J. Basic Appl. Sci. Vol. 25, I (1) June 2026. Ar. 19-27
مجلة العلوم الأساسية والتطبيقية
Journal of Basic and Applied Sciences
https://ba.lafsrj.ly/

دراسة كفاءة الكلور في تثبيط نشاط الكائنات الحية الدقيقة الممرضة في المياه

محمد الأمين عبد الجواد*، أسامة أحمد الزقى، محمد الزياني

الهيئة الليبية لبحث العلمي – طرابلس - ليبيا

الملخص: يُعد الكلور من أكثر المطهرات استخدامًا في عمليات معالجة مياه الشرب نظرًا لفعاليته العالية وتكلفته المنخفضة وسهولة تطبيقه. تهدف هذه الدراسة إلى استعراض كفاءة الكلور التطهيرية ضد مختلف الكائنات الحية الدقيقة الممرضة بما في ذلك البكتيريا، والفيروسات، والبروتوزوا، والطفيليات المعوية. أظهرت النتائج أن الكلور فعال ضد معظم أنواع البكتيريا والفيروسات عند استخدام جرعات مناسبة وأزمنة تلامس كافية، إلا أن فاعليته محدودة تجاه بعض أنواع البروتوزوا مثل *Giardia lamblia* و*Cryptosporidium parvum*، والتي تتطلب تركيزات أعلى وزمن تلامس أطول لتحقيق نسب تثبيط مرتفعة. كما بينت الدراسة أن فعالية الكلور تزداد بارتفاع درجة الحرارة وانخفاض الأس الهيدروجيني، بينما تقل عند انخفاض درجات الحرارة أو وجود المادة العضوية. توصي الدراسة بدمج عمليات أخرى مثل الترشيح والتخثير قبل الكلورة لتحقيق إزالة شاملة للكائنات الدقيقة وضمان جودة المياه المنتجة.

سجل المقال:
أستلم: 2025/10/25م
قبل للنشر: 2025/11/10م

الكلمات المفتاحية:
التطهير.
الكائنات الحية الدقيقة.
الجيارديا.
الكريبتوسبوريديوم.
جودة مياه الشرب.

Study of The Efficiency of Chlorine in Inhibiting The Activity of Pathogenic Microorganisms in Water

Mohamed Abduljawad *, Usama Ezzegni, Mohamed Al-Zayani

Abstract: Chlorine is one of the most widely used disinfectants in drinking water treatment processes due to its high efficacy, low cost, and ease of application. This study aims to review the disinfection efficiency of chlorine against various pathogenic microorganisms, including bacteria, viruses, protozoa, and intestinal parasites. The results showed that chlorine is effective against most types of bacteria and viruses when appropriate doses and sufficient contact times are used; however, its effectiveness is limited against certain protozoa such as *Giardia lamblia* and *Cryptosporidium parvum*, which require higher concentrations and longer contact times to achieve high inactivation rates. The study also indicated that chlorine efficacy increases with higher temperatures and lower pH levels, while it decreases at low temperatures or in the presence of organic matter. The study recommends integrating other processes such as filtration and coagulation before chlorination to achieve comprehensive removal of microorganisms and ensure the quality of the produced water.

Keywords:
Chlorine;
Disinfection;
Microorganisms;
Giardia;
Cryptosporidium;
Drinking water quality

1. المقدمة:

تُعد حماية مصادر المياه من التلوث من القضايا ذات الأهمية البالغة، إذ يُفضل دائمًا الوقاية من التلوث على معالجته بعد حدوثه. غير أن منع تلوث هذه المصادر قد يكون صعبًا في كثير من الحالات نتيجةً للترسبات التي تُحدث تلوثات كيميائية وبيولوجية. ويشمل التلوث البيولوجي لمصادر المياه مجموعة واسعة من البكتيريا والفيروسات والديدان والبروتوزوا وغيرها من الكائنات الممرضة التي يكون مصدرها غالبًا فضلات الإنسان والحيوان.وللحد من هذه الملوثات، تتطلب معالجة المياه سلسلة من العمليات الفيزيائية والكيميائية المتكاملة، تهدف إلى تقليل انتشار الكائنات الدقيقة والقضاء عليها. وتشمل هذه العمليات: التخثير، والترسيب، والترشيح، والتطهير، حيث يُعد التطهير آخر مراحل المعالجة ويُعتمد فيه على تدمير الكائنات

* *الهيئة الليبية لبحث العلمي – طرابلس – ليبيا* abduljawad208@gmail.com

The Author(s) 2026. Open Access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

الحية الدقيقة المُمرضة باستخدام مواد كيميائية مثل الكلور الحر (حمض الهيبوكلوروس وأيون الهيبوكلورايت)، والكلورامين، والأوزون، وثاني أكسيد الكلور. تختلف هذه المواد في خصائصها من حيث الفعالية والتكلفة والاستقرار وسهولة الاستخدام وطبيعة النواتج الثانوية الناتجة عنها.

