Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (5) (Nov, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد 5 نوفمبر 2026
عدد خاص بالمؤتمر العلمي الرابع للعلوم والتقنية
28-29 نوفمبر 2026 مصراتة – ليبيا
إدارة المعاهد العليا – وزارة التعليم التقني

تقييم مستويات بعض العناصر الثقيلة والألومنيوم في محطات تحلية مياه الشرب بمدينة جنزور

فائزة التواتي عبد الناصر التواتي1* ، هاجر محمود المؤقت2 ، أحمد الهـادي المبروك3
1 قسم العلوم البيئية، المعهد العالي للتقنية الزراعية بالغيران، طرابلس، ليبيا.
2 المركز الليبي لبحوث التقنيات الحيوية، طرابلس، ليبيا.
3 قسم الصناعات الغذائية، المعهد العالي للتقنية الزراعية بالغيران، طرابلس، ليبيا.

Assessment of Selected Heavy Metals and Aluminum Levels in Drinking Water Desalination Plants in Janzour, Libya

Faiza A. El-Tawati1*, Hajar M. El-Mowaket2, Ahmed E. Saeed3

1Department of Environmental Sciences, Higher Institute of Agricultural Technology – El-Gheran, Tripoli, Libya.

2Libyan Biotechnology Research Center, Tripoli, Libya.

3Department of Food Industries, Higher Institute of Agricultural Technology – El-Gheran, Tripoli, Libya.

تاريخ الاستلام: 2026/7/30 تاريخ المراجعة 2026/8/20 تاريخ القبول:2026/8/28- تاريخ النشر: 2026/11/28

ملخص البحث:

هدفت هذه الدراسة الاستطلاعية إلى تقييم مستويات التلوث ببعض العناصر الثقيلة والمعادن (الألومنيوم Al، الكادميوم Cd، الرصاص Pb، والزنك Zn) في مياه الشرب المنتجة من أربع محطات تحلية أهلية تعمل بتقنية التناضح العكسي (RO) بمدينة جنزور – ليبيا، خلال شهر نوفمبر 2026م. كما استهدفت التحقق من مدى مطابقتها للمواصفات القياسية الليبية لمياه الشرب (م.ق.ل رقم 82 لسنة 2008) وتوصيات منظمة الصحة العالمية (WHO, 2017). تم سحب العينات مباشرة من مخارج شبكات التوزيع وحفظها معملياً، وحُللت التراكيز بمركز بحوث النفط بطرابلس باستخدام جهاز مطيافية الامتصاص الذري (Atomic Absorption Spectrophotometer – AAS). أظهرت النتائج أن تراكيز كل من الألومنيوم، والكادميوم، والرصاص كانت دون حدود الكشف المخبري للجهاز (< 0.001، < 0.002، و < 0.003 ملغم/لتر على التوالي)، وهي قيم أدنى بكثير من الحدود القصوى المسموح بها محلياً ودولياً. في حين سجل عنصر الزنك حضوراً كمياً متفاوتاً بمتوسط حسابي قدره 0.02950 ملغم/لتر، وتراوحت تراكيزه بين حد أدنى 0.005 ملغم/لتر في المحطة (S2) وحد أقصى 0.080 ملغم/لتر في المحطة (S1) بانحراف معياري قدره 0.03412 ملغم/لتر، وجميعها دون الحد الأقصى المسموح به (3.000 ملغم/لتر). تشير هذه النتائج الأولية إلى أن مياه المحطات المدروسة تقع ضمن النطاق الآمن بيئياً وصحياً فيما يخص هذه العناصر، وتوصي الدراسة باستمرار برامج المراقبة الدورية الموسعة.

الكلمات المفتاحية: محطات التحلية، العناصر الثقيلة، مياه الشرب، جنزور، التناضح العكسي، جودة المياه، الرصاص.

