https://jsras.rcc.edu.ly/
Vol.3 No.2 (2026), 166-172
Article history:
Received:
Accepted:
Published: 18 Nov .2026

Journal of Sustainable Research in Applied Sciences

JSRAS

Impact of Cesspits on Groundwater Quality in Selected Residential Neighborhoods of Benghazi City

Prof. Dr. Faraj Boubaker Al-Mabrouk[1], faraj.elmabrouk@uob.edu.ly
Prof. Dr. Manal Salem Ali Abomdas Al-Fitouri[2]*, Manual.salem@aonsrt.ly
[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Benghazi, Libya.
[2] Libyan Authority for Scientific Research, Benghazi, Libya-Al Arab University for Medical & Technological Sciences

keywords

Contamination; Cesspits; Groundwater; Urban Sanitation; Benghazi City .

Abstract

This study aims to investigate the causes of groundwater well contamination in selected residential areas of Benghazi City. The study focuses on groundwater well contamination affecting residents who rely on these wells for daily use due to the absence of water supply networks in most neighborhoods of the city. Eighteen groundwater well samples were collected from four residential areas in Benghazi, Libya (Al-Hawari, Bu-Hadima, Shibna, and Hay Al-Salam) during 2025. We conducted comprehensive physical, chemical, and microbiological analyses to assess key water quality parameters, including electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), nitrate concentrations, total coliform bacteria, Escherichia coli, and total microbial counts. The results were compared with Libyan national standards and World Health Organization (WHO) guidelines.

The results demonstrated high levels of contamination in groundwater wells within the residential areas investigated, primarily attributed to the widespread and unregulated installation of cesspits that were constructed using inadequate and non-engineered methods. The findings revealed severe deterioration in groundwater quality, with exceedance rates of 94.4% for total dissolved solids (TDS), 88.9% for electrical conductivity (EC), 88.9% for total microbial counts, 83.3% for total coliform bacteria, 66.7% for Escherichia coli (E. coli), and 50.0% for nitrates. Although pH levels remained within acceptable limits, the widespread occurrence of fecal and chemical contamination indicators represents a serious public health risk.

Furthermore, statistical correlation analyses between contaminant concentrations and the distance from cesspits generally showed statistically non-significant trends, suggesting that groundwater hydrology, aquifer vulnerability, and unregulated sanitation practices collectively contribute to the observed contamination patterns. This study highlights the urgent need for integrated urban water management, stricter regulations governing sanitation systems, and targeted expansion of wastewater and sewerage infrastructure.

تأثير الآبار السوداء على جودة المياه الجوفية في بعض الأحياء السكنية في مدينة بنغازي

أ.د. فرج بوبكر المبروك[1]، ، أ. د. منال سالم علي أبومداس الفيتوري[2]،*
[1]قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة بنغازي، ليبيا، faraj.elmabrouk@uob.edu.ly
[2]الهيئة الليبية للبحث العلمي، بنغازي، ليبيا، Manual.salem@aonsrt.ly

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى الكشف عن أسباب تلوث مياه الآبار ببعض المناطق السكنية بمدينة بنغازي، حيث تناولت هذه الدراسة تلوث مياه الآبار التي يعتمد عليها السكان في استخداماتهم اليومية نظراً لغياب شبكات الإمداد بالمياه في أغلب أحياء المدينة. تم جمع عينات من ثمانية عشر بئراً للمياه الجوفية في أربعة أحياء سكنية في بنغازي، ليبيا (الهواري، بوهديمة، شبنة، حي السلام) في خلال عام 2025م. وأجريت اختبارات فيزيائية وكيميائية وميكروبيولوجية شاملة لتقييم معايير جودة المياه الرئيسية، بما في ذلك التوصيل الكهربائي، والمواد الصلبة الذائبة الكلية، والنترات، والبكتيريا القولونية الكلية، والإشريكية القولونية، والعدد الإجمالي للميكروبات. وقورنت النتائج بالمعايير الوطنية الليبية وإرشادات منظمة الصحة العالمية.

أثبتت النتائج وجود مستويات عالية من التلوث في مياه الآبار داخل الوحدات السكنية المستهدفة في الدراسة، يقف وراء ذلك الانتشار العشوائي للآبار السوداء، التي صممت بطرق غير علمية. وكشفت النتائج عن تدهور حاد في جودة المياه الجوفية، حيث بلغت معدلات التجاوز 94.4% للمواد الصلبة الذائبة الكلية، و88.9% للتوصيل الكهربائي، و88.9% للعدد الإجمالي للميكروبات، و83.3% للبكتيريا القولونية الكلية، و66.7% للإشريكية القولونية **(E. coli)** ، و50.0% للنترات. على الرغم من بقاء مستويات الرقم الهيدروجيني ضمن الحدود المقبولة، فإن الانتشار الواسع للمؤشرات البرازية والكيميائية يُشير إلى خطر جسيم على الصحة العامة.