تهدف هذه الدراسة إلى استعراض فاعلية الكلور في تثبيط نشاط الكائنات الدقيقة المُمرضة في المياه، والتي تُصنف عادة إلى ثلاث مجموعات رئيسة: البكتيريا، والفيروسات، والبروتوزوا. فالبكتيريا كائنات دقيقة وحيدة الخلية، تُصنّف حسب أشكالها إلى أربع مجموعات: مكورات، عصيات، عصيات منحنية، ولولبيات. أما الفيروسات فهي كائنات دقيقة تتكوّن من مادة وراثية (DNA) أو (RNA) محاطة بغلاف بروتيني واقٍ، ولا تستطيع القيام بالأنشطة الأيضية إلا داخل خلايا العائل. بينما تُعد البروتوزوا كائنات دقيقة ذات خلية واحدة تمتلك نواة وليس لها جدار خلوي، وتتغذى على البكتيريا، وقد تكون حرة المعيشة أو طفيلية. ويوضح الجدول (1) مقارنة بين أهم خصائص الكائنات الحية الدقيقة المُمرضة المتوقع تواجدها في المياه.

الجدول (1): بعض خصائص الكائنات الحية الدقيقة المُمرضة المتواجدة في المياه [1].

الكائنات الحية الدقيقة	الحجم (ميكرومتر)	القدرة على الحركة	المصادر	مقاومة التطهير	الإزالة بالترسيب، والتخثير، والترشيح
البكتيريا	0.1 - 10	متحركة غير متحركة	البشر والحيوانات والمياه والأغذية الملوثة	لها مقاومة عالية بينما البكتيريا اللاهوائية أقل مقاومة	جيدة ، إزالة 2-3 لوغاريتم
الفيروسات	0.01 - 0.1	غير متحركة	البشر والحيوانات والمياه الملوثة والأغذية الملوثة	عموما أكثر مقاومة من البكتيريا اللاتراوجية	ضعيفة، إزالة 1- 3 لوغاريتم
البروتوزوا أو الأوالي	1 - 20	متحركة غير متحركة	البشر والحيوانات والصرف الصحي النباتات المتحللة، والمياه	أكثر مقاومة من الفيروسات أو البكتيريا اللاتراوجية	جيدة، إزالة 2-3 لوغاريتم

1.1 الخصائص المثالية للمادة المطهرة:

توجد مجموعة من الخصائص التي يجب مراعاتها عند اختيار المادة المطهّرة المناسبة لمعالجة المياه الملوثة بالكائنات المُمرضة، من أهمها أن تكون المادة آمنة على صحة الإنسان والبيئة، وأن تمتلك قدرة عالية على اختراق جدران الكائنات الدقيقة وتدميرها تحت الظروف الاعتيادية. كما يجب أن تبقى فعالة ضمن نطاق درجات الحرارة المعتادة وأن توفر حماية مستمرة ضد إعادة التلوث، مع سهولة تحديد تركيزها ومتابعته. كذلك ينبغي ألا تنتج عنها مخلفات سامة أو نواتج جانبية مسرطنة (DBPs) وأن تكون متوفرة بتكلفة تشغيل وصيانة معقولة، وآمنة أثناء النقل والتخزين والتداول .

وبالنظر إلى هذه الخصائص، يتضح أن الكلور يُعد من أكثر المواد المطهّرة ملاءمة، على الرغم من إمكانية تكوينه لبعض النواتج الثانوية في ظروف معينة.

1.2 تفاعلات الكلور في الماء (Chlorine Chemistry)

يُعد الكلور (Cl_2) من أكثر المواد المطهّرة استخدامًا في معالجة مياه الشرب نظرًا لفعاليته العالية في القضاء على الكائنات الدقيقة وسهولة استخدامه وتوفّره. ويُستخدم الكلور عادة في صورته الغازية أو السائلة، إذ يتميز في حالته الغازية بلون أصفر مائل إلى الخضرة، وهو أثقل من الهواء بحوالي 2.48 مرة، بينما يكون في حالته السائلة ذا لون عنبري أثقل من الماء بنحو 1.44 مرة. عند إضافة الكلور إلى الماء، تحدث سلسلتان من التفاعلات الكيميائية الأساسيتين :التحلل المائي (Hydrolysis) والتأين (Ionization).

