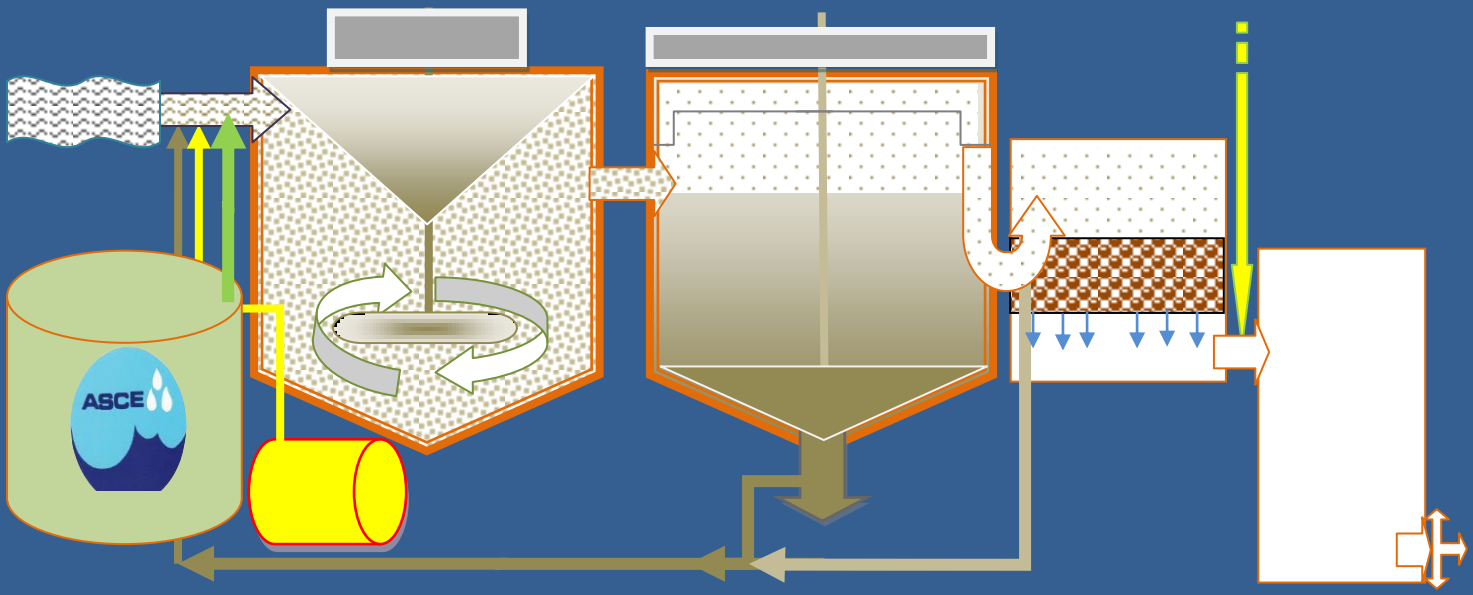
تكنولوجيا معالجة مياه الشرب
(الترويب - التطهير)



دكتور / نبيل أحمد عبد الله
مدير البحوث والتطوير - شركة الشبة المصرية

تكنولوجيا معالجة مياه الشرب

(الترويب - التطهير)

دكتور / نبيل أحمد عبد الله

مدير البحوث والتطوير - شركة الشبة المصرية

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الرَّحْمَنُ (١) عَلَّمَ الْقُرْآنَ (٢) خَلَقَ الْإِنْسَانَ (٣) عَلَّمَهُ الْبَيَانَ (٤) الشَّمْسُ وَالْقَمَرُ بِحُسْبَانٍ (٥) وَالنَّجْمُ وَالشَّجَرُ يَسْجُدَانِ (٦) وَالسَّمَاءَ رَفَعَهَا وَوَضَعَ الْمِيزَانَ (٧) أَلَّا تَطْغَوْا فِي الْمِيزَانِ (٨) وَأَقِيمُوا الْوَزْنَ بِالْقِسْطِ وَلَا تُخْسِرُوا الْمِيزَانَ (٩) وَالْأَرْضَ وَضَعَهَا لِلْأَنَامِ (١٠) فِيهَا فَاكِهَةٌ وَالنَّخْلُ ذَاتُ الْأَكْمَامِ (١١) وَالْحَبُّ ذُو الْعَصْفِ وَالرَّيْحَانُ (١٢) فَبِأَيِّ آلَاءِ رَبِّكُمَا تُكَذِّبَانِ (١٣)

[الرَّحْمَنُ، الآيات: ١- ١٣]

صدق الله العظيم

الافتتاحية

الماء؛ هو بمثابة الروح للكائنات الحية جميعها في الأرض، وحيث أن مصادر المياه العذبة المتاحة محدودة، ويتناقص نصيب الفرد بصفة مستمرة، فتوجب علينا الاعتناء به وتنميته حتى تستمر الحياة وتتطور، ولا ننسى حقوق الأجيال القادمة في تلك الثروة المهدرة المهددة بالندرة والتلوث معًا.

والحياة تزدهر وتتزين بالماء العذب، وتعلو به الأمم وترتقي، وتقوم عليه الحضارات، وتنهار وتندثر من فقده أو تلوثه حضارات، ويشهد التاريخ على مَرِّ العصور نشأة الحضارات على ضفاف الأنهار، وانهيار أخرى بسبب القحط أو الجدب أو التلوث. والمجاعات التي تشهدها بعض البلدان في إفريقيا شاهدُ حق ودليلٌ قاطعٌ على تلك الحقيقة.

هذا الكتاب؛ يتحدث عن مفهوم نوعية الماء وكيف تتأثر تلك النوعية بالإطار الحيوي المحيط بمصادره، وكيف تُنقي بالترويب وكيف تطهر بالمطهرات. وهذه المعالجة تمثل خطوة هامة في محطات المياه التي تنقي المياه السطحية، والتي إذا أُحسن إدارتها لتحققت نوعية مياه عالية الجودة.

هذا الكتاب؛ ضروري لمن يهتم بصناعة المياه. وقد تبنت إعداده وطباعته شركة الشَّبَّة المصرية، ليربط ما بين إنتاج المادة المروبة والاستخدام الميداني بمحطات تنقية المياه لتحقيق أداء أفضل.

عادل حسني مصطفى

رئيس مجلس الادارة والعضو المنتدب
شركة الشبة المصرية

تكنولوجيا معالجة مياه الشرب
(الترويب - التطهير)

شركة الشبة المصرية

اعداد ودراسة للدكتور / نبيل أحمد عبد الله

رقم الإيداع بهيئة دار الكتب والوثائق القومية: ١٥٩٥٥ /٢٠١٣

ترقيم دولي مسلسل للكتاب: ISBN : 978-977-90-0864-6

تصميم وتنفيذ الرسومات الداخلية وصورة الغلاف والاخراج: د . نبيل أحمد عبد الله

جميع الحقوق محفوظة لشركة الشبة المصرية

رقم الهاتف: ٢٢٩٠٩٧١٦ -٢٢٩٠٦٤٢٥

عنوان المقرالرئيسي: ١٥ (أ) شارع الأهرام – روكسي – القاهرة

عنوان المصانع: أبو زعبل - القليوبية

الطبعة الثانية

١٤٣٧هـ ـ ٢٠١٥ م

هذا الكتاب غير مخصص للبيع

مقدمة

قال تعالى: أَوَلَمْ يَرَ الَّذِينَ كَفَرُوا أَنَّ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضَ كَانَتَا رَتْقًا فَفَتَقْنَاهُمَا وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ (٣٠)[الانبياء، الآية: ٣٠].