Abstract:

This preliminary study aimed to evaluate the concentrations of selected heavy metals and elements (Aluminum [Al], Cadmium [Cd], Lead [Pb], and Zinc [Zn]) in drinking water produced by four commercial reverse osmosis (RO) desalination plants operating in Janzour, northwestern Libya, during November 2026. The measured levels were benchmarked against the Libyan Drinking Water Standards (No. 82/2008) and the World Health Organization guidelines (WHO, 2017). Samples were collected from distribution outlets and analyzed at the Petroleum Research Center using an Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). The analytical results demonstrated that Aluminum, Cadmium, and Lead concentrations were strictly below the instrument method detection limits (< 0.001, < 0.002 , and < 0.003 mg/L, respectively), all comfortably below permissible thresholds. Zinc exhibited detectable concentrations across stations with an overall mean of 0.02950 mg/L (ranging from 0.005 mg/L in S2 to 0.080 mg/L in S1; SD = 0.03412 mg/L), which is well below the national and international limit of 3.000 mg/L. These baseline findings indicate

that the treated water supplies are safe from toxicological hazards regarding the examined elements. Periodic seasonal surveillance and expanded metal monitoring are highly recommended.

Keywords: Desalination plants, Heavy metals, Drinking water, Janzour, Reverse osmosis, Water quality,

1. المقدمة (Introduction):

تُعد المياه المورد الحيوي الأهم لاستمرار الحياة والتنمية البشرية وصحة الإنسان. وفي ظل تزايد الطلب على مياه الشرب بالمناطق الساحلية الليبية واستنزاف وتملح الخزانات الجوفية الطبيعية العذبة، برزت محطات تحلية المياه المعتمدة على تقنية التناضح العكسي (Osmosis – RO Reverse) كخيار استراتيجي وعملي لا غنى عنه لتأمين احتياجات السكان اليومية بمدينة جنزور والمناطق المجاورة (المسلاتي، 2026). وعلى الرغم من أن تقارير قطاع المياه التاريخية كانت تشير إلى مساهمة ضئيلة للتحلية بنسبة تقارب 0.66% على المستوى الوطني (الهيئة العامة للمياه، 2006)، إلا أن العقدين الأخيرين شهدا طفرة واسعة في انتشار محطات التحلية الصغرى والتجارية التابعة للقطاعين العام والخاص، لتصبح المصدر الأساسي لتوزيع مياه الشرب وتعبئة الخزانات المنزلية بالمنطقة.

تتأثر جودة المياه المنتجة من هذه المحطات بعدة عوامل جوهرية تشمل كفاءة أغشية التناضح العكسي، ونوعية المياه الخام المغذية، ومدى استقرار شبكات التوزيع ومواد خزانات الحفظ. وتأتي العناصر الثقيلة والمعادن السامة في مقدمة الملوثات ذات الخطورة البيئية والصحية الفائقة؛ نظراً لسميتها المرتفعة حتى عند التركيزات المتناهية في الصغر، وقابليتها للتراكم الحيوي داخل أنسجة جسم الإنسان لعدم قدرتها على التحلل الذاتي (WHO, 2017). ويؤدي التراكم المزمن لعناصر كالرصاص والكادميوم إلى اضطرابات خطيرة في الجهاز العصبي، والقصور الكلوي، وأمراض القلب والأوعية الدموية (EPA, 2018). كما أن الألومنيوم قد يتسرب للمياه من شبكات التوزيع أو من سوء ضبط مركبات الترويق في مراحل المعالجة الأولية، مما يسبب مضاعفات صحية طويلة الأمد (عبد القادر وآخرون، 2024).

وعلى الرغم من الدور الحيوي لمحطات التحلية في جنزور، إلا أن هناك ندرة واضحة في الدراسات العلمية المنشورة التي توثق الفحوصات المعملية الدقيقة للتأكد من خلو المياه الموزعة من العناصر الثقيلة ومطابقتها للمواصفات القياسية. ومن هذا المنطلق جاءت هذه الدراسة الاستطلاعية لتقييم جودة مياه الشرب المنتجة من أربع محطات تحلية بجنزور عبر قياس تركيز أربعة معادن هامة (الألومنيوم، الكادميوم، الرصاص، والزنك)، والتحقق من سلامتها صحياً وبيئياً.