في تفاعل التحلل المائي، يتفاعل الكلور مع الماء مكوّنًا حمض الهيبوكلوروس (HOCl) وفق المعادلة التالية:

$$Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HOCl + H^+ + Cl^- \quad (1)$$

يُعد حمض الهيبوكلوروس حمضًا ضعيفًا، ولذلك فإنه يتأين جزئيًا إلى أيون الهيبوكلورايت (OCl^-) كما يلي:

$$HOCl \rightleftharpoons H^+ + OCl^- \quad (2)$$

ويُطلق على مجموع كلٍّ من ($HOCl$) و (OCl^-) في الماء اسم الكلور الحر المتاح (Free Available Chlorine). وتُعد نسبة وجود هذين الشكلين في الماء ذات أهمية كبيرة، إذ إن كفاءة التطهير تعتمد بشكل أساسي على النسبة بينهما، والتي تتأثر مباشرةً بدرجة الأس الهيدروجيني (pH). فعند $pH = 6.5$ يكون نحو 90% من الكلور الحر على هيئة حمض الهيبوكلوروس (HOCl) ، بينما عند $pH = 7.5$ تكون النسبة متقاربة بين الشكلين، وعند $pH > 9$ يسود الشكل الأيوني(OCl^-). وتُشير الدراسات إلى أن حمض الهيبوكلوروس (HOCl) أكثر فعالية في تثبيط نشاط البكتيريا من أيون الهيبوكلورايت (OCl^-) بنحو 70 إلى 80 مرة [2].

يمكن أيضًا توفير الكلور الحر المتاح بإضافة أملاح الهيبوكلوريت، مثل هيبوكلوريت الكالسيوم وهيبوكلوريت الصوديوم، والتي تتحلل في الماء مكوّنة حمض الهيبوكلوروس طبقًا للمعادلات التالية:

$$Ca(OCl)_2 + 2H_2O \longrightarrow 2HOCl + Ca(OH)_2 \quad (3)$$

$$NaOCl + H_2O \longrightarrow HOCl + NaOH \quad (4)$$

1.3. آلية تثبيط الكلور لنشاط الكائنات الحية الدقيقة:

يُعدُّ التثبيط بالكلور سريعًا ولا يسمح بتكاثر البكتيريا؛ إذ تسبب الكلورة انخفاضًا فوريًا في الأكسجين ينعكس سلبًا على تنفّس الخلايا البكتيرية [3]. كما يتلف الكلور غشاء جدار الخلية ويزيد من نفاذيته، ويقلّل من مستويات تركيب الحمض النووي(DNA) في البكتيريا. وتشير الدراسات إلى أن حمض الهيبوكلوروس (HOCl) يمتلك قدرة أعلى على اختراق الخلايا مقارنةً بالهيبوكلورايت (OCl^-)، مما يفسر الفعالية العالية للكلورة تحت ظروف معينة [4]. وبصفة عامة يمكن حصر آليات تثبيط الكلور للكائنات الدقيقة الممرضة في النقاط التالية:

- تدمير أو إضعاف نظام بناء الخلية بمهاجمة مكونات الخلية مثل جدار الخلية أو إضعاف وظائف الأغشية شبه النفاذة.
- التداخل في التمثيل الغذائي المنتج للطاقة عبر تعطيل حملات الإنزيمات وتغيير مجموعاتها، مما يجعلها غير فعالة.
- التداخل في البناء البيولوجي والنمو ومنع تركيب البروتينات الطبيعية، والأحماض الأمينية، والأنزيمات المساعدة، وجدار الخلية [1].

1.4. العوامل التي تؤثر على فعالية تثبيط الكلور:

تتعدد العوامل المؤثرة في فعالية الكلور، ومن أهمها درجة حرارة المياه، الرقم الهيدروجيني (pH) ، تركيز الكلور المتبقي، زمن التلامس، العكورة، والخلط وتداخل المواد العضوية. مثلاً:

- **الأس الهيدروجيني (pH):** تتأثر كفاءة التطهير بتغيرpH ؛ فمثلاً تثبيط نشاط الفيروسات يحتاج إلى وقت تلامس أطول بنسبة 50% عند $pH = 7$مقارنةً بـ $pH = 6$ ، كما أن رفع pH من 7 إلى 8.8 - 9 قد يتطلب زيادة زمن التلامس بما يصل إلى ستة أضعاف لتحقيق نفس مستوى التثبيط [5]. ومع أنّ معظم الدراسات تشير إلى تناقص الفاعلية بارتفاع pH ، إلّا أن دراسات أُخرى رصدت نتائج معاكسة لبعض الفيروسات [6] . نتائج الأبحاث تُوضِّح أن التفاعل بين pH وتوزيع $HOCl/OCl^-$ هو العامل الحاسم في تحديد الفاعلية [7].
- **درجة الحرارة :** يزداد نشاط الكلور بارتفاع درجة الحرارة، ويقل بانخفاضها؛ فعند انخفاض درجة حرارة الماء بمقدار 10 °م يلزم غالبًا مضاعفة أو تضاعف زمن التلامس 2–3 مرات للحصول على نفس مستوى التثبيط [8] .
- **زمن التلامس وتركيز الكلور (CT):** يُحسب CT على أنه حاصل ضرب تركيز الكلور الحر المتبقي (ملجم / لتر , C) ، في زمن التلامس (دقيقة T, وتزداد فاعلية التطهير بزيادة CT، ويُعبر عادةً عن مستوى التثبيط بال Log Reduction (1 Log =90% ، 2 Log = 99%، إلخ) [9].