هيأ الله تبارك وتعالى الماء ليكون صالحًا للشرب قال تعالى: وَجَعَلْنَا فِيهَا رَوَاسِيَ شَامِخَاتٍ وَأَسْقَيْنَاكُمْ مَاءً فُرَاتًا (٢٧)[المرسلات، الآية: ٢٧]، والماء ضروري لنظافة الإنسان وتطهره لأداء الصلاة ولإعمار الأرض ولسقايته وسقاية أنعامه، قال تعالى: وَهُوَ الَّذِي أَرْسَلَ الرِّيَاحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً طَهُورًا (٤٨) لِنُحْيِيَ بِهِ بَلْدَةً مَيْتًا وَنُسْقِيَهُ مِمَّا خَلَقْنَا أَنْعَامًا وَأَنَاسِيَّ كَثِيرًا (٤٩)[الفرقان، الآيتان: ٤٨، ٤٩]. وقال تعالى: إِذْ يُغَشِّيكُمُ النُّعَاسَ أَمَنَةً مِنْهُ وَيُنَزِّلُ عَلَيْكُمْ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً لِيُطَهِّرَكُمْ بِهِ وَيُذْهِبَ عَنْكُمْ رِجْزَ الشَّيْطَانِ وَلِيَرْبِطَ عَلَى قُلُوبِكُمْ وَيُثَبِّتَ بِهِ الْأَقْدَامَ (١١)[الانفال، الآية: ١١].

وقال تعالى: وَهُوَ الَّذِي مَرَجَ الْبَحْرَيْنِ هَذَا عَذْبٌ فُرَاتٌ وَهَذَا مِلْحٌ أُجَاجٌ وَجَعَلَ بَيْنَهُمَا بَرْزَخًا وَحِجْرًا مَحْجُورًا (٥٣) وَهُوَ الَّذِي خَلَقَ مِنَ الْمَاءِ بَشَرًا فَجَعَلَهُ نَسَبًا وَصِهْرًا وَكَانَ رَبُّكَ قَدِيرًا (٥٤) [الفرقان، الآيتان: ٥٣، ٥٤].

ويُنزل الله الماء فيه الخير والبركة التي تحمل النماء والازدهار فقال تعالى: وَنَزَّلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً مُبَارَكًا فَأَنْبَتْنَا بِهِ جَنَّاتٍ وَحَبَّ الْحَصِيدِ (٩) [ق، الآية: ٩].

ومن دلائل قدرة الله عز وجل؛ أن وجود الماء يعني الحياة، فإحياء الأرض يأتي من الماء فتخرج به الزرع الذي يقتات منه الإنسان والحيوان فقال تعالى: وَاللَّهُ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَحْيَا بِهِ الْأَرْضَ بَعْدَ مَوْتِهَا إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَةً لِقَوْمٍ يَسْمَعُونَ (٦٥)[النحل، الآية: ٦٥].

وقال تعالى: وَمِنْ آيَاتِهِ أَنَّكَ تَرَى الْأَرْضَ خَاشِعَةً فَإِذَا أَنْزَلْنَا عَلَيْهَا الْمَاءَ اهْتَزَّتْ وَرَبَتْ إِنَّ الَّذِي أَحْيَاهَا لَمُحْيِي الْمَوْتَى إِنَّهُ عَلَى كُلِّ شَيْءٍ قَدِيرٌ (٣٩) [فصلت، الآية: ٣٩]، وقال تعالى: وَلَمْ يَرَوْا أَنَّا نَسُوقُ الْمَاءَ إِلَى الْأَرْضِ الْجُرُزِ فَنُخْرِجُ بِهِ زَرْعًا تَأْكُلُ مِنْهُ أَنْعَامُهُمْ وَأَنْفُسُهُمْ أَفَلَا يُبْصِرُونَ (٢٧)[السجدة، الآية: ٢٧].

وقد شبَّه الله تبارك وتعالى الحياة الدنيا كماء، لما للماء من أهمية عظيمة في حياة الإنسان؛ حيث قال تعالى: إِنَّمَا مَثَلُ الْحَيَاةِ الدُّنْيَا كَمَاءٍ أَنْزَلْنَاهُ مِنَ السَّمَاءِ فَاخْتَلَطَ بِهِ نَبَاتُ الْأَرْضِ مِمَّا يَأْكُلُ النَّاسُ وَالْأَنْعَامُ حَتَّى إِذَا أَخَذَتِ الْأَرْضُ زُخْرُفَهَا وَازَّيَّنَتْ وَظَنَّ أَهْلُهَا أَنَّهُمْ قَادِرُونَ عَلَيْهَا أَتَاهَا أَمْرُنَا لَيْلًا أَوْ نَهَارًا فَجَعَلْنَاهَا حَصِيدًا كَأَنْ لَمْ تَغْنَ بِالْأَمْسِ كَذَلِكَ نُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ (٢٤) [يونس، الآية: ٢٤].

وينعم الله تبارك وتعالى على من استقام على هديه وسننه بفيضٍ وفيرٍ من الماء، فقال تعالى: وَأَنْ لَوِ اسْتَقَامُوا عَلَى الطَّرِيقَةِ لَأَسْقَيْنَاهُمْ مَاءً غَدَقًا (١٦)[الجن، الآية: ١٦].

هذا هو الماء الذي يسَّره الله جلَّ في عُلاه؛ لتستمر الحياة وتزدهر، وقد بشر الله المؤمنين من عباده ووعدهم بدخول جنات تجري من تحتها الأنهار. قال تعالى: وَبَشِّرِ الَّذِينَ آمَنُوا وَعَمِلُوا الصَّالِحَاتِ أَنَّ لَهُمْ جَنَّاتٍ تَجْرِي مِنْ تَحْتِهَا الْأَنْهَارُ كُلَّمَا رُزِقُوا مِنْهَا مِنْ ثَمَرَةٍ رِزْقًا قَالُوا هَذَا الَّذِي رُزِقْنَا مِنْ قَبْلُ وَأُتُوا بِهِ مُتَشَابِهًا وَلَهُمْ فِيهَا أَزْوَاجٌ مُطَهَّرَةٌ وَهُمْ فِيهَا خَالِدُونَ (٢٥) [البقرة، الآية: ٢٥].

قال تعالى: مَثَلُ الْجَنَّةِ الَّتِي وُعِدَ الْمُتَّقُونَ فِيهَا أَنْهَارٌ مِنْ مَاءٍ غَيْرِ آسِنٍ وَأَنْهَارٌ مِنْ لَبَنٍ لَمْ يَتَغَيَّرْ طَعْمُهُ وَأَنْهَارٌ مِنْ خَمْرٍ لَذَّةٍ لِلشَّارِبِينَ وَأَنْهَارٌ مِنْ عَسَلٍ مُصَفًّى وَلَهُمْ فِيهَا مِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ وَمَغْفِرَةٌ مِنْ رَبِّهِمْ كَمَنْ هُوَ خَالِدٌ فِي النَّارِ وَسُقُوا مَاءً حَمِيمًا فَقَطَّعَ أَمْعَاءَهُمْ (١٥)[محمد، الآية: ١٥].

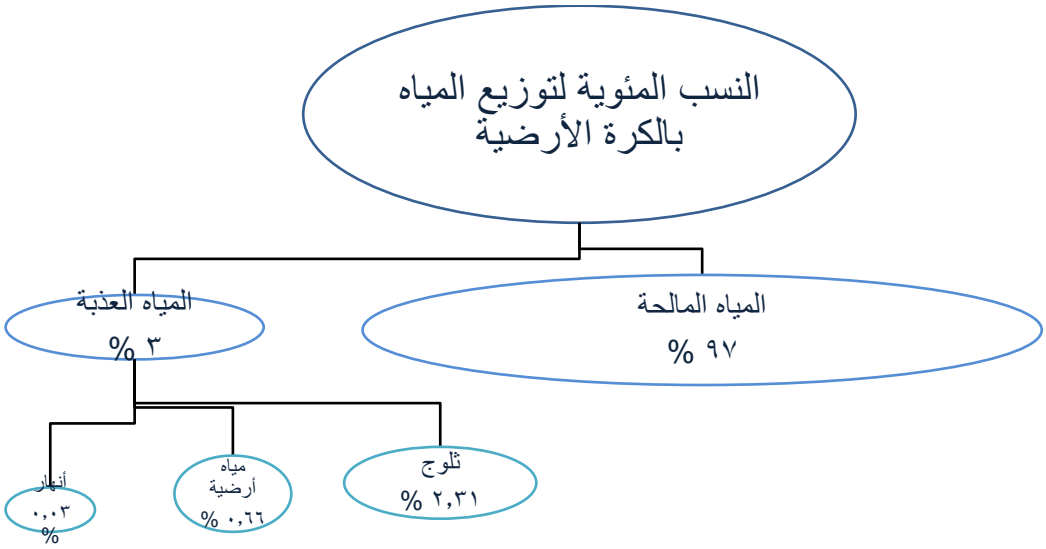
وللماء خصائص طبيعية عجيبة؛ فهو مذيب جيد ، وهذا جعله يذيب العديد من الأملاح الهامة التي يستفيد منها الإنسان مثل: أملاح الكالسيوم والماغنسيوم والصوديوم والبوتاسيوم والكلوريد والفلوريد واليود، والماء له القدرة على احتواء العديد من الأملاح والعناصر الهامة لصحة الإنسان، وللماء القدرة على الأذابة النسبية لبعض الغازات، مثل: الأكسجين وثاني أكسيد الكربون، وهذا جعل من الماء وسطا حيويًّا مهمًّا للإنسان والحيوان والنبات. وعلى الإنسان إدراك أهمية الحفاظ على الماء من الفقد أو التلوث.