2. أهداف الدراسة (Objectives):

تتمثل أهداف هذه الدراسة الاستطلاعية في تحقيق الآتي:

1. تحديد مستويات تراكيز أربعة معادن وعناصر ثقيلة (Al, Cd, Pb, Zn) في مياه الشرب المنتجة من أربع محطات تحلية بمدينة جنزور.

2. مقارنة القيم المقاسة بالحدود المسموح بها في المواصفات القياسية الليبية لمياه الشرب (م.ق.ل 82 لسنة 2008) ودليل منظمة الصحة العالمية (WHO, 2017).

3. تقييم مدى سلامة المياه للاستهلاك الآدمي وتوفير قاعدة بيانات استرشادية تدعم الأجهزة الرقابية والبيئية في متابعة جودة المياه بالمنطقة.

3. المواد وطرق العمل (Materials & Methods):

3.1 منطقة الدراسة وتوصيف المحطات:

أجريت الدراسة في نطاق مدينة جنزور (غرب العاصمة طرابلس). تم استهداف أربع محطات تحلية تجارية شائعة الاستخدام في تغذية السكان بمياه الشرب المعبأة والسائبة، ورُمز لها بالرموز (S1, S2, S3, S4). تعتمد جميع المحطات قيد الدراسة على منظومات التناضح العكسي (Osmosis – RO Reverse) ذات الأغشية الحلزونية لمعالجة المياه الجوفية شبه المالحة المسحوبة من آبار التغذية الخاصة بكل محطة.

3.2 جمع العينات وحفظها:

تم جمع العينات خلال شهر نوفمبر 2026م من مخرج شبكة التوزيع النهائي لكل محطة (نقطة التعبئة المباشرة للمستهلك). جُمعت المياه في عبوات بولي إيثيلين سعة 2 لتر، كانت قد غُسلت ونُقعت مسبقاً في محلول حمض النيتريك المخفف (10% HNO3) لمدة 24 ساعة ثم شُطفت جيداً بالماء المقطر ومنزوع الأيونات لتفادي أي تلوث خارجي. حُفظت العينات بإضافة بضع قطرات من حمض النيتريك فائق النقاوة لخفض الرقم الهيدروجيني إلى (pH < 2) لضمان بقاء الأيونات المعدنية ذائبة، ونُقلت مبردة عند درجة حرارة 4°م مباشرة إلى المختبر وفق الاشتراطات القياسية الدولية (APHA et al., 2017).

3.3 التحليل المعملي والأجهزة المستخدمة:

أجريت الفحوصات والتحاليل المعملية بمختبرات مركز بحوث النفط (منطقة السياحية، طرابلس). قُدرت تراكيز العناصر باستخدام جهاز مطيافية الامتصاص الذري اللهبي (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer – FAAS). تمت معايرة وضبط الجهاز باستخدام محاليل قياسية معتمدة متدرجة التركيز لكل عنصر بشكل يومي لتحقيق منحنى خطي بمعامل ارتباط ($R^2 > 0.999$). وقد بلغت حدود الكشف المنهجية للطريقة المخبرية (Method Detection Limit – MDL) ما يلي: الألومنيوم Al = 0.001 ملغم/لتر، الكادميوم Cd = 0.002 ملغم/لتر، الرصاص Pb = 0.003 ملغم/لتر، والزنك Zn = 0.001 ملغم/لتر.

3.4 التحليل الإحصائي:

تمت معالجة البيانات وتحليلها إحصائياً باستخدام برنامج الحزم الإحصائية للعلوم الاجتماعية (IBM SPSS Statistics, Version 26). تم حساب المقاييس الوصفية لعنصر الزنك شملت: المتوسط الحسابي، الانحراف المعياري، الخطأ المعياري، الوسيط، المدى، وأدنى وأعلى قيمة، والمدى الربيعي. أما العناصر التي كانت دون حدود الكشف المخبري، فعوملت إحصائياً بصفتها قيماً دون حد التقدير (Below Detection Limit – BDL).