كما أظهرت تحليلات الارتباط الإحصائي بين تركيزات الملوثات والمسافة من الآبار السوداء اتجاهات غير دالة إحصائياً في الغالب، مما يُشير إلى أن هيدرولوجيا المياه الجوفية، وهشاشة طبقة المياه الجوفية، وممارسات الصرف الصحي غير المنظمة تُساهم مجتمعةً في أنماط التلوث. تُؤكد هذه الدراسة على الحاجة الملحة إلى إدارة متكاملة للمياه الحضرية، ولوائح أكثر صرامة لأنظمة الصرف الصحي، وتوسيع مستهدف للبنية التحتية للصرف الصحي...

الكلمات المفتاحية

التلوث؛ الآبار السوداء؛ المياه الجوفية؛ الصرف الصحي الحضري؛ مدينة بنغازي

1. المقدمة

تواجه ليبيا مفارقة عميقة في الأمن المائي؛ إذ تُصنف ضمن الدول العشرين الأكثر إفقاراً للمياه في العالم، وتعتمد بشكل شبه حصري بنسبة تزيد عن 97% على المياه الجوفية غير المتجددة منظمة الأغذية والزراعة [FAO], 2018).في مثل هذه البيئات المقيدة هيدرولوجياً، يمكن لأي تلوث محلي أن يطلق العنان لتدهور لا رجعة فيه في طبقات المياه الجوفية، مما يحول حوادث التلوث الموضعية إلى تهديدات وجودية للأمن المائي العام.(Foster & Chilton, 2003)

لا تتجلى هذه الهشاشة في مكان بحدة ما تتجلى في مدينة بنغازي، ثاني أكبر المدن الليبية الساحلية، حيث تفتقر النسبة الأكبر من الأحياء الحضرية إلى شبكات صرف صحي مركزية عاملة .(CEDARE, 2005) تعتمد المناطق المحيطة بمركز المدينة بشكل أساسي على أنظمة صرف صحي محلية غير منظمة تُعرف محلياً الابار السوداء ، والتي بُنيت في غياب تام للمواصفات الهندسية الهادفة للتحكم في التسرب. وقد تفاقمت هذه الأزمة نتيجة التوقف الكامل لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي في القوارشة ذات السعة التصميمية البالغة 189,000 متر مكعب يومياً (برنامج الأمم المتحدة للبيئة.(UNEP/MAP, 2019)

تتسم الطبقة الحاملة للمياه في مدينة بنغازي بطبيعة ساحلية مكشوفة تتكون من رواسب رملية وصخور كالكارنيت عالية النفاذية، مما يسهل عملية الترشيح العمودي السريع للملوثات دون وجود طبقات طينية واقية كافية .(Muftah, 2020) وتشير الأدلة الميدانية إلى أن سائل الصرف الصحي يمكن أن يصل إلى المياه الجوفية خلال فترة زمنية قصيرة .(Robertson et al., 1991) كما أن المسافات الوقائية التقليدية الموصى بها (15-30 متراً) تفشل تماماً في مثل هذه التربة الخشنة، حيث أثبتت الدراسات أن المسافات المطلوبة للحد من الفيروسات والبكتيريا تتجاوز ذلك بكثير في البيئات ذات النفاذية العالية (Pang et al., 2003).

تنطلق هذه الدراسة من تساؤلات بحثية جوهرية تتعلق بمدى إسهام الآبار السوداء في تلويث المياه الجوفية في مدينة بنغازي، ومدى ملاءمة هذه المياه للاستخدام البشري وفقاً للمعايير الليبية (المركز الوطني للمواصفات والمعايير، 2015) ومنظمة الصحة العالمية (WHO, 2022)، وتقديم حلول هندسية وإدارية للتخفيف من هذا الخطر.