2. تأثير الكلور على البكتيريا:

يُعتبر الكلور من أكثر المطهرات شيوعًا وفاعلية في القضاء على معظم أنواع البكتيريا، حيث يعمل على اختراق جدران الخلايا البكتيرية والتأثير على مكونات السيتوبلازم بما يؤدي إلى تعطيل العمليات الحيوية داخل الخلية ومن ثم موتها. تزداد فعالية الكلور مع **زمن التلامس**، كما تتأثر كفاءة التطهير بالرقم الهيدروجيني **(pH)** ودرجة الحرارة، نظرًا لتأثيرهما المباشر على أشكال الكلور النشطة (حمض الهيبوكلوروس وأيون الهيبوكلورايت) [10,11] .

تشير الدراسات إلى أن البكتيريا غير ذاتية التغذية (heterotrophic bacteria) الموجودة في مياه الشرب تُظهر مقاومة أكبر لتأثير الكلور مقارنةً بالعصيات المعوية (E. coli) ، وأن بعض الأنواع مثل البكتيريا المكوّنة للإسبورات (Bacillus, Clostridium) أو البكتيريا الحمضية السريعة (Acid-fast) مثل Mycobacterium و Nocardia تمتلك قدرة عالية على مقاومة التطهير بالكلور [12].

وقد أوضحت دراسات حديثة أن معظم البكتيريا الباقية على قيد الحياة بعد عمليات التطهير بالكلور تكون من **البكتيريا الإيجابية لصبغة الجرام (Gram-positive)**، نظرًا لسماكة جدارها الخلوي مقارنةً بالسلبية لصبغة الجرام [13, 14] (Gram-negative) . كما بينت بحوث منشورة مؤخرًا (2021–2023) أن فعالية الكلور ترتبط أيضًا بوجود المواد العضوية الذائبة التي تستهلك جزءًا من الكلور، مما يقلل من تركيزه المتاح لمهاجمة البكتيريا [15,16].

الجدول (2) : مقارنة بين كفاءة مكونات الكلور في تثبيط نشاط البكتيريا بنسبة 99٪ في الأنظمة الخالية من المواد المؤكسدة .

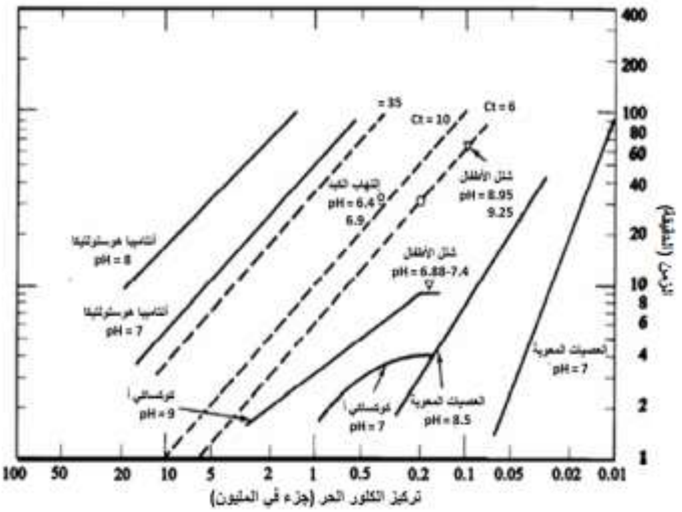
المطهر	العصيات المعوية (E. coli)			البكتيريا غير ذاتية التغذية (heterotrophic)		
	الأس الهيدووجيني	درجة الحرارة م°	قيم CT (ملجم / لتر* دقيقة)	الأس الهيدووجيني	درجة الحرارة م°	قيم CT (ملجم / لتر* دقيقة)
حمض الهيبوكلوروس	6.0	5	0.04	7.0	2 -1	0.02 + 0.08
أيون الهيبوكلورايت	10.0	5	0.92	8.5	2 -1	1.0 + 3.3

3. تأثير الكلور على الفيروسات:

تختلف الفيروسات في درجة حساسيتها للتطهير بالكلور، حيث يمكن تثبيط بعض الفيروسات بمستويات منخفضة نسبيًا من الكلور خلال فترة قصيرة، بينما تُظهر فيروسات أخرى مقاومة عالية. على سبيل المثال، يمكن تثبيط نشاط فيروس الريو (Reovirus) بنسبة 99.99% (4 لوغاريتمات) خلال 2.7 دقيقة فقط عند ظروف 0.5 ملجم / لتر من الكلور الحر، pH = 7.8، ودرجة حرارة 2 °م ، في حين أن فيروس شلل الأطفال (Poliovirus) يحتاج إلى زمن أطول قد يتجاوز 60 دقيقة لتحقيق نفس المستوى من التثبيط [17].

