجموعة الثالثة (EC, TDS, Cu) حيث ثبت وجود النحاس مرتبطا بالغرويات العضوية التي هي جزء من اجمالي المواد الصلبة الذائبة والتي يمكنها توصيل الكهرباء [2]، وتضمنت المجموعة الرابعة (temp, pH, Fe) حيث تعتمد عملية ذوبان وترسيب الحديد على pH الوسط ودرجة الحرارة، وتضمنت المجموعة الخامسة (Mn, Zn, Ni) والتي تشير الى مصدر بشري واحد لتلك العناصر.



الشكل ٤. المخطط الشجري للخواص الكيميائية مع التحويل اللوغاريتمي

٤. الاستنتاجات

تشير نتائج هذه الدراسة الى أن عصارة مكب الأزرقين تصنف ضمن العصارة شديدة التلوث، ويمكن ان تمثل تهديدا بيئيا وصحيا خطيرا لموارد المياه الجوفية والبيئة المحيطة. وتتضح أبرز استنتاجات الدراسة فيما يلي:

- **استمرار النشاط البيولوجي وتأخر الاستقرار:** على الرغم من مرور أكثر من أربعة عقود على تشغيل المكب، إلا أن العصارة المرتشحة لا تزال تظهر سمات المكبات الشابة أو غير المستقرة، متمثلة في قيم حمضية خفيفة (pH يتراوح بين ٦.٤٤ و٦.٦٥)، وحمل عضوي عالي (COD حتى ٣٥,٧٤٨ ملجم/لتر)، وتراكيز نيتروجينية عالية (TKN يصل إلى ٢٨٠٢ ملجم/لتر)، وقيمة TOC/COD بلغت ٠.٤٢. يحتمل أن يعود هذا التأخر في الوصول إلى المرحلة الميثانية المستقرة إلى نقص الرطوبة في المناخ شبه الجاف للمنطقة (المقبرة الجافة) ووجود كميات هائلة من المواد البلاستيكية التي تعيق التحلل الكامل.
- **التلوث الملحي والمعدني الشديد:** سجلت العصارة قيما عالية في التوصيل الكهربائي (EC) وإجمالي المواد الصلبة الذائبة (TDS) والتي وصلت إلى ذروتها بتركيز ٢٥,١٠٠ ملجم/لتر في المستنقع السطحي المكشوف نتيجة لعامل التبخر، متجاوزة بذلك الحد المسموح به في المواصفات اليمنية المقترحة لتصريف المياه العادمة (١٥٠٠ ملجم/لتر) بمرات مضاعفة.
- **بؤر التلوث بالعناصر الثقيلة والسامة:** كشف التحليل الشامل (TXRF) عن تراكيز مقلقة لمعادن سامة ومسرطنة، يتصدرها النيكل (Ni) الذي سجل تراكيز مفرطة تصل إلى ٢٥.٣ ملجم/لتر، بالإضافة إلى الزنك (Zn) والزرنيخ (As) واليورانيوم (U)، مما يشير الى التخلص العشوائي للنفايات الصناعية والإلكترونية والطبية في المكب. كما كشفت الدراسة عن التباين المكاني الجيوكيميائي الدقيق، كحالة النحاس (Cu) الذي ظهر حصريا في المستنقع السطحي لارتباطه القوي بالغرويات العضوية بعد تحرره من البيئة اللاهوائية.
- **مؤشر تلوث العصارة (LPI):** تشير نتائج التقييم الكمي للمخاطر أن قيم LPI لعصارة المكب تتراوح بين ٢٤.٥٧ و٣٢.٧٦، وهي قيم تتجاوز الحد القياسي الآمن للتصريف (٧.٣٧٨) بشكل كبير، مما يصنف المكب ضمن فئة التلوث العالي والخطير. وتصدرت ملوثات COD وTKN وTDS وNi قائمة العناصر المهيمنة على رفع هذا المؤشر.
- **الديناميكية الجيوكيميائية:** تشير نتائج التحليل العنقودي الهرمي (HCA) الى وجود ارتباط جيوكيميائي وثيق بين الحمل العضوي القوي والظروف الحمضية في تحفيز ذوبان المعادن

(مثل الكالسيوم والاسترنشيوم)، وتكوين معقدات عضوية تزيد من حركة العناصر النزرة السامة (مثل الزرنيخ واليورانيوم) وتحافظ على بقائها ذائبة في الطور المائي.