وحينما يتبخر الماء؛ فيعطى دفئًا للغلاف الجوي، وفي الوقت نفسه؛ يضفي تلطيفا للجو، ومع زيادة معدل البخر تزداد الرطوبة التي تعلق في الجو، مما يعطي الشعور بالحر نتيجة تشبع الهواء بالرطوبة.

يستفيد الإنسان من الماء في إنتاج الطاقة، فيحوله إلى بخار تدار به مولدات الكهرباء، وقد يُستخدم الماء في التبريد، وفي إنتاج الثلج لحفظ الأغذية. والماء المنهمر من أعالي الأنهار مصدرا للطاقة المتجددة فهو يحمل طاقة حركية تتحول إلي طاقة كهربائية من خلال مولدات الكهرباء.

تتم التفاعلات الحيوية وانتقال الصور المختلفة للطاقة داخل الخلايا الحية في الوسط المائي. والماء هو في ذاته يمكن أن يتحول إلى طاقة، فجزئ الماء يتكون من ذرة الأكسجين وذرتين من الهيدروجين. والهيدروجين في صورته العنصرية يشتعل، والأكسجين في صورته العنصرية يساعد على الاشتعال، وبالتالي إذا حدث انفصال لكلا المكونين وتكون غاز الهيدروجين والأكسجين لحدث الاشتعال.

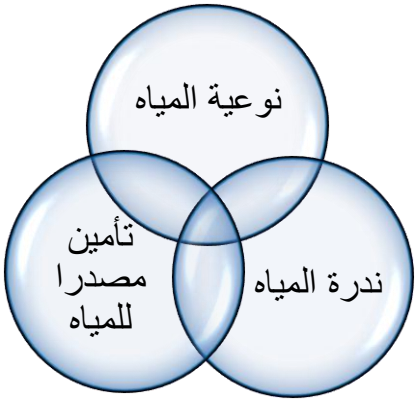
إذا نظرنا إلى المياه الموجودة على سطح الأرض لوجدنا أن ٧٤% من سطح الأرض مغطى بالمياه. وتشكل المياه العذبة نسبة ضئيلة إذا ما قورنت بالمياه المالحة المتمثلة في البحار والمحيطات، فتبلغ نسبة المياه العذبة حوالي ٣% من إجمالي المياه على سطح الأرض، أي أن ٩٧% تمثل المياه المالحة. وإذا أردنا تصنيف المياه العذبة بحسب موقعها ومدي توفرها، لوجدنا أن ٢,٣% مياه عذبة متجمدة في قطبي الكرة الأرضية وهذه المياه غير متاحة وتشكل حوالي ٧٧% من إجمالي المياه العذبة، بينما تشكل المياه العذبة بالأنهار والمياه الأرضية العذبة حوالي ٠,٦٦% أي حوالي ٢٢% من إجمالي المياه العذبة علي سطح الأرض، أما نسبة المياه العذبة المتواجدة بالأنهار والبحيرات العذبة وهي المتاحة للاستخدام وتشكل حوالي ٠,٠٣% تقريباً. وهذه النسبة تعادل ١% من المياه العذبة الإجمالية[١، ٢، ٣].



وإذا تتبعنا توزيع المياه العذبة على سطح الأرض؛ لوجدناه غير متساوٍ، فهناك نُدرة في أماكن كثيرة ووفرة في أماكن قليلة، وكما نعلم أن نُدرة المياه العذبة تؤدى إلى انتشار الأمراض الخطيرة؛ حيث أن هناك ارتباطاً وثيقاً بين تواجد المياه العذبة الصالحة للاستخدام؛ وبين الصحة العامة للإنسان. وتشير التقديرات الى أن ٨٠% من الأمراض وأكثر من ثلث حالات الوفيات في البلاد النامية ترجع إلى عدم تواجد مياه نقية صالحة للاستخدام. وقد تنتقل العدوى البكتيرية أو الفيروسية أو البروتوزوية من خلال شرب مياه ملوثة. ويعتبر الإسهال من أعراض الأمراض الناتجة عن التلوث والمسببة لوفاة الأطفال في البلدان النامية.

وتصنف تلك الأمراض إلى أربعة تصنيفات اعتمادًا على اعتبارات وبائية:

- **أمراض منقولة مباشرة بالماء؛** وتحدث الإصابة من خلال شرب مياه ملوثة بملوث بيولوجي أو كيميائي، ومن أمثلة تلك الأمراض: الكوليرا وحمَّى التيفؤيد والتسمم الدموي والمعوي. بالإضافة إلى أن شرب مياه ملوثة بمستويات منخفضة من ملوث معين من الملوثات الكيميائية؛ كالمبيدات؛ قد تؤدي إلى تأثيرات صحية خطيرة نتيجة تراكم الملوث داخل الجسم.



- **أمراض ناتجة عن عدم توفر مياه نقية؛** للنظافة العامة وتحدث مثل هذه النوعية من الأمراض في المجتمعات التي تفتقر الى المياه النقية، وتفتقد وجود صرف صحي. ويؤدي هذا إلى الإصابة بأمراض العيون وأمراض الجلد.

- **أمراض مصدرها الأساسي المياه؛** حيث يقضي المسبب المرضي جزءًا من حياته الأولى في الماء، أو معتمدًا على كائنات مائية من أجل إتمام دورة حياته، مثل البلهارسيا.

- **أمراض ناشئة عن ناقلات الأمراض؛** (الحشرات) وهذه الأمراض ليس لها علاقة مباشرة مع الماء؛ حيث لا تأتي الإصابة من الماء ولكن تأتي من ناقل يقضي فترة من حياته في الماء مثل البعوض الذي ينقل الملاريا.

وعادة ما تكون الأمراض المنقولة بالمياه حادة، أي يظهر تأثيرها بعد فترات قصيرة وأكثرها يتميز بأعراض معوية مثل الإسهال وآلام البطن. ومن أمثلة المسببات المرضية السلمونيلا والشيجيلا (تظهر أعراض الإصابة بهما بعد فترة أقل من يومين)- والفيروس الكبدي (أ) والجيارديا والكريبتوسبوريديوم (تظهر أعراض الإصابة بهما بعد أسابيع من الإصابة).