أظهرت دراسة لمؤسسة أعمال المياه الأمريكية (AWWA) أن مقاومة الفيروسات للكلور تختلف باختلاف السلالات والظروف التشغيلية. فعند 0.4 ملجم / لتر كلور حر، pH = 7 ، ودرجة حرارة 5 °م ، تم اختبار 20 سلالة مختلفة من الفيروسات، حيث تمكنت بعض سلالات شلل الأطفال (Poliovirus)من الوصول إلى 99.99% تثبيط خلال 10 دقائق (CT= 4 ملجم/ لتر·دقيقة)، بينما احتاجت سلالات أخرى إلى 100 دقيقة (CT= 40ملجم / لتر·دقيقة)، بل إن بعض السلالات لم تصل إلى هذا المستوى إلا بعد 1000 دقيقة (CT= 400 ملجم/ لتر·دقيقة) [18].

بصفة عامة، تُظهر الفيروسات المعوية مقاومة أكبر للكلور مقارنةً بالبكتيريا المعوية، حيث تتراوح قيم CT المطلوبة للتثبيط بنسبة 99% بين 2 و30 ملجم/ لتر·دقيقة حسب نوع الفيروس والظروف التشغيلية [19]. كما أن وجود الحطام الخلوي أو المواد العضوية يزيد من مقاومة الفيروسات، نظرًا لتأثير الجسيمات الواقية على تقليل فعالية الكلور [20]. ولهذا السبب، فإن كفاءة التطهير تكون أعلى عند انخفاض العكارة (1 ≥ NTU) ، وعند قيم pHأقل من 8، مع توفر الكلور الحر المتبقي بتركيز ≤ 1 ملجم / لتر لمدة لا تقل عن 30 دقيقة [21].



الشكل (1) تثبيط نشاط الكائنات الحية الدقيقة بإزالة مقدارها 2 لوغاريتم بإستخدام الكلور الحر المتبقي (White [19]).

الجدول (3) : قيم زمن التلامس (CT) لتثبيط نشاط الفيروسات بنسبة 99% في المياه الجوفية منخفضة العكارة أو المياه السطحية المرشحة

مدى الأس الهيدروجيني	قيم CT (ملجم / لتر * دقيقة)	
	0- 5° م	10°م
7.5-7.0	12	8
8.0-7.5	20	15
8.5-8.0	30	20
9.0-8.5	35	22

4. تأثير الكلور على البروتوزوا (الأوالي):

يُعد الكلور مطهراً محدود الكفاءة ضد البروتوزوا، حيث أظهرت الدراسات أن مقاومة بعض أنواع البروتوزوا للتطهير بالكلور قد تكون أعلى بمقدار 100مرة من الفيروسات المعوية و 1000 مرة من البكتيريا المعوية [22]. فعلى سبيل المثال، تُظهر خراجات الجارديا (Giardia lamblia) و الأنتاميبا هستولتيكا (Entamoeba histolytica) مقاومة كبيرة للتطهير، إذ تتطلب تركيزات تتراوح بين 2–3 ملجم/لتر من الكلور الحر المتبقي مع زمن تلامس أطول مقارنةً بالفيروسات والبكتيريا لتحقيق مستوى تثبيط بمقدار 99.9% (3 لوغاريتمات) [23] .

نموذج رياضي لتقدير قيم (CT) للجارديا؟

تم تطوير معادلة رياضية لتقدير قيم زمن التلامس (CT) ملجم/ لتر·دقيقة اللازمة لتثبيط خراجات الجارديا:

$$CT = 0.9847\ C^{0.1758}\, pH^{2.7519}\, temp^{-0.1467} \qquad (5)$$

حيث يمثل (C) تركيز المطهر المتبقي ملجم/لتر، و(pH) قيمة الأس الهيدروجيني، و (temp) درجة الحرارة °م [23] .

نشرت وكالة حماية البيئة الأمريكية (USEPA) جداول لقيم (CT) لتثبيط نشاط الجارديا. على سبيل المثال:

عند 25°م و pH = 8 ، يلزم 1–2.6 ملجم / لتر كلور حر مع زمن تلامس 54–65 دقيقة لتحقيق تثبيط بنسبة 99.9% (جدول 4).

عند 10 °م ، يزداد زمن التلامس إلى 162–194 دقيقة (جدول 5).

عند 0.5 °م ، يزداد إلى 304–368 دقيقة (جدول 6) [24] .