بناء على هذه المعطيات، ومع غياب أي أنظمة هندسية للتبطين أو المعالجة وتجمع العصارة في مستنقع ترابي مكشوف، يمكن تصنيف مكب الأزرقين كبؤرة تلوث خطيرة سيستمر في تسريب الملوثات لأجيال قادمة. تستدعي هذه النتائج تدخلا هندسيا وبيئيا عاجلا لإغلاق المستنقعات المكشوفة، وإنشاء أنظمة معالجة متكاملة، وتطبيق سياسات الفرز المسبق للنفايات للحد من تسرب المواد السامة والعضوية. تقدم هذه الدراسة تقييما اوليا لخصائص عصارة مكب الازرقين خلال موسم الجفاف، لذلك نوصي بشدة أن تركز الأبحاث المستقبلية في مكب الأزرقين على الرصد المكاني والزماني للعصارة والمياه الجوفية المحيطة على مدار مواسم الجفاف والأمطار. هذا سيسمح بفهم أعمق لآليات ترشح الملوثات وتأثير أحداث الهطول المطري العالي على معدلات تركيز وتخفيف العناصر الثقيلة والأساسية.

التمويل

تم تمويل هذا العمل من قبل الهيئة العامة للتأمينات والمعاشات، صنعاء. ولم يكن للجهة الممولة أي دور في تصميم الدراسة، أو في جمع البيانات أو تحليلها أو تفسيرها، أو في كتابة المخطوطة، أو في اتخاذ قرار نشر النتائج.

المراجع:

[1] S. Ma *et al.*, "Leachate from municipal solid waste landfills in a global perspective: Characteristics, influential factors and environmental risks," *J. Clean. Prod.*, vol. 333, p. 130234, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130234.

[2] T. H. Christensen *et al.*, "Biogeochemistry of landfill leachate plumes," *Appl. Geochem.*, vol. 16, no. 7, pp. 659–718, Jun. 2001, doi: 10.1016/S0883-2927(00)00082-2.

[3] P. Kjeldsen, M. A. Barlaz, A. P. Rooker, A. Baun, A. Ledin, and T. H. Christensen, "Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 297–336, Oct. 2002, doi: 10.1080/10643380290813462.

[4] L. Lindamulla, N. Nanayakkara, M. Othman, S. Jinadasa, G. Herath, and V. Jegatheesan, "Municipal Solid Waste Landfill Leachate Characteristics and Their Treatment Options in Tropical Countries," *Curr Pollut. Rep*, vol. 8, no. 3, pp. 273–287, Sep. 2022, doi: 10.1007/s40726-022-00222-x.

[5] P. Wijekoon, P. Koliyabandara, A. Cooray, S. Lam, B. Athapattu, and M. Vithanage, "Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges.," *J. Hazard. Mater.*, vol. 421, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126627.

[6] T. Abunama, T. Moodley, M. Abualqumboz, S. Kumari, and F. Bux, "Variability of leachate quality and polluting potentials in light of leachate pollution index (LPI) – A global perspective," *Chemosphere*, vol. 282, p. 131119, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131119.

[7] D. Kumar and B. J. Alappat, "Evaluating leachate contamination potential of landfill sites using leachate pollution index," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 7, no. 3, pp. 190–197, Nov. 2005, doi: 10.1007/s10098-004-0269-4.

[8] B. Zabara and A. A. Ahmad, "Biomass Waste in Yemen: Management and Challenges," in *Waste Management in MENA Regions*, A. M. Negm and N. Shareef, Eds., in Springer Water. , Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 313–336. doi: 10.1007/978-3-030-18350-9_16.

standards for wastewater reuse in the Eastern Mediterranean Region, 2006. Accessed: Feb. 11, 2026. [Online]. Available: https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/who-116515

[19] M. Templ, P. Filzmoser, and C. Reimann, "Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities," *Appl. Geochem.*, vol. 23, no. 8, pp. 2198–2213, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.apgeochem.2008.03.004.

[20] H.-H. Liu and S.-X. Sang, "Study on the law of heavy metal leaching in municipal solid waste landfill," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 165, no. 1, pp. 349–363, Jun. 2010, doi: 10.1007/s10661-009-0951-4.