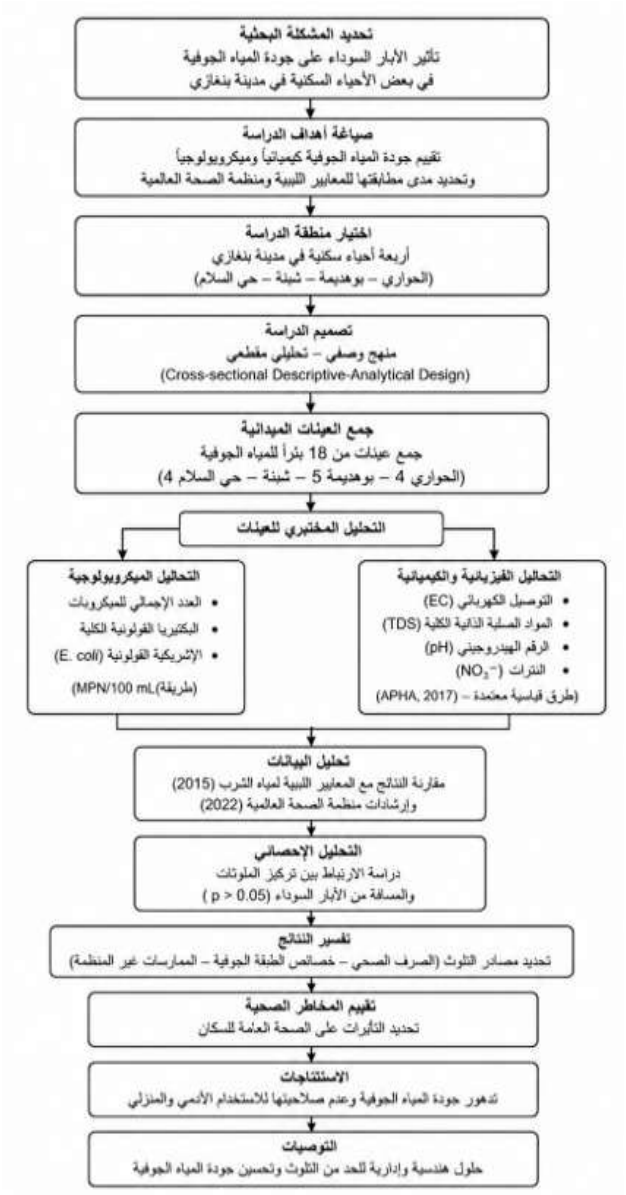
2. مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة

أكدت الأدبيات الهيدروجيولوجية العالمية والإقليمية أن أنظمة الصرف الصحي اللامركزية العاملة في طبقات مياه جوفية خشنة النفاذية تعمل بمثابة قنوات مباشرة لنقل الملوثات بدلاً من كونها وحدات معالجة فعالة . (Robertson, 2021)فقد أظهرت الدراسات الكلاسيكية والحديثة أن ريشة التلوث الناجمة عن خزانات الصرف الصحي تمتد لمسافات طويلة مشبعة بالمركبات النيتروجينية والكلوريد .(Esser et al., 2020) مدينة بنغازي، وثقت دراسة (Nair et al., 2004) تجاوزات خطيرة في تراكيز النترات في مناطق مختلفة نتيجة الأنشطة الحضرية والخدمية. كما وثقت دراسات أخرى في مناطق شبنة والقرارة وقنفودة (El Fallah et al., 2025) . مستويات عالية من الملوحة، والتوصيل الكهربائي، والتلوث البكتيري المتمثل في انتشار بكتيريا الإشريكية القولونية .(E. coli)، مما يؤكد أن الاعتماد على الآبار السوداء غير المصممة هندسياً يمثل المصدر الرئيسي لتلوث المياه الجوفية (Hamad et al., 2021)

3. إطار العمل الميداني والمنهجية البحثية

اعتمدت الدراسة تصميماً بحثياً وصفياً-تحليلياً ، يدمج بين التحليل المعملي للعينات المائية والمسح الميداني لخصائص الآبار وأنظمة الصرف الصحي المجاورة والشكل (1) يبين المنهجية المتبعة بالتفصيل

الشكل (1) : يبين منهجية الدراسة



3.1منطقة الدراسة

أُجريت الدراسة في أربعة أحياء سكنية رئيسية في مدينة بنغازي تقع خارج نطاق التغطية بشبكة الصرف الصحي المركزية، وهي: الهواري، بوهديمة، شبنة، وحي السلام كما في الشكل (2)، وتتميز هذه المناطق باعتماد سكانها الكلي على الآبار الخاصة الضحلة لتلبية الاحتياجات المنزلية، في ظل منسوب مياه جوفية ضحل يتراوح أحياناً لأقل من متر واحد موسمياً (El Fallah et al., 2025).

الشكل (2): يوضح مناطق الدراسة على الصورة الجوية لمدينة بنغازي



3.2 استراتيجية جمع العينات والتحليل المعملي

تم جمع عينات مائية من ثمانية عشر (18) بئراً منزلية خلال العام 2025م ، موزعة كالتالي: 4 آبار في منطقة الهواري، 5 في منطقة بوهديمة، 5 في منطقة شبنة، و4 في حي السلام. أُجريتالاختبارات وفقاً للطرق القياسية المعتمدة (APHA, 2017)، وشملت:

القياسات الفيزيائية والكيميائية: قياس التوصيل الكهربائي (EC)، وحساب المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS)، وقياس الرقم الهيدروجيني (pH) ، وتحديد تركيز النترات(3_ ⟦ "NO" ⟧ ^-) باستخدام طريقة حامض الفينول ديسلفونيك والطيف الضوئي عند طول موجي 410 نانومتر (APHA, 2017).

التحليلات الميكروبيولوجية: تقدير البكتيريا القولونية الكلية والإشريكية القولونية (E. coli) باستخدام تقنية التخمير في الأنابيب المتعددة لتحديد العدد الأكثر احتمالاً (MPN/100 mL) ، إضافة إلى تقدير العدد الإجمالي للميكروبات (Total Microbial Count) (APHA, 2017).