أما بالنسبة لخراجات الأنتاميبا هستولتيكا، فيمكن تثبيطها بنسبة 99.9% بتركيز 3.5 ملجم / لتر كلور حر ، pH = 7، وزمن تلامس 10 دقائق عند 25 °م [25] .

جدول (4) : قيم . زمن التلامس (CT) المقدرة لتثبيط نشاط خراجات الجيارديية بالكلور الحر عند 25 °م .

الكلور (ملجم / لتر)	الأس الهيدوجيني = 7			الأس الهيدوجيني = 8		
	التثبيط اللوغاريتمي			التثبيط اللوغاريتمي		
	1	2	3	1	2	3
1	12	25	37	18	36	54
1.6	13	27	40	19	39	58
2	14	27	41	20	41	61
2.6	15	29	44	22	46	65

جدول (5) قيم . زمن التلامس (CT) المقدرة لتثبيط نشاط خراجات الجياردية بالكلور الحر عند 10 °م.

الكلور (ملجم / لتر)	الأس الهيدوجيني = 7			الأس الهيدوجيني = 8		
	التثبيط اللوغاريتمي			التثبيط اللوغاريتمي		
	1	2	3	1	2	3
1	37	75	112	54	108	162
1.6	40	79	119	58	116	174
2	41	83	124	61	121	182
2.6	44	87	131	65	129	194

جدول (6) : قيم . زمن التلامس(CT) المقدرة لتثبيط نشاط خراجات الجيارديية بالكلور الحر عند 0.5 °م.

الكلور (ملجم / لتر)	الأس الهيدوجيني = 7			الأس الهيدوجيني = 8		
	التثبيط اللوغاريتمي			التثبيط اللوغاريتمي		
	1	2	3	1	2	3
1	70	140	210	101	203	304
1.6	75	151	226	110	219	329
2	79	157	236	115	231	346
2.6	84	168	252	123	245	368

4.1. الكريبتوسبوريديو (Cryptosporidium) :

على عكس الجارديا، تُظهر حويصلات الكريبتوسبوريديوم مقاومة عالية جداً للتطهير بالكلور. فقد بينت الدراسات أن الجرعات التقليدية للكلور في محطات المياه غير فعّالة عمليًا، إذ أن التثبيط لا يتجاوز 40% حتى عند قيم (CT) عالية (30–3600 ملجم / لتر·دقيقة) [26]. وتشير الأبحاث الحديثة إلى أن تحقيق تثبيط فعال يتطلب قيم (CT) ضخمة (3000–4000 ملجم / لتر·دقيقة) أو اعتماد آليات أخرى مثل الأوزون أو الأشعة فوق البنفسجية [27,28] . كما أن مؤشر جهد الأكسدة - الاختزال (Oxidation–Reduction Potential, ORP) قد تكون مؤشرًا أدق من قيم (CT) في تقدير كفاءة تثبيط الكريبتوسبوريديوم[29] .

5. تأثير الكلور على الديدان الطفيلية(Helminths):

بالمقارنة مع البكتيريا والفيروسات والأوالي، تُعتبر بيوض الديدان الطفيلية (Helminth eggs) الأكثر مقاومة لعمليات التطهير الكيميائي بالكلور. حيث تتميز هذه البيوض بجدار سميك متعدد الطبقات (بروتينية-كيتينية) يمنحها حماية عالية ضد المؤكسدات[30] .

كما أظهرت الدراسات الحديثة خلال السنوات الأخيرة تطورًا ملحوظًا في فهم آليات تثبيط بيوض الديدان الطفيلية وسبل تحسين كفاءة معالجتها. فقد بينت دراسة أُجريت عام 2020 أن تحقيق تعطيل فعّال لبيوض الأسكارس يتطلب تركيز كلور يتجاوز 50 ملجم/لتر مع زمن تلامس يمتد لعدة ساعات، وهو ما لا يتوافق مع التطبيقات العملية في محطات مياه الشرب [33].

كما أوضحت دراسة أخرى عام 2022 أن دمج الكلورة مع الأشعة فوق البنفسجية أو الأوزون يؤدي إلى خفض كبير في حيوية بيوض الأسكارس مقارنة باستخدام الكلور منفردًا [34].

وفي عام 2023، تم تقييم مؤشر جهد الأكسدة–الاختزال (Oxidation–Reduction Potential, ORP) كمقياس بديل لقيم(CT) ، وأثبت فعالية أكبر في التنبؤ بمستوى تثبيط بيوض الديدان في مياه الصرف المعالجة [35].

6. الخلاصة:

تناولت هذه الدراسة مراجعة كفاءة الكلور التطهيرية في القضاء على الكائنات الحية الدقيقة الممرضة في المياه، وأظهرت النتائج أن الكلور يُعد من أكثر المطهرات شيوعًا وفاعلية عند استخدامه بجرعات مناسبة وأزمنة تلامس كافية. إلا أن الجرعات المنخفضة قد لا تكون كافية للتخلص من بعض الكائنات الدقيقة، الأمر الذي يجعل من دمج عمليات المعالجة الأخرى مثل التخثير والترسيب والترشيح مع الكلورة خطوة ضرورية لتحسين كفاءة المعالجة وضمان جودة المياه المنتجة.