نحن في الوقت الراهن؛ بصدد مواجهة تناقص مستمر في نصيب الفرد من الموارد المائية العذبة، وفي الوقت نفسه؛ هناك العديد من السلوكيات في استخدام المياه تؤدي إلي هدر الكثير منها، سواء من خلال النمط الاستهلاكي أو الاستخدام غير النفعي المتمثل في ري الحدائق وملاعب الجلف. وتزداد المشكلة تفاقمًا مع تلويث المياه الميسرة المحدودة بإلقاء المخلفات السائلة والصلبة في مصادرها، وهذا يهدد من صلاحية تلك المياه وبالتالي الأحياء المائية بها، كما إن هناك فاقدًا كبيرًا في المياه المعالجة

عن طريق التسريب من الخطوط الناقلة للمياه. ومن هنا؛ فنحن أمام مواجهة تحديات ثلاثة متداخلة وهي: **ندرة المتاح من المياه، تدهور نوعية المتاح للشرب، وتأمين الإمداد بالمياه العذبة.**

- **ندرة المياه**: تعاني المنطقة العربية من ندرة المياه وذلك لوقوعها في المنطقة الجافة وشبه الجافة من الكرة الأرضية، وهناك٧٠ % من سكان العالم يعانون من الندرة، ومع الزيادة السكانية تتفاقم تلك المشكلة كنتيجة منطقية لعدم التوازن بين الاحتياجات والمتاح. تشير الدراسات الى أن نصف سكان العالم لن يكون لديهم ما يكفي من المياه لتلبية احتياجاتهم بحلول عام ٢٠٢٥.

هناك مليار شخص حاليا لا يحصلون على مياه نظيفة.[٤]

- **تدهور وتدني نوعية المياه**: يعمل التدهور والتدني في نوعية المياه على زيادة حدة مشكلة ندرة المياه. وهذا التدهور في نوعية المياه العذبة هو حصاد ما غرسته يد الإنسان من الملوثات في جميع أرجاء الوسط الحيوي الذي يعيش فيه.
- **تأمين الاحتياج للمياه**: وقد تنشأ الصراعات الإقليمية في المستقبل وخاصة في البلدان النامية؛ لتأمين احتياجاتها من الماء.

إن السياسات المرتقبة والمأمولة يجب إن تتسم بالواقعية والجدية والنضج في أدارة وتنمية الموارد المائية العذبة المتاحة للاستفادة منها وتقليل الفاقد ودرء المفاسد ومراقبة الاستهلاك والتوجيه والتوعية والتثقيف، وقد حضت الأديان السماوية على الترشيد والاقتصاد.

أن قضية توفير مياه عذبة نقية صالحة للاستخدام؛ هي من أهم القضايا البيئية؛ حيث أن النمو السكاني وتزايد أنشطة التحضر يعملان على زيادة الطلب على المياه، وهذا يجعل الدورة المائية الطبيعية لتنقية المياه غير قادرة على الوفاء بالاحتياجات المتزايدة من المياه العذبة، وهذا يحتم علينا إعطاء أهمية قصوى لمعالجة متقدمة لمياه الصرف الصحي لحماية مصادر الإمداد بالمياه العذبة من التلوث، وإعادة استخدام هذا الماء المعالج جيدًا في الزراعة والصناعة.

ونأتي إلى قضية تلوث المياه؛ فالمشروعات التي تجرى على الأنهار مثل بناء السدود وإنشاء بحيرات تخزين المياه خلف السدود بهدف التوسع في الإنتاج الزراعي وإنتاج الطاقة، تؤثر تأثيرا سلبيا على نوعية المياه، وخاصة تلك المرتبطة بالرواسب الطينية والنباتات المائية. وهناك العديد من المصادر الملوثة للمياه السطحية والتي تأتي من صرف المخلفات السائلة للمناطق السكنية إلى تلك المياه، فضلا عن وصول مياه الصرف الزراعي المفعمة بالمبيدات والأسمدة وغيرها من المركبات العضوية وغير العضوية إلى مصادر المياه العذبة. إن كل هذا الكم الكبير المتفاوت في كمِّه ونوعه من الشوائب يُغير من الخصائص البيئية الطبيعية للمياه.

هناك محوران مهمَّان لقضية تلوث مصادر المياه العذبة

المحور الأول: يتعلق بنوعية الملوثات فأغلب المواد الملوثة هي مركبات نيتروجينية وفوسفاتية وعضوية تزيد من خصوبة غير مطلوبة للبيئة المائية، وهذه الخصوبة تجعل المياه العذبة السطحية غنية وثرية بالمواد المغذية للطحالب وغيرها من نباتات مائية على نحو يستهلك الأكسجين الذائب في المياه ويخل بالتوازن الطبيعي المتعلق بذوبانية الأكسجين واستهلاكه، عندئذ تصبح بيئة المياه غير صالحة للأحياء المائية المهمة مثل الأسماك.

المحور الثاني: يتعلق بالسُّمية الناشئة عن هذه الملوثات التي تضر ضررًا بالغًا بالكائنات المائية وبطبيعة الحال ينتقل الضرر إلى الإنسان كمستهلك للمياه وللمأكولات المائية. و نحن نجد أمراضًا عضال ظهرت من جراء تلوث البيئة المائية. لذلك كان لا بُد من إدارة جيدة لمصادر المياه لتوفير مياه صحية تتحقق فيها الخصائص الطبيعية والتركيبية المطابقة لمعايير الجودة العالمية، وذلك من خلال معالجة للمياه السطحية والمياه الأرضية في محطات تنقية تخضع لاشتراطات محكمة ودقيقة.

هناك ثلاثة مصادر لإنتاج مياه الشرب، وهى: الأنهار و خزانات المياه تحت السطحية (مياه أرضية) وتحلية مياه البحر. وتُعد المياه الأرضية هي أفضل أنواع المياه؛ نظرًا لكونها مرشحة طبيعيًا ومصانة من عوامل التلوث السطحي كما أنها تكون خالية أو محتوية على نسب قليلة من البكتريا و المواد العضوية. وتعتبر المياه العذبة السطحية هي الأكثر استغلالا، وتوفر إنتاج مياه شرب أرخص من أي مصدر آخر.

تعتمد مصر على نهر النيل اعتمادا رئيسيًا في توفير مياه الشرب، فيشكل هذا المصدر أكثر من ٨٣ % من الاحتياج للمياه والنسبة الباقية تؤخذ من مصادر أخري مثل المياه الأرضية (١٦ %)

والمياه المحلاة (١%). وتعتمد محطات تنقية المياه السطحية (مياه الأنهار) علي الأساليب التقليدية في التنقية (الترويب والترسيب والترشيح والتطهير).

إن التعامل مع مصادر المياه؛ يتطلب التعُّرف على العوامل التي تؤثر سلبًا أو إيجابًا على نوعية المياه بها، ووسائل التحكم فيها لتقليل أو إزالة التأثيرات السلبية كلما أمكن. ومن الأهمية بمكان مراقبة أنشطة التنمية الحضرية والزراعية لأنه قد ينشأ عنها تهديدات تؤثر على نوعية المياه.

وقد تم إعداد هذا الكتاب؛ بهدف نقل المعرفة للأجيال لمواجهة تحديات المستقبل التي تتمثل أحدها في حماية ثروتنا المائية والبيئية من الملوثات حتى تتحقق التنمية المتواصلة.

يتألف هذا الكتاب من أربعة فصول، يتناول الفصل الأول الإجابة علي التساؤل: لماذا نعالج مياه الشرب؟ وقد تعرضت الإجابة إلي الإشارة إلي الدورة الطبيعية للمياه وكيف تتأثر تلك الدورة بالمؤثرات المختلفة وما تحدثه من تغيير في البنود الهامة التي تتعلق بالنوعية، فزيادة مركبات النيتروجين والفوسفور في المياه تؤدي إلي نمو كثيف للكائنات الحية المائية، مما يعمل علي فساد نوعية المياه. وهذا يستوجب معالجتها قبل أن يتناولها الإنسان لتكون خالية من الملوثات، وبالتالي تكون آمنة في استخدامها ويستفاد منها.
ونظراً للدور الهام والفاعل لعملية الترويب والترشيح في التخلص من البروتوزوا الطفيلية فقد اشرت الى ازالة طفيليات كريبتو سبوريديوم وجياردیا في عنوان مستقل.