4. النتائج والمناقشة

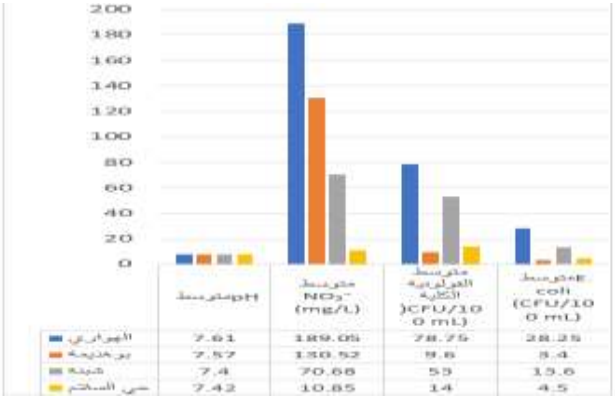
أظهرت النتائج المعملية للعينات الـ 18 المدروسة تفاوتاً كبيراً في مستويات التلوث الكيميائي والميكروبيولوجي، حيث تم مقارنة النتائج بالمعايير الليبية لمياه الشرب (المركز الوطني للمواصفات والمعايير القياسية، 2015) وإرشادات منظمة الصحة العالمية (WHO, 2022)، و الجدول (1) يبين هذه النتائج، اما الشكل رقم (2) فيمثل نتائج المتوسطات بيانيا.

الجدول (1): يبين نتائج الاختبارات المعملية للاحياء الاربعة ومتوسطاتها

رقم العينة	المنطقة	التوصيل الكهربائي (µS/cm)	المواد الصلبة الذائبة الكلية (mg/L)	الأس الهيدروجيني	النترات (mg/L)	القولونيات الكلية (CFU/100	القولوني (CFU/100	العد الميكروبي الكلي (CFU/mL)
1	الهواري	8,070	5,740	7.26	124.0	240	70	1,000
2	الهواري	1,969	1,398	7.57	130.0	43	30	300
3	الهواري	2,310	3,250	7.84	192.2	9	3	500
4	الهواري	3,210	4,520	7.77	310.0	23	10	500
متوسط الهواري (4 عينات)		**3,889.75**	**3,740.00**	**7.61**	**189.05**	**78.75**	**28.25**	**575.00**
5	بوهديمة	3,860	2,740	7.65	136.4	<0.05	<0.05	3,000
6	بوهديمة	1,241	880	7.94	31.0	20	7	500
7	بوهديمة	2,670	1,895	7.07	143.0	21	10	1,000

8	بوهديمة	2,488	1,058	7.88	1.2	<0.05	<0.05	200
9	بوهديمة	3,910	2,770	7.32	341.0	7	<0.05	1,000
متوسط بوهديمة (5 عينات)		**2,233.80**	**1,868.60**	**7.57**	**132.28**	**9.60**	**3.40**	**1,140.00**
1	شبنة	6,500	4,610	7.32	31.0	15	7	20
1	شبنة	3,360	2,380	7.17	124.0	21	10	200
12	شبنة	2,480	1,758	7.90	37.2	93	<0.05	500
13	شبنة	2,810	2,000	7.20	142.6	43	15	300
1	شبنة	2,230	1,587	7.41	18.6	93	36	200
متوسط شبنة (5 عينات)		**3,476.00**	**2,467.00**	**7.40**	**70.68**	**53.00**	**13.60**	**244.00**
15	حي السلام	4,070	2,890	7.58	<1.0	9	4	500
16	حي السلام	5,650	4,020	7.19	31.0	4	<0.05	25
17	حي السلام	6,140	4,360	7.58	12.4	<0.05	<0.05	200
1	حي السلام	6,280	4,460	7.34	<1.0	43	14	500
متوسط حي السلام(4 عينات)		**5,535.00**	**3,932.50**	**7.42**	**10.85**	**14.00**	**4.50**	**306.25**

الشكل (2): يوضح التمثيل البياني متوسطات نتائج الاختبارات المعملية للاحياء الاربعة



ومن نتائج الاختبارات قام البحثان باجراء مقارنة للمؤشرات مع الحدود القياسية و تظهر نتائج المقارنة في الجدول(2).