4. النتائج والمناقشة (**Results & Discussion**):

يوضح الجدول (1) التراكيز المقاسة للعناصر الأربعة في عينات المحطات المدروسة مقارنة بالمواصفات القياسية الليبية وتوصيات منظمة الصحة العالمية:

المحطة / العينة	الألومنيوم (**Al**) ملغم/لتر	الكادميوم (**Cd**) ملغم/لتر	الرصاص (**Pb**) ملغم/لتر	الزنك (**Zn**) ملغم/لتر
المحطة الأولى (S1)	< 0.001	< 0.002	< 0.003	0.080
المحطة الثانية (S2)	< 0.001	< 0.002	< 0.003	0.005
المحطة الثالثة (S3)	< 0.001	< 0.002	< 0.003	0.018
المحطة الرابعة (S4)	< 0.001	< 0.002	< 0.003	0.015
المواصفة الليبية (م.ق.ل 2008/82)	0.200	0.003	0.010	3.000
منظمة الصحة العالمية (**WHO, 2017**)	0.200	0.003	0.010	3.000

جدول (1): مستويات تركيز العناصر المقاسة في محطات التحلية بجنزور مقارنة بالمواصفات القياسية (ملغم/لتر)

1. الألومنيوم (Al): أظهرت النتائج أن تركيز الألومنيوم كان دون حدود الكشف المخبري (< 0.001 ملغم/لتر) في جميع المحطات المدروسة. وتُعد هذه القيمة منخفضة جداً وأقل بكثير من الحد الأقصى المسموح به محلياً ودولياً والمحدد بـ (0.200 ملغم/لتر). وتتفق هذه النتائج مع دراسة المسلاتي (2026) وعبد القادر وآخرين (2024)، مما يدل على كفاءة أغشية التناضح العكسي في حجز دقائق وأيونات الألومنيوم وعدم استخدام مركبات كبريتات الألومنيوم كمروقات بشكل مفرط في المعالجة الأولية.

2. الكادميوم (Cd): بينت التحاليل أن مستويات الكادميوم كانت أقل من حد الكشف المخبري (< 0.002 ملغم/لتر) في العينات كافة، وهي تقع بوضوح دون الحد المسموح به في المواصفة القياسية الليبية ومنظمة الصحة العالمية (0.003 ملغم/لتر). تتطابق هذه النتيجة مع ما توصل إليه صالح (2023)، مما يعطي مؤشراً إيجابياً على خلو مياه التغذية الجوفية وشبكات التحلية من أي تسرب لمخلفات البطاريات أو الأسمدة الفوسفاتية التي قد ترفع مستويات الكادميوم.

3. الرصاص (Pb): سُجلت تراكيز الرصاص عند مستويات أقل من حد الكشف للجهاز (< 0.003 ملغم/لتر) في المحطات الأربع، وهو ما يقل بوضوح عن الحد الأقصى المسموح به لمياه الشرب (0.010 ملغم/لتر). ويؤكد ذلك سلامة أنابيب ومواد خزانات محطات التحلية قيد الدراسة وخلوها من سبائك الرصاص أو التآكل المعدني، وتتوافق هذه النتائج مع المسوحات البيئية المماثلة في مدن الساحل الليبي (محمد وآخرون، 2024).

4. الزنك (Zn): يُلاحظ في الجدول (1) أن عنصر الزنك هو الوحيد الذي حقق قراءات كمية مقاسة فوق حد الكشف، وتفاوتت تراكيزه بين 0.005 ملغم/لتر في المحطة (S2) و 0.080 ملغم/لتر في المحطة (S1). وعلى الرغم من هذا التباين، فإن أعلى قيمة مقاسة (0.080 ملغم/لتر) تظل أقل بكثير جداً من الحد الأقصى المسموح به محلياً ودولياً (3.000 ملغم/لتر)، إذ لا تتجاوز 2.7% من السقف المسموح، مما يجعل المياه آمنة تماماً، لاسيما وأن الزنك يُعد عنصراً غذائياً دقيقاً ومفيداً لصحة الجسم ضمن هذه المستويات الضئيلة (WHO, 2017).