يشتمل الفصل الثاني على تعريف لعملية الترويب باعتبارها محور عملية المعالجة بالمروبات، وتهدف إلى التخلص من الشوائب بأنواعها المختلفة العضوية والمعدنية والبيولوجية. ويتناول هذا الفصل أيضا تعريف للملوثات ونشأتها وخصائصها، وما تسببه من عكارة ولون ورائحة، وما ينشأ عنها من مواد عضوية جديدة ذات تأثيرات جانبية نتيجة تفاعلها مع مواد التطهير المستخدمة وتأثيرها على جرعات المخثر المستخدم، وقد احتوى الفصل على إشارة إلى قياس الامتصاص للأشعة فوق البنفسجية الذي يعطى دلالة عن مدي احتواء الماء على مواد عضوية؛ مثل الأحماض الدبالية، وهذا يفيد في معرفة مدى تحقيق الفعالية في إزالة المواد العضوية الطبيعية أثناء المعالجة. وقد استعنت بمصفوفة وكالة حماية البيئة الأمريكية التي تتعلق بالنواتج الثانوية لعملية التطهير، والتي توضح الرؤية للقائمين على المعالجة لانتهاج الإستراتجية الأمثل لمعالجة أفضل.

كما يحتوى الفصل على بعض النظريات العلمية التي تقرب المفاهيم، وشرح لطبيعة المواد الغروية التي تشكل أهمية كبيرة في كونها جسيمات تأخذ حالة ثبات في الماء وتسبب عكارة يصعب ترسيبها بصورة ذاتية طبيعية (بالجاذبية الأرضية)، وتناول الفصل أيضًا تفسيرًا لأسباب حالة الثبات للعكارة، مع ذكر آليات إزالة الشوائب في إطار علمي مبسط.

وفي هذا الفصل؛ توضيح تفصيلي لآليات عملية الترويب، مع إعطاء لمحة عن صور التحلل المائي لمروب كبريتات الالومونيوم، وتأثير الرقم الهيدروجيني والقلوية والخلط الجيد في تحقيق ترويب جيد لضمان التخلص من الشوائب بجرعة اقتصادية من المروب، بما يكفل اقل قدر من الالومونيوم المتبقي و خصوصًا العالق، وقد تعرَّض الفصل لمروب الحديد باعتباره يعمل بنفس آلية مروب الالومونيوم. وفي سياق هذا الكتاب سوف تستخدم كلمة الترويب والتخثير لتحمل نفس المعني، وكذلك كلمة مروب أو مخثر.

وقد تم تفسير لنتائج عمليات ترويب أجريت بأجهزة المحاكاة " اختبار الجار"، وتوضيح دور كبريتات الالومونيوم في التخلص من اللون (الناشئ عن المواد العضوية الطبيعية) والعناصر الثقيلة.

وقد شرح الفصل الثالث؛ عملية التطهير؛ باعتبارها من العمليات المهمة في المعالجة التقليدية لمياه الشرب، وقد ركز الفصل على مفهوم الأكسدة على اعتبار أن التطهير يتم من خلال آليات الأكسدة التي يقوم بها المطهر المستخدم مثل الكلور وهو من العوامل المؤكسدة القوية. واستعرض الفصل بدائل الكلور بصورة موجزة مثل: الأوزون وثاني أكسيد الكلور والأشعة فوق البنفسجية.

ويُعتبر الأوزون والأشعة فوق البنفسجية من البدائل الواعدة في المستقبل القريب نظراً لفعاليتها العالية واستخدامها بكثرة في الدول المتقدمة. وتركز الاهتمام في هذا الفصل على الأسس الكيميائية للتطهير وتفسير ما يحدث في عمليات الأكسدة والاختزال وما يحدث من تفاعلات بين المطهر وبعض المركبات الموجودة في المياه الخام وتأثير بعض العوامل الهامة على كفاءة التطهير مثل درجة حرارة الماء ورقمها الهيدروجيني ونوعية المطهر المستخدم.

وقد أكد الفصل؛ على أن تواجد الأمونيا في المياه المعالجة يصاحبه استهلاك متزايد من الكلور للوصول الى تحقيق كلور حر. وبالفصل لمحة عن تأثير الكلور على بعض المركبات التي قد تتواجد بالمياه مثل: مركبات الحديد والمنجنيز والمركبات المسببة للون والمذاق والرائحة.

وقد أوضح الفصل الرابع؛ الإدارة البيئية للمخلفات المتولدة عن المعالجة، وقد ركز هذا الفصل على الجانب الاقتصادي وأوجه الاستفادة من المخلفات لتدر عائدًا على محطة المعالجة.

وبالكتاب العديد من الأشكال البيانية والتوضيحية والجداول، وقد تزيَّل كل فصل من الفصول بقائمة من المراجع التي استعنتُ بها لإثراء المادة العلمية، وأود في نهاية هذه المقدمة أن اوأكد على ضرورة اتباع مايلي للتخفيف من حدة مشكلة ندرة المياه:

- **حماية واحترام مصادر المياه؛** وتتمثل هذه الحماية في تخصيص حرم آمن وجميل لمجري النهر أو الترع أو البحيرات ومنع القاء المخلفات في هذا الحرم.

- **ترشيد الاستهلاك؛** من خلال الإعلاء من الوعي العام والتوعية المجتمعية بأهمية ترشيد الاستهلاك والحد من ري الحدائق والمساحات الخضراء بالخراطيم والاكتفاء بمساحات معقولة تروى بشبكات ري أثناء فترات الليل تجنبا لفقد الماء بالتبخير نهارا.

- **تحسين طرق الري الزراعي،** حيث أن القطاع الزراعي يستهلك ٧٠ % من المياه العذبة المتاحة في جميع أنحاء العالم.

- **المراجعة لتعريفة المياه؛** ووضع شرائح تسعيرية تصاعدية جادة وملزمة مرتبطة بكمية الاستهلاك، مما يجعل المواطن هو الأكثر حرصًا على الاقتصاد في الإنفاق على المياه. مع وضع حدٍّ مجانيٍّ للمياه يعفي المواطن من دفع فاتورة الاستهلاك إذا لم يتعدّ هذا الحد (كأن يكون٦٠ لتر/فرد/يوم مثلا).
- **تتبع الفاقد ومكافحته؛** في محطات التنقية من خلال ضبط دورات الغسيل لوحدات الترشيح وتطوير أنظمة التشغيل بما يحقق التوفير في استهلاك ماء الغسيل المصحوب دائما باستهلاك موازي من الكهرباء.
- **الكشف عن تسرب المياه؛** من خلال السعي الجاد من أجل الكشف عن تسرب المياه من شبكات التوزيع لسرعة السيطرة حفاظا على المياه من الإهدار ومنعا للآثار الجسيمة المترتبة على هذا التسريب مثل ارتفاع منسوب المياه تحت السطحية التي تؤثر سلبًا على المنشآت.

- **استخدام الأنظمة الاقتصادية في تحلية المياه؛** وهذا يلقي عبئًا ومسئولية على الجهات البحثية التي تسعى إلى تطوير طرق التحلية لتكون أقل تكلفة. وتعتبر تحلية مياه البحر هي أحد البدائل

الواعدة لتوفير مياه صالحة للشرب بالمناطق البعيدة عن وادي النيل، وأصبحت اقتصادية، ومنافسة للتنقية التقليدية للمياه بالمواقع النائية التي تتطلب نقل مياه النيل عبر خطوط تمتد لمسافات طويلة إلى تلك المناطق.

- **المحافظة على المياه الأرضية العميقة؛** لا يعتبر اللجوء إلى المياه الأرضية العميقة حلا بديلا لازمة المياه، فهي ثروة لا تقدر بثمن ويجب الحفاظ عليها، ولا يجب استغلالها أو استثمارها تحت أي ذريعة سوى لتأمين مياه الشرب وبمعدلات مخطط لها جيدًا تسمح باستخدامها لقرون قادمة، فهي بمثابة حصن الأمان وأمانة في أعناق الجهات الرسمية المسئولة والمستأمنة على الثروة المائية. هذه المياه الأرضية العميقة غير متجددة واستنزافها يشكل خطرًا جسيمًا فهي مخزونا استراتيجيا للطوارئ ومدخرات تخص الأجيال الحاضرة والقادمة.