الجدول (2): ملخص الفحوصات الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية لعينات مياه الآبار الجوفية مقارنة بالحدود القياسية (عدد العينات = 18)

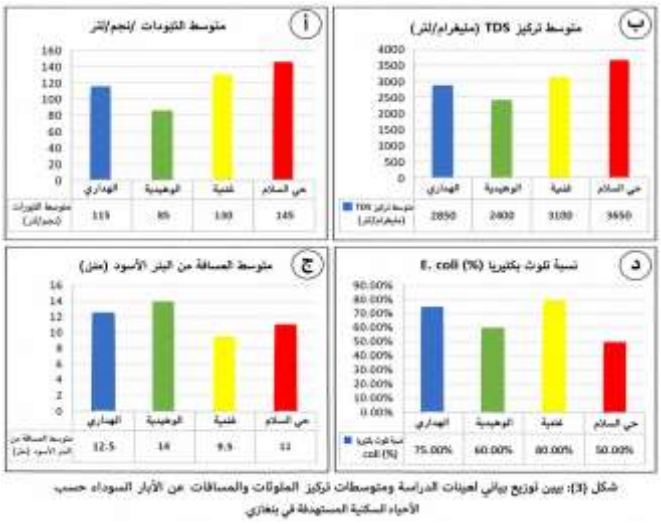
المؤشر / البارامتر	النطاق المرصود في العينات	الحد الأقصى المسموح به (المواصفة القياسية الليبية 82-2015)	إرشادات منظمة الصحة العالمية (WHO 2022)	عدد العينات المتجاوزة	نسبة عدم المطابقة والتجاوز (%)
المواد الصلبة الذائبة الكلية(TDS)	1200 – 4500 mg/L تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي 1000 mg/L تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي	1000 mg/L		17	**94.4%** تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي
التوصيل الكهربائي(EC)	1600 – 6200 µS/cm 1600 µS/cm	1500 µS/cm		16	**88.9%**
العد الإجمالي للميكروبات (TMC)	0 CFU/mL -> 2000 CFU/mL 0 CFU/mL	0 CFU/mL		16	**88.9%**
بكتيريا القولونيات الكلية(Total Coliforms)	0–> 200 CFU/100mL تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي 0 CFU/100mL تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي	150 CFU/100mL		15	**83.3%**
الإشريكية القولونية(*E. coli*)	0 – 85 CFU/100mL تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي 0 CFU/100mL تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي	120 CFU/100mL		12	**66.7%** تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي

النترات (NO_3^-)	45 – 180 mg/L تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي	45 mg/L تقييم حساسية الخزانات الجوفية الساحلية للتلوث الناتج عن غياب شبكات الصرف الصحي: دراسة حالة مدينة بنغازي	50 mg/L	9	**50.0%**
الرقم الهيدروجيني (pH)	7.1 – 7.9	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	0	**0.0%**

و قد تم حصر وتوزيع عينات مياه الآبار المدروسة وحساب متوسطات تركيز المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) والنترات (NO_3^-) ونسب ثبوت بكتيريا الإشريكية القولونية(E.coli) ، فضلاً عن رصد متوسط المسافات الفاصلة بين الآبار وخزانات الصرف الصحي في الأحياء السكنية الأربعة المستهدفة (الهواري، بوهديمة، شبنة، وحي السلام) كما يتضح في الجدول (3)، مما يبرز تقارب المسافات وارتفاع تركيزات الملوثات في مختلف مناطق الدراسة، اما الشكل(3) فيوضح التمثيل البياني لمتوسطات تركيزات الملوثات حسب الاحياء.

الجدول (3): توزيع عينات البحث والتلوث الميكروبي حسب الأحياء السكنية المستهدفة في بنغازي

الحي السكني المستهدف	عدد الآبار المفحوصة	متوسط تركيز TDS ملجم/لتر	متوسط النترات ملجم/لتر	نسبة ثبوت بكتيريا *E. coli* (%)	متوسط المسافة عن البئر الأسود (أمتار)
الهواري	4	2850	115	75.0%	12.5م
بوهديمة	5	2400	85	60.0%	14.0م
شبنة	5	3100	130	80.0%	9.5م
حي السلام	4	3650	145	50.0%	11.0م
المجموع	**18**	**2990**	**118.75**	**66.7%**	**11.75م**



شكل (3): يبين توزيع بياني لعينات الدراسة ومتوسطات تركيز الملوثات والمسافات عن الآبار السوداء حسب الأحياء السكنية المستهدفة في بنغازي

4.1 النتائج الكيميائية والفيزيائية

سجلت القياسات الفيزيائية والكيميائية مستويات حرجة من التجاوزات مقارنة بالحدود المسموح بها وطنيا وعالميا:

1. المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS): بلغت نسبة التجاوز للحد المسموح به (1000 ملجم/لتر) نحو 94.4% من العينات المدروسة، مما يعكس تأثير الملوحة العالية والتسربات الملحيّة والصرف الصحي.
2. التوصيل الكهربائي (EC): بلغت نسبة تجاوز الحد المسموح به (1600 ميكروسيمنز/سم) نحو 88.9% من إجمالي الآبار.
3. النترات (NO_3^-): سجلت تراكيز تجاوزت الحد المسموح به (45 ملجم/لتر) في 50.0% من العينات، وهو ما يعد دلالة واضحة ومباشرة على تلوث المياه بفعل تسرب مياه الصرف الصحي من الآبار السوداء والأنشطة العضوية المحيطة.
4. الرقم الهيدروجيني (pH): بقيت قيم الرقم الهيدروجيني ضمن الحدود المقبولة قانونياً وعالمياً (6.5 - 8.5) لجميع العينات.