[21] L. Lindamulla, N. Nanayakkara, M. Othman, S. Jinadasa, G. Herath, and V. Jegatheesan, "Municipal Solid Waste Landfill Leachate Characteristics and Their Treatment Options in Tropical Countries," *Curr. Pollut. Rep.*, vol. 8, no. 3, pp. 273–287, Sep. 2022, doi: 10.1007/s40726-022-00222-x.

[22] M. Gómez, F. Corona, and M. D. Hidalgo, "Variations in the properties of leachate according to landfill age," *Desalination Water Treat.*, vol. 159, pp. 24–31, Aug. 2019, doi: 10.5004/dwt.2019.24106.

[23] D. O. Odusanya, J. O. Okonkwo, and B. Botha, "Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in leachates from selected landfill sites in South Africa," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 96–102, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.02.011.

[24] A. M. Muhammad and T. Zhonghua, "Municipal solid waste and its relation with groundwater contamination in Lahore, Pakistan," *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 8, pp. 1551–1560, 2014.

[25] M. I. Al-Wabel, W. S. Al Yehya, A. S. AL-Farraj, and S. E. El-Maghraby, "Characteristics of landfill leachates and bio-solids of municipal solid waste (MSW) in Riyadh City, Saudi Arabia," *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 65–70, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.jssas.2011.03.009.

[26] E. A. Sabahi, S. A. Rahim, W. Zuhairi, F. A. Nozaily, and F. Alshaebi, "The Characteristics of Leachate and Groundwater Pollution at Municipal Solid Waste Landfill of Ibb City, Yemen," *Am. J. Environ. Sci.*, vol. 5, pp. 256–266, 2009, doi: 10.3844/ajessp.2009.256.266.

[27] T. P. Clark and R. Piskin, "Chemical quality and indicator parameters for monitoring landfill

[9] O. Forni, A. Short, B. Grundy, M. Bjerregaard, and R. Salemdeeb, "Emergency waste assessment." 2015. Accessed: Feb. 22, 2026. [Online]. Available: https://www.academia.edu/download/84452278/2015_08_UNDP_Yemen_Waste_Assessment_.pdf

[10] A. Alemad *et al.*, "The impact of Sana'a solid waste on the quality of groundwater in Yemen," *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 178, pp. 171–183, 2013.

[11] World Population Review, "Yemen Population 2025," World Population Review. Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: https://worldpopulationreview.com/countries/yemen

[12] M. Aklan, M. Al-Komaim, and C. de Fraiture, "Site suitability analysis of indigenous rainwater harvesting systems in arid and data-poor environments: a case study of Sana'a Basin, Yemen," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 25, no. 8, pp. 8319–8342, Aug. 2023, doi: 10.1007/s10668-022-02402-7.

[13] M. A. Rosato, *Managing biogas plants: A practical guide*. CRC Press, 2017. Accessed: Dec. 13, 2025. [Online]. Available: https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315225838/managing-biogas-plants-mario-alejandro-rosato

[14] R. Moscoviz and J. Jimenez, "Improving anaerobic digestion mass balance calculations through stoichiometry and usual substrate characterization," *Bioresour. Technol.*, vol. 337, p. 125402, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125402.

[15] A. Gil, J. A. Siles, P. Márquez, M. C. Gutiérrez, and M. A. Martín, "Optimizing the selection of organic waste for biomethanization," *Environ. Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 564–575, Feb. 2019, doi: 10.1080/09593330.2017.1397769.

[16] C. M. W. Harnadek, N. G. H. Guilford, and E. A. Edwards, "Chemical Oxygen Demand Analysis of Anaerobic Digester Contents," *STEM Fellowsh. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 2–5, Dec. 2015, doi: 10.17975/sfj-2015-008.

[17] "S2 PICOFOX." Accessed: May 09, 2026. [Online]. Available: https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/elemental-analyzers/txrf-spectrometers/s2-picofox.html

[18] W. H. O. WHO, "A compendium of standards for wastewater reuse in the Eastern Mediterranean Region," in *A compendium of*

quality case study: Hamedan, Iran," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 191, no. 2, p. 109, Jan. 2019, doi: 10.1007/s10661-019-7215-8.

[36] L. Wojnárovits, R. Homlok, K. Kovács, A. Tegze, and E. Takács, "Wastewater Characterization: Chemical Oxygen Demand or Total Organic Carbon Content Measurement?," *Molecules*, vol. 29, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/molecules29020405.

[37] A. Shetty and A. Goyal, "Total organic carbon analysis in water – A review of current methods," *Mater. Today Proc.*, vol. 65, pp. 3881–3886, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.07.173.