كما بينت الدراسة أن فعالية الكلورة تتأثر بعدة عوامل تشغيلية، من أهمها درجة الحرارة، وزمن التلامس، والرقم الهيدروجيني .(pH) إذ تزداد كفاءة التطهير بارتفاع درجة الحرارة وزيادة زمن التلامس، وكذلك عند انخفاض قيمة الرقم الهيدروجيني نتيجة زيادة نسبة حمض الهيبوكلوروس(HOCl) ، الذي يمتلك قدرة أعلى على اختراق الخلايا الميكروبية مقارنة بأيون الهيبوكلورايت.(OCl^{-})

وأوضحت الدراسة أن البكتيريا تختلف في حساسيتها تجاه الكلور، حيث تُعد العصيات المعوية (E. coli) أكثر حساسية مقارنة بالبكتيريا غير ذاتية التغذي(heterotrophic bacteria) ، في حين تُظهر البكتيريا الإيجابية لصبغة جرام (Gram-positive) مقاومة أعلى نسبيًا بسبب سماكة جدارها الخلوي. كما تختلف الفيروسات في درجة مقاومتها للكلور؛ إذ يمكن تثبيط بعض الفيروسات مثل فيروس الريو (Reovirus) خلال دقائق قليلة، بينما تحتاج بعض فيروسات شلل الأطفال (Polioviruses) إلى قيم (CT) مرتفعة لتحقيق المستوى نفسه من التثبيط.

وفيما يتعلق بالأوالي(Protozoa) ، أظهرت الدراسة أن بعض الأنواع مثل Giardia و Entamoeba histolyticaتكون حساسة نسبيًا للكلور عند استخدام جرعات مرتفعة، في حين يُظهر Cryptosporidium parvum مقاومة عالية جدًا للكلورة، مما يستلزم تطبيق تقنيات إضافية مثل الترشيح الدقيق أو الأشعة فوق البنفسجية لتحقيق إزالة فعالة. أما بيوض الديدان الطفيلية(Helminths) ، وخاصةAscaris lumbricoides ، فقد تبين أنها الأكثر مقاومة للكلور، حيث لا تتأثر بالجرعات التقليدية المستخدمة في محطات المعالجة حتى مع فترات التلامس الطويلة، الأمر الذي يستوجب الاعتماد على المعالجات الفيزيائية والبيولوجية كخطوات أساسية للتخلص منها، مع اعتبار الكلورة إجراءً مكملاً فقط.

وبصفة عامة، يمكن القول إن الكلور يُعد مطهرًا فعالًا لمعظم البكتيريا والفيروسات، بينما تقل فاعليته مع بعض أنواع البروتوزوا وتكاد تنعدم أمام بيوض الديدان الطفيلية. لذلك فإن الاعتماد على الكلورة وحدها لا يُمثل استراتيجية كافية لضمان مأمونية المياه، بل ينبغي استخدامها ضمن منظومة متكاملة من عمليات المعالجة الفيزيائية والبيولوجية والكيميائية لتحقيق مستويات عالية من الحماية الصحية العامة.

7. المراجع:

[1]. منظمة الصحة العالمية. (2005). المطهرات البديلة والمؤكسدات: دليل إرشادي. المكتب الإقليمي لشرق المتوسط، عمّان، الأردن.

[2]. Culp, W., Wesner, R., Culp, G. 1986. Handbook of Public Water Systems. Van Nostrand Reinhold, New York, NY.

[3]. Haas, C.N., Engelbrecht, R.S. 1980. Physiological Alterations of Vegetative Microorganisms Resulting from Aqueous Chlorination. J. Water Pollution Control Fed. 52(7):1976–1985.

[4]. Canh, V.D., Torii, S., Singhopon, T., Katayama, H. 2023. Inactivation of Coxsackievirus B5 by Free Chlorine under Conditions Relevant to Drinking Water Treatment. J. Water Health. 21(9):1318–1324.

[5]. Culp, G.L., Culp, R.L. 1974. New Concepts in Water Purification. Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY.

[6]. Scarpino, P.V., et al. 1972. A Comparative Study of the Inactivation of Viruses in Water by Chlorine. Water Research. 6:959.

[7]. Zhang, M., et al. 2024. Persistence and Free Chlorine Disinfection of Human Coronaviruses and Their Surrogates in Water. Appl. Environ. Microbiol. doi:10.1128/AEM.00055-24.