و قد تم اجراء مقارنة شاملة لنتائج الفحوصات الفيزيائية، والكيميائية، والميكروبيولوجية لعينات مياه الآبار الجوفية مع الحدود القصوى المسموح بها وفقاً للمواصفات القياسية الليبية وإرشادات منظمة الصحة العالمية، حيث تُلخص هذه المقارنة مبينةً بوضوح نسب عدم المطابقة وحجم التجاوز الخطر لكل بارامتر مدروس كما في الجدول(4) ، اما نتائج الاختبارات الكيميائية والميكروبيولوجية ونسب التجاوز الفعلية للمعايير القياسية لمؤشرات جودة المياه الجوفية بصورة بيانية تعكس بوضوح خطورة الوضع البيئي والصحي القائم في الأحياء قيد الدراسة من خلال الشكل (4).

الجدول (4): ملخص نتائج الفحوصات الكيميائية والميكروبيولوجية ونسب التجاوز للمعايير القياسية

بارامتر الجودة الكيميائية / الميكروبيولوجية	قيمة الحد المسموح) المعيار الليبي(WHO /	نسبة العينات المتجاوزة(%)	الحالة العامة للتقييم
المواد الصلبة الذائبة (TDS)	1000ملجم/لتر	94.4%	تجاوز خطر
التوصيل الكهربائي (EC)	1600 µS/cm	88.9%	تجاوز خطر
العدد الإجمالي للميكروبات	مرجعي	88.9%	تلوث بكتيري جسيم
البكتيريا القولونية الكلية	CFU/100 mL	83.3%	تلوث برازي

			مؤكد
الإشريكية القولونية (E. coli)	CFU/100 mL	66.7%	خطورة صحية قصوى
النترات (NO₃⁻)	45ملجم/لتر	50.0%	تلوث نتراتي واضح
الرقم الهيدروجيني (pH)	6.5 - 8.5	0.0%	ضمن الحدود المقبولة

الشكل(4): يبين الملخص البياني لنسب التجاوز المعياري للبارامترات الكيميائية والميكروبيولوجية لعينات مياه الآبار مقارنة بالحدود المسموح بها



4.2. النتائج الميكروبيولوجية ومؤشرات التلوث بالصرف الصحي

أثبتت التحليلات البكتيرية الوضع الصحي الحرج لمياه الآبار المستهدفة؛ إذ أظهرت النتائج أن نسبة تجاوز العدد الإجمالي للميكروبات بلغت 88.9%، بينما بلغت نسبة تجاوز البكتيريا القولونية الكلية 83.3%. والأخطر من ذلك هو ثبوت وجود بكتيريا الإشريكية القولونية (E. coli) في 66.7% من العينات المحللة، مما يثبت حدوث تلوث برازي مباشر ومستمر ناتج عن تسرب محتويات الآبار السوداء إلى المياه الجوفية دون حدوث أي تنقية طبيعية كافية في طبقة التربة الرملية السطحية.

4.3. التحليل الإحصائي والعلاقات المكانية

للتحقق الدقيق من طبيعة العلاقة المكانية، أُجري تحليل ارتباط إحصائي تفصيلي باستخدام معامل ارتباط بيرسون (Pearson Correlation) ومعامل ارتباط الرتب لسبيرمان (Spearman's Rank Correlation) لاختبار العلاقة بين المسافة الأفقية الفاصلة عن خزانات الصرف الصحي وكل بارامتر ملوث على حدة (TOD ، EC، NO-3، وE.coli) واوضحت النتائج الرياضية قيماً لمعامل الارتباط (r أو p) منخفضة وغير دالة إحصائياً عند مستوى معنوية (p>0.05) لجميع المؤشرات، مما يثبت رياضياً غياب أي انحدار خطي طردي أو عكسي منتظم يتوافق مع النموذج المفاهيمي التقليدي للانتشار الأحادي.

وعلى الصعيد الهيدروجيولوجي والفيزيائي، لا يعكس غياب الارتباط الخطي البسيط غياب التأثير، بل يعود ذلك إلى أسباب فيزيائية بحتة تتمثل في تداخل شبكات ريش التلوث المتجاورة (Overlapping Plumes) الناتجة عن الكثافة العالية للآبار السوداء المتقاربة في النطاق الحضري المدروس. فعوضاً عن وجود مصدر تلوث نقطي (Point Source) منعزل تتناقص تراكيزه شعاعياً بانتظام مع المسافة وفقاً لقوانين التشتت (Dispersion)، تتحول المنطقة الحضرية إلى مصدر تلوث مساحي موزع (Diffuse/Areal Source)، وتتداخل فيه مئات الملوثات وتتجانس ضمن طبقة الكالكارنيت عالية النفاذية (High-Permeability Calcarenite Aquifer). هذا التشبع الكامل والخلط المستمر يفقد المسافة الأفقية القصيرة (15-30 متراً) جدولتها كعملية حماية طبيعية، ويخلق بيئة هيدروليكية معقدة ترتفع فيها التراكيز بصورة عشوائية بغض النظر عن المسافة المباشرة لخزان الصرف المجاور للبئر المستهدفة (Robertson, 2021; Hamad et al., 2021).