[38] D. Dubber and N. F. Gray, "Replacement of chemical oxygen demand (COD) with total organic carbon (TOC) for monitoring wastewater treatment performance to minimize disposal of toxic analytical waste," *J. Environ. Sci. Health Part A*, vol. 45, no. 12, pp. 1595–1600, Sep. 2010, doi: 10.1080/10934529.2010.506116.

[39] C. Teng, K. Zhou, C. Peng, and W. Chen, "Characterization and treatment of landfill leachate: A review," *Water Res.*, vol. 203, p. 117525, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.watres.2021.117525.

[40] G. F. Lee and A. Jones-Lee, "Dry tomb landfills," *MSW Manag.*, vol. 6, no. 1, pp. 82–89, 1996.

[41] R. Moharam and M. A. A. Maqtari, "The impact of plastic bags on the environment: A field survey of the City of Sana'a and the surrounding Areas, Yemen," *Int. J. Eng. Res. Rev.*, vol. 2, no. 4, pp. 61–69, 2014.

[42] A. Demdoum, M. K. Gueddouda, I. Goual, H. Souli, and M. S. Ghembaza, "Effect of landfill leachate on the hydromechanical behavior of bentonite-geomaterials mixture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 234, p. 117356, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117356.

[43] A. Maleki, M. A. Zazouli, H. Izanloo, and R. Rezaee, "Composting plant leachate treatment by coagulation-flocculation process," *Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.*, vol. 5, no. 5, pp. 638–643, 2009.

[44] R. Mahmoudkhani, A. H. Hassani, A. Torabian, and S. M. Borghei, "Study on high-strength anaerobic landfill leachate treatability by membrane bioreactor coupled with reverse osmosis," 2012, Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available:

leachate in Illinois," *Geo*, vol. 1, no. 6, pp. 329–340, Nov. 1977, doi: 10.1007/BF02380501.

[28] S. Xie, Y. Ma, P. J. Strong, and W. P. Clarke, "Fluctuation of dissolved heavy metal concentrations in the leachate from anaerobic digestion of municipal solid waste in commercial scale landfill bioreactors: The effect of pH and associated mechanisms," *J. Hazard. Mater.*, vol. 299, pp. 577–583, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.07.065.

[29] B. M. Awaz, "Leachate and Ground Water Assessment at Kirkuk Sanitary Landfill Site in Zindana Village, Iraq.," *Int. J. Environ. Res.*, vol. 9, no. 2, 2015, Accessed: Feb. 13, 2026. [Online]. Available: https://ijer.ut.ac.ir/article_918_d8c88f7e9f98be062655fbce77b117d9.pdf

[30] A. F. Al-Yaqout, "Quantitative Environmental Risk Assessment of Leachate from a closed landfill-A case study," *J. Eng. Res.*, vol. 5, no. 1, 2017, Accessed: Feb. 13, 2026. [Online]. Available: https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/1555

[31] M. F. A. El-Salam and G. I. Abu-Zuid, "Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt," *J. Adv. Res.*, vol. 6, pp. 579–586, 2015, doi: 10.1016/j.jare.2014.02.003.

[32] A. H. Hilles, S. S. Abu Amr, R. A. Hussein, O. D. El-Sebaie, and A. I. Arafa, "Performance of combined sodium persulfate/H2O2 based advanced oxidation process in stabilized landfill leachate treatment," *J. Environ. Manage.*, vol. 166, pp. 493–498, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.10.051.

[33] A. M. Woldeyohans, T. Worku, H. Kloos, and W. Mulat, "Treatment of leachate by recirculating through dumped solid waste in a sanitary landfill in Addis Ababa, Ethiopia," *Ecol. Eng.*, vol. 73, pp. 254–259, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.052.

[34] S. M. Khodary, A. Z. Elwakil, M. Fujii, and A. Tawfik, "Effect of hazardous industrial solid waste landfill leachate on the geotechnical properties of clay," *Arab. J. Geosci.*, vol. 13, no. 15, p. 706, Jul. 2020, doi: 10.1007/s12517-020-05699-8.

[35] M. Vahabian, Y. Hassanzadeh, and S. Marofi, "Assessment of landfill leachate in semi-arid climate and its impact on the groundwater

[54] A. Hussain *et al.*, "Landfill leachate analysis from selected landfill sites and its impact on groundwater quality, New Delhi, India," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 27, no. 6, pp. 12537–12562, Jun. 2025, doi: 10.1007/s10668-023-04403-6.