[8]. Clarke, N.A., et al. 1962. Human Enteric Viruses in Water, Source, Survival, and Removability. International Conference on Water Pollution Research, Landar.

[9]. Chick, H. 1908. An Investigation of Laws of Disinfection. Journal of Hygiene. 8:92–158.

[10]. World Health Organization (WHO). 2022. Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed. Geneva: WHO.

[11]. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). 2023. Chlorine and Drinking Water. Available at: www.cdc.gov/... (Accessed: 2025).

[12]. Bartrand, T., Hunter, P.R. 2020. Chlorination Efficacy Against Spore-forming Bacteria in Water Systems. J. Water Health. 18(5):678–690.

[13]. Wang, H., Li, X., Zhang, Y. 2021. Resistance of Gram-positive Bacteria to Chlorine Disinfection: Mechanisms and Implications. Water Res. 197:117073.

[14]. Xu, J., Chen, Z., Zhao, Y. 2022. Survival of Acid-fast Bacteria under Chlorination Stress in Drinking Water Systems. Sci. Total Environ. 807:150777.

[15]. Li, D., Gao, Y., Chen, M. 2023. Impact of Natural Organic Matter on Chlorine Disinfection Kinetics of Bacteria in Drinking Water. Water Res. 235:119608.

[16]. Zhang, J., Zhou, Q., Wang, J. 2024. Chlorine Disinfection Efficiency and Bacterial Regrowth in Distribution Systems: Recent Advances and Challenges. Environ. Int. 180:108198.

[17]. Liu, W., et al. 2019. Chlorine Disinfection Kinetics of Enteric Viruses: Impact of Temperature and pH. Water Res. 157:108–116.

[18]. American Water Works Association (AWWA). 1979. Virus Inactivation by Free Chlorine Under Varying Conditions. J. Am. Water Works Assoc. 71(9):454–460.

[19]. White, G.C. 1999. Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants, 5th ed. New York: Wiley.

[20]. Sobsey, M.D., Bartrand, T.A. 2021. Resistance of Enteric Viruses to Chlorine Disinfection in the Presence of Organic Matter. Environ. Sci. Technol. 55(3):1421–1430.

[21]. Kitajima, M., Gerba, C.P. 2023. Virus Removal and Inactivation in Drinking Water Treatment: Recent Advances and Challenges. Water Res. 235:119635.

[22]. Hoff, J.C., et al. 1984. Relative Resistance of Protozoan Cysts to Disinfection by Chlorine. Appl. Environ. Microbiol. 48(5):947–951.

[23]. Clark, R.M., Read, E.J., Hoff, J.C. 1989. A Mathematical Model for Giardia Cyst Inactivation by Chlorine. J. Environ. Eng. 115(1):80–90.

[24]. USEPA. 1999. Disinfection Profiling and Benchmarking Guidance Manual. EPA 815-R-99-013. Washington, DC: US Environmental Protection Agency.

[25]. Chang, S.L. 1982. Resistance of Entamoeba histolytica Cysts to Chlorine Disinfection. Am. J. Public Health. 72(1):57–60.

[26]. Finch, G.R., et al. 1994. Cryptosporidium and Chlorine Disinfection. J. Am. Water Works Assoc. 86(9):95–104.

[27]. Betancourt, W.Q., Rose, J.B. 2020. Drinking Water Treatment Processes for Removal of Cryptosporidium and Giardia. Water Res. 176:115718.

[28]. Efstratiou, A., Ongerth, J.E., Karanis, P. 2021. Waterborne Transmission of Protozoan Parasites: Review of Worldwide Outbreaks—An Update 2011–2016. Water Res. 187:116431.

[29]. King, B.J., Monis, P.T. 2022. Critical Control of Cryptosporidium from Catchment to Consumer: A Risk Management Framework for Water Supply. Water Res. 209:117905.

[30]. Jiménez, B. 2007. Helminth Ova Control in Wastewater and Sludge for Agricultural Reuse. Water Sci. Technol. 55(1–2):485–492.

[31]. Ayres, R.M., Mara, D.D. 1996. Analysis of Wastewater for Use in Agriculture: A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques. WHO, Geneva.

[32]. WHO. 2006. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, Vol. 4. Geneva: World Health Organization.

[33]. Pecson, B.M., Barrios, J.A., Johnson, D.R., Nelson, K.L. 2020. Inactivation of Ascaris suum Eggs by Free Chlorine and UV Radiation. Water Res. 170:115318.

[34]. Khurana, S., Chaudhary, R., et al. 2022. Synergistic Effects of Chlorine and UV on Helminth Egg Inactivation in Wastewater. J. Water Health. 20(5):715–727.

[35]. Lee, E., Park, J., et al. 2023. Oxidation-Reduction Potential as an Alternative Indicator for Helminth Egg Inactivation in Treated Wastewater. Environ. Sci. Technol. 57(12):4561–4572.