4.4. الآثار المترتبة على الصحة العامة

إن وجود بكتيريا E. coli بنسبة تجاوزت 66.7% وتجاوز النترات بنسبة 50% يشكل تهديداً مباشراً على الصحة العامة لسكان هذه الأحياء. استهلاك هذه المياه يُعرض السُكان - وخاصة الأطفال وكبار السن - لأمراض الجهاز الهضمي الحادة، والتيفوئيد، والدزنتري، فضلاً عن المخاطر المزمنة المرتبطة بتسمم الدم النتراتي للأطفال الرضع (ميتهايموغلوبين الدم)، والارتباطات المحتملة للمركبات النيتروزية المسرطنة على المدى الطويل (Rajan et al., 2024; WHO, 2022).

5. الاستنتاجات

تخلص هذه الدراسة إلى أن الوضع الحالي للمياه الجوفية في الأحياء السكنية المستهدفة بمدينة بنغازي يعاني من تدهور بكتيري وكيميائي حاد، ناتج بشكل أساسي عن غياب شبكات الصرف الصحي المركزية وتوقف محطة معالجة مياه الصرف الصحي بالقوارشة عن العمل كلياً، وما يصاحب ذلك من انتشار عشوائي للآبار السوداء غير المطابقة للمواصفات الهندسية. إن المعدلات المرتفعة لتجاوز معايير الشرب (94.4% للمواد الصلبة، و88.9% للتوصيل الكهربائي والميكروبات، و66.7% لبكتيريا الإشريكية القولونية) تجعل هذه المياه غير صالحة البتة للاستهلاك الآدمي والمنزلي المباشر.

6. التوصيات

بناءً على النتائج التجريبية والميدانية الموثقة، توصي الدراسة بما يلي:
تتضمن الحلول الهندسية العاجلة والمرحلية على المدى القصير والمتوسط اشتراطات التصميم الهيدروليكي الآمن للآبار السوداء

بناءً على النتائج التجريبية والميدانية الموثقة، توصي الدراسة بما يلي:

1. تتضمن الحلول الهندسية العاجلة والمرحلية على المدى القصير والمتوسط اشتراطات التصميم الهيدروليكي الآمن للآبار السوداء.
2. يجب ان يلتزم في التصميم التبطين والعزل الكامل منعاً للارتشاح الحر للمياه الآسنة إلى الخزان الجوفي الضحل، وذلك بإنشاء وتنفيذ خزانات صرف صحي لامركزية ذات جدران وقاع مسلحة ومطليّة بمواد إيبوكسية أو بوليمرية عازلة بنسبة تسريب صفرية ، مع ضرورة اعتماد اختبارات ضغط الماء للتأكد من خلوها من أي تشققات إنشائية قبل تشغيلها.
3. تشمل الحلول الهندسية العاجلة أيضاً اعتماد أنظمة الغرف المتعددة ممثلة في تصميم الخزان المكون من مرحلتين أو ثلاث مراحل لفصل المواد العالقة والدهون وتقليل الحمل العضوي والبكتيري مبدئياً قبل أي تصريف محتمل أو عمليات نضح مقننة.
4. يُوصى باعتماد معادلة نصف القطر الهيدروجيولوجي التأثيري لتحديد مسافات أمان أفقية دنيا لا تقل عن (50 إلى 75متراً) بين أي بئر مائي جوفي استكشافي أو منزلي وأقرب خزان صرف صحي، مع ضرورة تطبيق الختم الحلقي الإسمنتي لمواسير الآبار لعمق يتجاوز نطاق التلوث الضحل نظراً لأن النفاذية العالية لطبقة الكالكارنيت في بنغازي تُلغي جدوى المسافات التقليدية القصيرة.
5. تركيب أنظمة معالجة منزلية مدمجة وثلاثية المراحل للاستفادة من الآبار الارتوازية المحلية لأغراض غير شربية، بحيث تعتمد على:
   أ. مرشحات الرمل والكربون النشط لإزالة المواد الصلبة العالقة (TDS)والروائح،
   ب. وحدات التعقيم بالأشعة فوق البنفسجية أو الكلورة الدقيقة كمرحلة نهائية للقضاء التام على مسببات الأمراض وبكتيريا الإشريكية القولونية.(E.coli)