[55] E. B. Oumaima, A. F. Cano, J. A. A. Aviles, and T. Fechtali, "Characterization of Leachate from Different Landfills Sites of Morocco and Spain: A Comparative Study," *Eur. Sci. J. ESJ*, vol. 15, no. 18, Jun. 2019, doi: 10.19044/esj.2019.v15n18p183.

[56] Y. Li, J. Ma, Y. Ren, Y. Li, and D. Yue, "Calcium leaching characteristics in landfill leachate collection systems from bottom ash of municipal solid waste incineration," *J. Environ. Manage.*, vol. 280, p. 111729, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111729.

[57] S. Mor, K. Ravindra, R. P. Dahiya, and A. Chandra, "Leachate Characterization and Assessment of Groundwater Pollution Near Municipal Solid Waste Landfill Site," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 118, no. 1–3, pp. 435–456, Jul. 2006, doi: 10.1007/s10661-006-1505-7.

[58] N. J. Raju, "Iron contamination in groundwater: A case from Tirumala-Tirupati environs, India," *The Researcher*, vol. 1, no. 1, pp. 28–31, 2006.

[59] M. A. Hossain, M. I. Haque, M. A. Parvin, and M. N. Islam, "Evaluation of iron contamination in groundwater with its associated health risk and potentially suitable depth analysis in Kushtia Sadar Upazila of Bangladesh," *Groundw. Sustain. Dev.*, vol. 21, p. 100946, May 2023, doi: 10.1016/j.gsd.2023.100946.

[60] Q. Sun *et al.*, "A review on the chemical speciation and influencing factors of heavy metals in Municipal Solid Waste landfill humus," *Waste Dispos. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 209–218, Jun. 2024, doi: 10.1007/s42768-023-00186-8.

[61] S. Yadav, S. Bajar, Hemraj, R. Rohilla, S. K. Chhikara, and R. Dhankhar, "Assessment of groundwater quality near municipal solid waste landfill by using multivariate statistical technique and GIS: a case study of Bandhwari (Gurugram) landfill site, Haryana, India," *Sustain. Water Resour. Manag.*, vol. 9, no. 6, p. 174, Nov. 2023, doi: 10.1007/s40899-023-00964-6.

[62] W. H. O. WHO, Ed., *Guidelines for drinking-water quality*, 4th ed. Geneva: World Health Organization, 2011.

[63] W. H. O. WHO, "Depleted uranium: sources, exposure and health effects," World Health https://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/108220120113.pdf

[45] M. Abu-Daabes, H. A. Qdais, and H. Alsyouri, "Assessment of heavy metals and organics in municipal solid waste leachates from landfills with different ages in Jordan," *J. Environ. Prot.*, vol. 4, no. 4, pp. 344–352, 2013.

[46] European Union, "Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment." May 21, 1991. Accessed: Feb. 21, 2026. [Online]. Available: http://data.europa.eu/eli/dir/1991/271/oj

[47] A. Wdowczyk and A. Szymańska-Pulikowska, "Differences in the Composition of Leachate from Active and Non-Operational Municipal Waste Landfills in Poland," *Water*, vol. 12, no. 11, p. 3129, Nov. 2020, doi: 10.3390/w12113129.

[48] J. P. Y. Jokela and J. A. Rintala, "Anaerobic solubilisation of nitrogen from municipal solid waste (MSW)," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 2, no. 1, pp. 67–77, Mar. 2003, doi: 10.1023/B:RESB.0000022830.62176.36.

[49] L. M. Rouidi, R. Maurício, A. Boukhrissa, H. Ait- Amar, and O. Balamane, "Characterization and treatment of landfill leachates by electro-Fenton process: A case study in Algeria," *Water Environ. Res.*, vol. 92, no. 1, pp. 123–137, Jan. 2020, doi: 10.1002/wer.1223.

[50] F. A. El-Gohary and G. Kamel, "Characterization and biological treatment of pre-treated landfill leachate," *Ecol. Eng.*, vol. 94, pp. 268–274, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.05.074.

[51] F. Boumechhour, K. Rabah, C. Lamine, and B. M. Said, "Treatment of landfill leachate using Fenton process and coagulation/flocculation," *Water Environ. J.*, vol. 27, no. 1, pp. 114–119, 2013, doi: 10.1111/j.1747-6593.2012.00332.x.