- **توطيد العلاقات بين دول منابع النيل ودول المصب؛** لابد من توطيد العلاقات المبنية علي التعاون وحُسن الجوار بين دول منابع النيل ودول المصب لتحقيق المصالح المشتركة، والمشاركة الايجابية في المشروعات التي تهدف إلى زيادة الإمداد بالمياه؛ بما يعوض النقص في حالة استخدام إثيوبيا أو غيرها لجزء من مياه النيل لتنفيذ مشروعاتها فبناء السدود أمرٌ حتميٌّ للحصول على الطاقة التي أصبحت من الأسباب التي قد تؤجج الصراعات، والجميع يبحث عن التطور والتنمية، والجميع شركاء عالم واحد، ولا يستطيع أحدا أن يعيش بمعزلٍ عن الآخر أو أن يرضى بالتخلف عن ركب التنمية والتقدم.

نسأل الله تبارك وتعالي أن يكون هذا العمل موفقا في إعطاء المهتم صورةً جليّةً عن معالجة المياه (الترويب – التطهير)، ليتحقق أداء متميز لعملية التنقية بأقل استهلاك من المروبات وبفعالية عالية وبأفضل جودة بما يعود بالجدوى الفنية والاقتصادية.

والله ولي التوفيق وعليه قصد السبيل

دكتور/ نبيل أحمد عبد الله

المراجع

1. Falkenmark, M. Landscape as life support provider, "Water-related Limitations", In: Graham-Smith, F. ed. North America Press, 1994.
2. Duddin, M. Hendrie, A., "World land and water resources", London, Hodder and Stoughton, 1988.
3. United Nations (UN), "Commission on Sustainable Development. Comprehensive assessment of the fresh-water resources of the world", Report of the security General. New York, UN, 1997.
4. Griffith, O., "The Water crisis is Now". Arab Water World, vol. XXXVI issue 9, 2013.

قائمة المحتويات

الموضوع الصفحة

الفصل الأول: لماذا نعالج مياه الشرب؟ ١

الدورة المائية الطبيعية..... ٤

البنود المهمة لنوعية المياه..... ٦

١- المكونات العضوية (الكربون العضوي الكلي)..... ٦

أ- تحلل المواد العضوية الطبيعية... ..... ٦

ب- الأنشطة الصناعية والزراعية..... ٦

ج- الإضافات التي تضاف للمياه أثناء المعالجة..... ٧

٢- العناصر الثقيلة..... ٨

٣- الزيوت والشحوم..... ٨

٤- الأكسجين الذائب..... ٩

٥- ثاني أكسيد الكربون والاتزان الجيري..... ١٦

٦- عسر المياه..... ١٨

٧- المخصبات بالمياه..... ١٩

أولا:- الفسفور..... ٢٠

ثانيا:- النيتروجين..... ٢١

٨- المحتوي الميكروبيولوجي..... ٢٥

٩- الخصائص الجمالية للمياه..... ٢٦

أ- المذاق والرائحة..... ٢٦

ب- اللون..... ٢٩

ج- العكارة..... ٢٩

د- القدرة التلوينية للمياه..... ٢٩

العوامل المؤثرة على نوعية مياه المصدر (مياه سطحية)..... ٣٣

أولا:- العوامل الطبيعية..... ٣٣

- تأثير عمق المصدر على نوعية المياه ٣٣

ثانيا:- العوامل البشرية..... ٣٦

تأثير زيادة المغذيات أو المخصبات على حالة الجسم المائي ونوعية المياه به..... ٣٦

ماذا يحدث عند إلقاء المياه الملوثة في مصدر المياه؟..... ٣٨
مثال لمشكلة بيئية..... ٤٠
الملوثات الأكثر شيوعا في المياه السطحية..... ٤٠
أولًا: المواد العضوية الطبيعية..... ٤٠
١- النشأة والتركيب البنائي..... ٤٠
٢- التأثيرات الناجمة عن المواد العضوية (الدبالية)..... ٤٤
٣- النواتج الثانوية لعملية تطهير المياه..... ٤٥
٤- الامتصاص النوعي للأشعة فوق البنفسجية..... ٤٥
٥- متطلبات تحقيق ترويب محسن أو مُعزز..... ٤٦
ثانيًا: الجسيمات المتواجدة في المياه..... ٤٩
١- الفيروسات..... ٥٢
٢- البكتريا..... ٥٣
٣- البروتوزوا..... ٥٦
٤- الطحالب..... ٥٧
٥- الجسيمات المعدنية..... ٥٩
مكونات تسبب حدوث التآكل للمواسير الفلزية..... ٥٩
معالجة مياه الشرب السطحية والأرضية..... ٦٠
أولًا: المياه السطحية..... ٦٠
١- المعالجة التقليدية للمياه السطحية..... ٦١
٢- عمليات المعالجة المطلوبة للمياه الخام السطحية ذات الجودة العالية..... ٦٢
٣- المعالجة بالتعويم أو الطفو بالهواء الذائب..... ٦٣
٤- المعالجة بالترشيح المباشر..... ٦٤
٥- استخدام الكربون المنشط في المعالجة..... ٦٦
ثانيًا: معالجة المياه الأرضية..... ٦٦
١- إزالة الحديد والمنجنيز..... ٦٨
٢- إزالة العسر بالترسيب بالجير..... ٦٨
٣- التبادل الأيوني الكاتيوني ٦٩
٤- التبادل الأيوني الانيوني..... ٦٩

مراحل المعالجة الكيماوية للمياه السطحية..... ٦٩
عملية معالجة المياه السطحية بالترويب الكيميائي..... ٧١
ماذا يحدث عند إضافة المروب إلي المياه؟..... ٧١
الآليات الرئيسية لعملية الترويب..... ٧٣
أولًا: آلية معادلة الشحنات..... ٧٣
ثانيًا: آلية الترويب بالكنس ٧٤
المعالجة الكهروكيميائية للمياه السطحية (الترويب الكهربي)..... ٧٤
١- وصف لتقنية الترويب الكهربي..... ٧٥
٢- التفاعلات الآنودية..... ٧٦
٣- التفاعلات الكاثودية..... ٧٧
إزالة طفيليات كريبتوسبوريديوم والجيارديا المسببان للاضطرابات المعوية..... ٧٧
المياه المعبأة..... ٧٩
أولًا: مياه معدنية طبيعية معبأة..... ٧٩
١- مياه معدنية طبيعية مكربنة طبيعيًّا..... ٨٠
٢- مياه معدنية طبيعية غير مكربنة..... ٨٠
٣- مياه معدنية طبيعية منزوعة ثاني أكسيد الكربون..... ٨٠
٤- مياه معدنية طبيعية معززة بثاني أكسيد الكربون..... ٨٠
٥- مياه معدنية طبيعية مكربنة صناعيا..... ٨٠
ثانيًا: مياه سطحية أو أرضية معالجة معبأة..... ٨٠
ثالثًا: مياه الصنبور المعبأة..... ٨١
مراجع الفصل الأول..... ٨٢
الفصل الثاني: عملية الترويب..... ٨٥
أهداف عملية الترويب..... ٨٦
طبيعة الجسيمات المعدنية العالقة بالمياه السطحية..... ٨٩
ثباتية الجسيمات المعلقة..... ٩١
نشأة حالة الثبات للغرويات..... ٩٢
أولًا: تفاعل الجسيمات الصلبة الموجودة في المياه مع جزيئات المياه... ..... ٩٢
ثانيًا: التفاعل بين المجموعات السطحية للجسيمات مع المواد الذائبة فى الماء..... ٩٤