التحليل الإحصائي الوصفي لمتغير الزنك:

يوضح الجدول (2) المؤشرات الإحصائية الوصفية لتوزيع تراكيز عنصر الزنك في عينات الدراسة الأربع:

الدلالة العلمية والإحصائية	القيمة المقدرة	المؤشر الإحصائي
إجمالي محطات الدراسة التي جرى فحصها	4	حجم العينة (N)
معدل التركيز العام للزنك في المحطات	0.02950 ملغم/لتر	المتوسط الحسابي (Mean)
مقياس دقة تقدير متوسط المجتمع	0.01706	الخطأ المعياري للمتوسط (Std. Error)
القيمة المنصفة للبيانات (أقل تأثراً بالقيم المتطرفة)	0.01650 ملغم/لتر	الوسيط (Median)
يعكس وجود تشتت نسبي وتفاوت بين المحطات	0.03412 ملغم/لتر	الانحراف المعياري (Std. Deviation)
مربع الانحراف المعياري لقياس التشتت الكلي	0.00116	التباين (Variance)
الفرق المطلق بين أعلى وأقل تركيز مقاس	0.07500 ملغم/لتر	المدى (Range)
أدنى تركيز سُجل في المحطة S2	0.00500 ملغم/لتر	أدنى قيمة (Minimum)
أعلى تركيز سُجل في المحطة S1	0.08000 ملغم/لتر	أعلى قيمة (Maximum)
مدى انتشار البيانات بين الربيعين الأدنى والأعلى	0.02100 ملغم/لتر	المدى الربيعي (IQR)

جدول (2): مقاييس الإحصاء الوصفي لتركيز عنصر الزنك في عينات مياه التحلية (***IBM SPSS v26***)

يُظهر التحليل الإحصائي أن المتوسط الحسابي لعنصر الزنك (0.02950 ملغم/لتر) أكبر من قيمة الوسيط (0.01650 ملغم/لتر)، مما يشير إلى وجود التواء موجب طفيف في توزيع البيانات ناجم عن التركيز الأعلى نسبياً المسجل في المحطة S1 (0.080 ملغم/لتر). ويعكس الانحراف المعياري (0.03412 ملغم/لتر) تبايناً ملحوظاً بين المحطات قد يعود إلى اختلاف نوعية المياه الجوفية المغذية أو اختلاف عمر ونوعية شبكات ومواسير التوزيع في تلك المحطة. أما بقية العناصر (Al, Cd, Pb)، فنظراً لوقوع جميع قراءاتها دون حد الكشف المخبري، فإن تباينها الحسابي يقترب من الصفر الإحصائي ($\sigma^2 \approx 0$)، مما يؤكد استقرار واقتصار تراكيزها على المستويات الآمنة جداً.

5. الاستنتاجات (**Conclusions**):

بناءً على نتائج هذه الدراسة الاستطلاعية، توصل الباحثون إلى الاستنتاجات التالية:

1. أثبتت نتائج التحليل المعملي أن مياه الشرب المنتجة من محطات التحلية الأربع بمدينة جنزور خالية من التركيزات الخطرة للعناصر الثقيلة المقاسة (الألومنيوم، الكادميوم، والرصاص)، إذ كانت تراكيزها دون حدود الكشف المخبري.

2. أظهر عنصر الزنك حضوراً متفاوتاً بين المحطات بمتوسط 0.02950 ملغم/لتر، مع بقاء أعلى قيمة مقاسة (0.080 ملغم/لتر) أدنى بكثير جداً من السقف المسموح به محلياً ودولياً (3.000 ملغم/لتر).

3. تؤكد البيانات سلامة ومطابقة العينات المفحوصة للمواصفات القياسية الليبية (رقم 82/2008) وتوصيات منظمة الصحة العالمية (WHO, 2017)، مما يشير إلى كفاءة تقنية التناضح العكسي المستخدمة في المحطات قيد الدراسة.