[52] M. A. Zazouli, Z. Yousefi, A. Eslami, and M. B. Ardebilian, "Municipal solid waste landfill leachate treatment by fenton, photo-fenton and fenton-like processes: Effect of some variables," *Iran. J. Environ. Health Sci. Eng.*, vol. 9, no. 1, p. 3, Dec. 2012, doi: 10.1186/1735-2746-9-3.

[53] S. De, S. K. Maiti, T. Hazra, A. Debsarkar, and A. Dutta, "Leachate characterization and identification of dominant pollutants using leachate pollution index for an uncontrolled landfill site," *Glob. J. Environ. Sci. Manag.*, vol. 2, no. 2, p. 177, 2016.

[71] A. Dixit, D. Singh, and S. K. Shukla, "Assessment of human health risk due to leachate contaminated soil at solid waste dumpsite,Kanpur(India)," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 909–924, Jan. 2024, doi: 10.1007/s13762-023-04868-y.

[72] A. Touzani, Y. El Hammoudani, F. Dimane, M. Tahiri, and K. Haboubi, "Characterization of Leachate and Assessment of the Leachate Pollution Index – A Study of the Controlled Landfill in Fez," *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, vol. 25, no. 4, pp. 57–69, Apr. 2024, doi: 10.12912/27197050/183132.

[73] Y. Gan, K. Zhao, Y. Deng, X. Liang, T. Ma, and Y. Wang, "Groundwater flow and hydrogeochemical evolution in the Jianghan Plain, central China," *Hydrogeol. J.*, vol. 26, no. 5, pp. 1609–1623, Aug. 2018, doi: 10.1007/s10040-018-1778-2.

[74] T. P. Gandhi, P. V. Sampath, and S. M. Maliyekkal, "A critical review of uranium contamination in groundwater: Treatment and sludge disposal," *Sci. Total Environ.*, vol. 825, p. 153947, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153947.

Organization, 2001. Accessed: Mar. 05, 2026. [Online]. Available: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/66930/W?sequence=1

[64] P. Fermo *et al.*, "The analytical characterization of municipal solid waste incinerator fly ash: methods and preliminary results," *Fresenius J. Anal. Chem.*, vol. 365, no. 8, pp. 666–673, Dec. 1999, doi: 10.1007/s002160051543.

[65] A. Detho, A. A. Kadir, and Z. I. B. Zawani, "Heavy Metal Characteristics of Soil and Leachate Resistivity Mapping of Malacca Landfill," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 235, no. 2, p. 115, Feb. 2024, doi: 10.1007/s11270-024-06940-w.

[66] R. Sawaya, J. Halwani, I. Bashour, and N. Nehme, "Assessment of the leachate quality from municipal solid waste landfill in Lebanon," *Arab. J. Geosci.*, vol. 14, no. 21, p. 2160, Oct. 2021, doi: 10.1007/s12517-021-08502-4.

[67] S. Ismail *et al.*, "Techno-economic feasibility of energy-saving self-aerated sponge tower combined with up-flow anaerobic sludge blanket reactor for treatment of hazardous landfill leachate," *J. Water Process Eng.*, vol. 37, p. 101415, 2020.

[68] S. M. Khodary, H. Fath, A. Negm, and A. Tawfik, "Measuring the engineering properties of landfill leachate-contaminated soil in Egypt," *Euro-Mediterr. J. Environ. Integr.*, vol. 6, no. 1, p. 23, Apr. 2021, doi: 10.1007/s41207-020-00232-5.

[69] G. Singh and P. K. S. Yadav, "Hazardous waste characteristics and standard management approaches," in *Hazardous Waste Management*, Elsevier, 2022, pp. 145–164. doi: 10.1016/B978-0-12-824344-2.00008-2.

[70] D. Kumar and B. J. Alappat, "Analysis of leachate contamination potential of a municipal landfill using leachate pollution index," in *Workshop on sustainable landfill management*, 2003, p. 153. Accessed: Apr. 25, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Dinesh-Kathpalia/publication/266353417_Analysis_of_Leachate_Contamination_Potential_of_a_Municipal_Landfill_using_Leachate_Pollution_Index/links/5631a6fa08ae506cea679848/Analysis-of-Leachate-Contamination-Potential-of-a-Municipal-Landfill-using-Leachate-Pollution-Index.pdf