ثالثًا: عدم اكتمال التركيب الداخلي للجسيم..... ٩٥
الطبقة الكهربيةالمزدوجة..... ٩٨
نظرية الطبقة المزدوجة لجوي- شابمان..... ٩٨
تأثير تكافؤ الكاتيونات علي سُمك طبقة الانتشار المزدوجة..... ١٠٢
تأثير تركيز محلول الالكتروليت علي سُمك طبقة الانتشار المزدوجة..... ١٠٢
جهد زيتا..... ١٠٣
تأثير تركيز محلول الالكتروليت علي جهد زيتا..... ١٠٣
تأثير الطبقة المزدوجة علي ثبات الغرين..... ١٠٥
آليات إزالة الشوائب العالقة..... ١٠٦
أولًا: انضغاط الطبقة المزدوجة..... ١٠٦
ثانيًا: الادمصاص ومعادلة الشحنة..... ١٠٨
ثالثًا: الاندماج في راسب..... ١١٠
التحلل المائي للمروبات الفلزية..... ١١١
نواتج التحلل المائي لمروب الالومونيوم..... ١١٢
ذوبانية هيدروكسيد الالومونيوم وهيدروكسيد الحديديك غي الماء..... ١١٧
تأثير الرقم الهيدروجيني وتركيز الالومونيوم الكلي علي نواتج التحلل المائي..... ١٢٠
الكيمياء المائية للحديد..... ١٢٥
أنواع المروبات التي تنحل مائيا والمستخدمة في معالجة المياه..... ١٢٩
١- أملاح فلزية بسيطة..... ١٢٩
٢- أملاح سابقة الانحلال المائي..... ١٣٠
٣- الومينات الصوديوم..... ١٣٢
عنصر الالومونيوم..... ١٣٢
عنصر الحديد..... ١٣٥
آليات التفاعل بين المروب والشوائب..... ١٣٦
أولًا: آلية التحلل المائي للمروب يعقبه الادمصاص للشوائب..... ١٣٧
ثانيًا: آلية التحلل المائي للمروب يعقبه تكون معلق غير قابل للترسيب..... ١٣٩
ثالثًا: آلية التحلل المائي للمروب يعقبه الترويب بالكنس..... ١٣٩
رابعًا: تكوُّن نواتج تحلل مائي ذائبة للمروب..... ١٤٠

تأثير الرقم الهيدروجيني علي آلية إزالة لون المياه الناشئ عن المواد الدبالية..... ١٤١
تفسير نتائج عملية الترويب..... ١٤٣
اختبار الجار..... ١٤٤
جهاز اختبار الجار..... ١٤٥
حساب تصريف طلمبة إضافة محلول الشَّبَّة المخفف..... ١٤٩
منحنيات توضيحية للترويب باستخدام كبريتات الالومونيوم..... ١٥٠
أولًا: تأثير جرعة المروب على الكربون العضوي الكلي والعكارة..... ١٥١
ثانيًا: تأثر الرقم الهيدروجيني للمياه بجرعة المروب وتأثير ذلك علي الالومونيوم المتبقي..... ١٥١
إزالة العناصر الثقيلة بفعل مروب كبريتات الالومونيوم..... ١٥٨
آليات إزالة العناصر الثقيلة ١٥٩
أولًا: الترسيب المشترك بالاندماج..... ١٥٩
ثانيًا: الترسيب المشترك بالادمصاص..... ١٥٩
ثالثًا: الترسيب المشترك بالادمصاص والاحتواء..... ١٥٩
رابعًا: الترسيب المباشر..... ١٥٩
العوامل المؤثرة على إزالة العناصر الثقيلة من الماء..... ١٦١
تأثير عوامل التطهير علي عملية الترويب..... ١٦٢
تأثير الايونات المتواجدة في المياه علي عملية الترويب..... ١٦٣
أولًا: تأثير انيونات الكبريتات..... ١٦٣
ثانيًا: تأثير السليكات..... ١٦٤
ثالثًا: تأثير كاتيونات الكالسيوم والماغنسيوم..... ١٦٤
رابعًا: تأثير درجة الحرارة علي عملية الترويب..... ١٦٥
تأثر قلوية المياه بمروب كبريتات الالومونيوم..... ١٦٥
عملية تجميع الشوائب..... ١٦٦
عمليات انتقال الجسيمات المعلقة في الماء..... ١٦٧
أولًا: الانتشار البرونيوني..... ١٦٧
العوامل المؤثرة على كفاءة التصادم بين الجسيمات..... ١٦٩
١- الجهد الكهروستاتيكي..... ١٦٩
٢- التباطؤ الهيدروديناميكى..... ١٦٩

ثانيًا: قص الماء (الانزلاق الرقائقي للماء) والترويب الارثوكاينتيك..... ١٧٠
مفهوم انحدار السرعة..... ١٧٠
العوامل المؤثرة على كفاءة الترويب الحركي المباشر (ارثوكاينتيك) ١٧٢
ثالثًا: الهبوط التفاضلي..... ١٧٢
رابعًا: الحركة الاضطرابية للماء..... ١٧٣
آليات الترويب والانسياب داخل وحدات الترويب..... ١٧٤
تفكك الندف وتكسرها..... ١٧٦
الخلط السريع..... ١٧٦
الخلط السريع والية الترويب..... ١٧٦
وحدات الخلط السريع..... ١٧٧
١- الخلط الميكانيكي..... ١٧٧
٢- الخلط عبر الخط..... ١٧٨
٣- الخلط بالحقن المباشر..... ١٧٨
خلاصة فصل الترويب..... ١٧٩
مراجع الفصل الثاني..... ١٨٢
الفصل الثالث: تطهير مياه الشرب (الاكسدة الكيميائية لمياه الشرب)..... ١٨٧
الأسس الكيميائية للأكسدة..... ١٩١
تفسير تفاعلات الاكسدة والاختزال في ضوء انتقال الالكترونات..... ١٩١
جهود الإلكترود..... ١٩٤
تفاعلات الاكسدة والاختزال..... ١٩٦
المعادلات المتزنة..... ١٩٦
أنواع التفاعلات التي تحدث أثناء معالجة المياه بالكلور ١٩٨
أولًا: تفاعل إضافة الى رابطة أوليفينية..... ١٩٩
ثانيًا: تفاعل إحلال "أروماتي" منشط..... ١٩٩
ثالثًا: تفاعل إحلال أليفاتي على نيتروجين..... ٢٠٠
العوامل الحفازة للأكسدة..... ٢٠٢
تأثير الرقم الهيدروجيني ودرجة الحرارة على تفاعلات الاكسدة..... ٢٠٤
مسارات تفاعلات التطهير في معالجة مياه الشرب..... ٢٠٥

العوامل المطهرة (المؤكسدة) المستخدمة في معالجة مياه الشرب..... ٢٠٦
أولًا: الكلور..... ٢٠٦
- ذوبانية الكلور في الماء..... ٢١٢
- تفاعل هيبوكلوريت الصديوم مع الماء..... ٢١٩
- تفاعل هيبوكلوريت الكالسيوم مع الماء..... ٢١٩
- تفاعل الكلور مع المواد العضوية..... ٢٢١
- تفاعل الكلور مع البروميد..... ٢٢٢
- تفاعل الكلور مع الأمونيا وتكوين الكلورامين..... ٢٢٣
ثانيًا: الأوزون..... ٢٣٤
- نبذة عن الأوزون وعمليات الاكسدة المتقدمة..... ٢٣٤
- توضيح بياني لسلوك الأوزون في المحاليل المائية..... ٢٣٥
- عمليات التطهير بالأوزون مع الأشعة فوق البنفسجية..... ٢٣٨
- إنتاج خليط من العوامل المؤكسدة بالتحليل الكهربي..... ٢٣٩
تأثير الكلور والأوزون على نوعية المياه..... ٢٤١
أولًا: ترسيب الحديد والمنجنيز..... ٢٤١
ثانيًا: التحكم في النمو البيولوجي الذي يكوّن ترسيبات في محطات المعالجة..... ٢٤٢
ثالثًا: إزالة اللون..... ٢٤٣
رابعًا: إزالة المذاق والرائحة..... ٢٤٤
خامسًا: المساعدة في عملية الترويب..... ٢٤٥
سادسًا: أكسدة الفينول والمواد العضوية الصناعية..... ٢٤٦
تكوين النواتج الثانوية للأكسدة أو التطهير..... ٢٤٧
أولًا: النواتج الثانوية للكلورة..... ٢٤٨
ثانيًا: النواتج الثانوية للتطهير بالأوزون..... ٢٤٩
ملخص للنواتج الثانوية للتطهير..... ٢٥١
العوامل التي تحكم تكوين النواتج الثانوية للتطهير..... ٢٥٤
أولًا: الزمن..... ٢٥٤
ثانيًا: جرعة المطهر..... ٢٥٤
التطهير باستخدام الأشعة فوق البنفسجية..... ٢٥٥