6. التوصيات (**Recommendations**):

يوصي الباحثون بما يلي:

1. الاستمرار في برامج المراقبة الدورية والفصلية لجودة مياه محطات التحلية في جنزور لضمان استدامة كفاءة المعالجة وعدم تدهور الخصائص الكيميائية لمياه الشرب مستقبلاً.

2. تشديد الرقابة الصحية على المواد المستخدمة في خزانات التخزين وشبكات الأنابيب ومضخات التوزيع للتأكد من مطابقتها للمواصفات الغذائية لمنع تسرب المعادن بالتآكل.

3. توعية أصحاب المحطات بأهمية الصيانة الوقائية واستبدال أغشية التناضح العكسي في المواعيد المحددة فنياً.

4. توسيع الدراسات المستقبلية لتشمل عدداً أكبر من المحطات في مختلف فصول السنة، وإدراج عناصر ثقيلة إضافية مثل الزرنيخ (As)، والكروم (Cr)، والنيكل (Ni)، والزئبق (Hg)، فضلاً عن المؤشرات البيولوجية والفيزيائية.

7. المراجع (**References**):

أولاً: المراجع باللغة العربية:

أبوراوي، محمد علي. (2018). دراسة بعض العناصر الثقيلة في مياه الآبار الجوفية بمنطقة ازدو – زليتن ومدى تأثير بحيرة الصرف الصحي عليها. مجلة كلية التربية، الجامعة الأسمرية الإسلامية، زليتن، ليبيا، 12(2)، 45–58.

التواتي، فائزة عبد الناصر. (2006). تقدير عنصر الكروم وبعض العناصر الثقيلة ذات الأهمية البيئية في المياه الجوفية القريبة من مصنع الدباغة وصناعة الجلود بتاجوراء [رسالة ماجستير غير منشورة]. قسم العلوم البيئية، أكاديمية الدراسات العليا، طرابلس، ليبيا.

صالح، حنان. (2023). تلوث المياه الجوفية بالعناصر الثقيلة بالمجمع الصناعي بمنطقة تاجوراء. مجلة البحوث العلمية، جامعة أفريقيا للعلوم الإنسانية والتطبيقية، طرابلس، (15)، 112–124.

عبد القادر، ختام، ومحمد، سالمة، وعلي، عائشة. (2024). تقييم تلوث المعادن الثقيلة في بعض محطات التحلية بمنطقة تراغن. مجلة جامعة فزان العلمية، 3(1)، 88–97.

الغرياني، ماجدة. (2005). محددات ومعايير جودة مياه الشرب في ليبيا [ورقة عمل]. ورشة العمل الخاصة بجودة مياه الشرب، المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية، طرابلس، ليبيا.

محمد، عبد السلام، وخليفة، نوري، وسالم، عمر. (2024). تقييم جودة مياه الشرب ومصادر التغذية بمدينة ترهونة. مجلة شمال إفريقيا للنشر العلمي، 6(2)، 112–125.

المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية. (2009). المواصفة القياسية الليبية رقم (82) لعام 2008 الخاصة بمياه الشرب المعبأة وغير المعبأة (ط. 2). طرابلس، ليبيا.

المسلاتي، هاجر. (2026). تقييم جودة مياه الآبار ومياه التحلية ومدى ملاءمتها للشرب وتقدير مخاطرها الصحية. مجلة جامعة الجفارة للعلوم والتقنيات الحيوية، كلية العلوم الصحية، 4(2)، 70–84.

الهيئة العامة للمياه. (2006). تقرير الخزانات الجوفية ومصادر المياه بالمنطقة الوسطى (الخمس وزليتن). فرع المنطقة الوسطى، طرابلس، ليبيا.

ثانياً: المراجع باللغة الإنجليزية

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). APHA.

Food and Agriculture Organization. (2018). More people, more food, worse water? A global review of water pollution from agriculture. FAO and CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems.

US Environmental Protection Agency. (2018). 2018 Edition of the drinking water standards and health advisories tables (EPA 822-F-18-001). Office of Water, U.S. EPA.

World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum. World Health Organization.