6. تشمل الحلول الاستراتيجية طويلة الأجل الإسراع في استكمال وتنفيذ مشروعات شبكات الصرف الصحي المركزية في الأحياء غير المخدومة (الهواري، بوهديمة، شبنة، حي السلام) وربطها بمحطات معالجة فعالة لتجميع مياه الصرف الصحي ونقلها خارج النطاق الجغرافي للحوض الجوفي الساحلي لمدينة بنغازي .
7. تتضمن الحلول طويلة الأجل أيضاً إعطاء أولوية قصوى لإعادة تأهيل وتشغيل محطة القوارشة لمعالجة مياه الصرف الصحي بدلاً من تفريغها في البيئة.
8. إنشاء شبكة رصد ومراقبة هيدروجيولوجية رقمية مستمرة للإدارة المتكاملة للموارد المائية بهدف تتبع تراكيز الملوثات واتجاهات ريش التلوث بصورة دورية، وربط تراخيص بناء الأبنية السكنية الجديدة بشبكة الصرف الصحي العامة إجبارياً قبل إيصال خدمات المياه العذبة.

7. المراجع

Ahmida, N. H. S., Buaisha, M & ,.Ahmida, M. H. S. (2016). Assessment of Groundwater Quality in Shebna Region, Benghazi-Libya and Its Suitability for Drinking and Domestic Purposes .Journal of Environmental Science and Engineering-112 ,(2)5 , .125

Al-Ani, N. M & ,.Saady, N. M. (2003). Assessment of Groundwater Pollution at Qanfuda Landfill Site in Benghazi City, Libya .Arabian Journal for Science and Engineering28 ,(1B), 45-58.

APHA .(2017) .Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association, Washington, D.C.

Baghni, S. S. (2018). The Impact of Wastewater on Groundwater Pollution in Nalut City .Journal of Arid Environments Research.104-89 ,(2)12 ,

Bouderbala, A. (2019). Evaluation of groundwater contamination by septic systems in semi-arid coastal aquifers .Environmental Earth Sciences , .415 ,(14)78

CEDARE .(2005) .Regional Water Pollution Control Report: Benghazi Urban Area .Centre for Environment and Development for the Arab Region and Europe, Cairo.

El Fallah, O. A., Al Faitouri, M. S & ,.Muftah, A. M. (2025). Hydrogeochemical Assessment of Groundwater in the Southeast of Benghazi City, Libya .Libyan Journal of Earth Sciences-33 ,(1)18 , .49

Esser, B. K., Beller, H. R., Carle, S. F & ,.Velsko, C. A. (2020). Field-based Study of Septic System Impact on Groundwater .Journal of Contaminant Hydrology.103567 ,228 ,

FAO .(2018) .Water Security and Scarcity in the Near East and North Africa: A Regional Perspective . Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Foster, S & ,.Chilton, J. (2003). Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation .Hydrogeology Journal.82-67 ,(1)11 ,

Hamad, J. R. J., Elsharif, M. A & ,.Elsharif, H. M. A. (2021). Quality Assessment of Groundwater Resources in the City of Al-Marj, Libya .Journal of Water Resource and Protection.290-271 ,(4)13 ,

Harman, J., Robertson, W. D., Cherry, J. A & ,.Zanini, L. (1996). Impacts on a sand aquifer from an old septic system: Nitrate and phosphate . Groundwater.1114-1105 ,(6)34 ,

Libyan Standards Institution .(2015) .Libyan National Drinking Water Standards and Specifications (No. 82-2015). Tripoli, Libya.

Muftah, A. M. (2020). Hydrogeological framework and coastal aquifer characteristics of Benghazi region . Journal of African Earth Sciences.103784 ,165 ,

Nair, G. A., El-Toumi, F. F., El-Jenjan, H. B & ,. Abusneina, A. M. (2004). Nitrate contamination in groundwaters of Benghazi, Libya .Northeast African Studies.128-115 ,(2)8 ,

Pang, L., Close, M., Golovnya, V & ,.Noonan, M. (2003). Estimation of septic tank virus removal in alluvial gravels using chitosan and sand column experiments .Journal of Environmental Quality , .1215-1205 ,(4)32

Rajan, A., Kumar, S & ,.Sharma, P. (2024). Public health implications of faecally contaminated groundwater in developing urban environments .Science of The Total Environment.169342 ,912 ,

Robertson, W. D .(2021) .Septic System Impacts on Groundwater Quality .The Groundwater Project, Guelph, Canada.

UNEP/MAP .(2019) .State of the Environment and Development in the Mediterranean .United Nations Environment Programme / Mediterranean Action Plan, Athens.

WHO .(2022) .Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed., incorporating the 1st and 2nd addenda). World Health Organization, Geneva.

Zew, I. N., Alziani, A., Nasser, A & ,.Awad, M. (2023). Analysis of the Effect of Solid Waste and Sanitation on Groundwater in Benghazi City .Environmental Monitoring and Assessment.942 ,(8)195 ,