كيفية التخلص من النواتج الثانوية لعملية التطهير..... ٢٥٩
خلاصة فصل التطهير..... ٢٦٠
مراجع الفصل الثالث..... ٢٦٢
الفصل الرابع: ادارة مخلفات معالجة مياه الشرب..... ٢٦٩
الهدف من إدارة المخلفات..... ٢٧٠
مفهوم إدارة المخلفات..... ٢٧٠
تقدير كمية الراسب الناتج من استخدام مروب كبريتات الألومونيوم (الشبة)..... ٢٧٢
تقدير كمية الراسب الناتج من استخدام مروب كلوريد الحديديك..... ٢٧٤
الخصائص الكيميائية للحمأ..... ٢٧٨
تركيز الحمأ..... ٢٧٨
طرق تجفيف الحمأ..... ٢٨١
إعادة تدوير المياه ٢٨٢
التخلص النهائي وإعادة الاستخدام للحمأ..... ٢٨٣
مراجع الفصل الرابع..... ٢٨٥
ملحق أ : استخدام اختبار الجار في انجاز الترويب عالي الكفاءة ٢٨٦
مراجع ملحق (أ)..... ٢٩١
ملحق ب : نوعيات من الطحالب وتأثيراتها أو دلالات وجودها..... ٢٩٢

المؤلف في سطور ٢٩٣

الفصل الأول

لماذا نعالج مياه الشرب؟

لماذا نعالج مياه الشرب؟

تُنقى المياه على كوكب الأرض تنقية ذاتية من خلال دورة بيئية طبيعية غاية في الإحكام والدقة مستمدة الطاقة اللازمة لها من الشمس، وأصل الماء العذب هو الماء المالح الأجاج (البحار والمحيطات والبحيرات)، ؛ حيث تعمل الطاقة الشمسية على تبخير تلك المياه المالحة، وقد سخر الله تبارك وتعالى الرياح لحمل ونقل تلك الأبخرة الى طبقات الجو العليا؛ حيث تتكاثف مكونة السحب وتقوم الرياح مرة أخرى بنقل تلك السحب وتعمل علي تراكمها، ثم تتساقط إلى الأرض الى حيث أراد الله عز وجل على هيئة الغيث أو الجليد، وهذه العملية المكونة من التبخير والتكثيف هي ما يُعرف بالتقطير، وهى تؤثر تأثيرًا بالغًا على سطح الأرض حيث تعمل على تنظيم درجة الحرارة عليه، وتقوم بتبريد التربة والبحار وتسهم في تدفئة الغلاف الجوى، فضلا عن أن هذه العملية التي تتم من خلال دورة طبيعية تنقى المياه، فالماء الذي يهطل وينساب في الأودية والأنهار هو ماء عذب.

قال تعالى: أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ يُزْجِي سَحَابًا ثُمَّ يُؤَلِّفُ بَيْنَهُ ثُمَّ يَجْعَلُهُ رُكَامًا فَتَرَى الْوَدْقَ يَخْرُجُ مِنْ خِلَالِهِ وَيُنَزِّلُ مِنَ السَّمَاءِ مِنْ جِبَالٍ فِيهَا مِنْ بَرَدٍ فَيُصِيبُ بِهِ مَنْ يَشَاءُ وَيَصْرِفُهُ عَنْ مَنْ يَشَاءُ يَكَادُ سَنَا بَرْقِهِ يَذْهَبُ بِالْأَبْصَارِ [النور، الآية: ٤٣].

وقال تعالى: وَهُوَ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيَاحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ حَتَّى إِذَا أَقَلَّتْ سَحَابًا ثِقَالًا سُقْنَاهُ لِبَلَدٍ مَيِّتٍ فَأَنْزَلْنَا بِهِ الْمَاءَ فَأَخْرَجْنَا بِهِ مِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ كَذَلِكَ نُخْرِجُ الْمَوْتَى لَعَلَّكُمْ تَذَكَّرُونَ (٥٧) [الاعراف. الآية: ٥٧]، وقال تعالى: اللَّهُ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيَاحَ فَتُثِيرُ سَحَابًا فَيَبْسُطُهُ فِي السَّمَاءِ كَيْفَ يَشَاءُ وَيَجْعَلُهُ كِسَفًا فَتَرَى الْوَدْقَ يَخْرُجُ مِنْ خِلَالِهِ فَإِذَا أَصَابَ بِهِ مَنْ يَشَاءُ مِنْ عِبَادِهِ إِذَا هُمْ يَسْتَبْشِرُونَ [الروم، الآية: ٤٨].

يهطل الماء من السماء ويتراكم على سطح الأرض أو على أسطح الجبال، ثم يسلك مسارات ويتجمع في وديان أو برك على أسطح الجبال ثم ينساب مرة أخرى وقد يكون بكميات غزيرة محدثٍ ما يسمى بالسيول، و في نهاية المطاف يتجمع في الأنهار، ويطوعه الإنسان ليستخدمه في الشرب أو الري أو الصناعة. قال تعالى: أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَالَتْ أَوْدِيَةٌ بِقَدَرِهَا فَاحْتَمَلَ السَّيْلُ زَبَدًا رَابِيًا وَمِمَّا يُوقِدُونَ عَلَيْهِ فِي النَّارِ ابْتِغَاءَ حِلْيَةٍ أَوْ مَتَاعٍ زَبَدٌ مِثْلُهُ كَذَلِكَ يَضْرِبُ اللَّهُ الْحَقَّ وَالْبَاطِلَ فَأَمَّا الزَّبَدُ فَيَذْهَبُ جُفَاءً وَأَمَّا مَا يَنْفَعُ النَّاسَ فَيَمْكُثُ فِي الْأَرْضِ كَذَلِكَ يَضْرِبُ اللَّهُ الْأَمْثَالَ (١٧) [الرعد، الآية: ١٧].

ونتيجة انسياب الماء على سطح التربة فجزء من هذا الماء يتخلل جزيئات التربة الى أن تحتجزه طبقة مصمتة غير منفذة ويتراكم ذلك الماء أعلى تلك الطبقة، ويشكل مستودعًا مائيًّا مخزونًا قريبًا من سطح الأرض، وفي بعض الأحيان قد يجد الماء في هذه الطبقة منفذا للخروج الى أسفل حيث يصل الى طبقة عميقة ويحتجز فيها نتيجة وجود طبقة مصمتة أخرى وبالتالي يتكون خزان مياه عميق.

قال تعالى: وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَّاهُ فِي الْأَرْضِ وَإِنَّا عَلَى ذَهَابٍ بِهِ لَقَادِرُونَ (١٨)[المؤمنون، الآية: ١٨]. وقال تعالى: أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَلَكَهُ يَنَابِيعَ فِي الْأَرْضِ ثُمَّ يُخْرِجُ بِهِ زَرْعًا مُخْتَلِفًا أَلْوَانُهُ ثُمَّ يَهِيجُ فَتَرَاهُ مُصْفَرًّا ثُمَّ يَجْعَلُهُ حُطَامًا إِنَّ فِي ذَلِكَ لَذِكْرَى لِأُولِي الْأَلْبَابِ (٢١) [الزمر، الآية: ٢١].

وكنتيجة لحركة الماء خلال طبقات رملية ذات مسامية يحدث له ترويق وتصفية طبيعية، وبالتالي يصبح ماء الطبقات العميقة أكثرَ نقاءً من الأخرى الأقل عمقًا. هذا على اعتبار أن الماء أثناء سريانه لم يصادف طبقات ملحية تؤدي الى زيادة الأملاح الذائبة به. تخرج مياه الينابيع من الطبقات الحاملة للمياه بصورة طبيعية أو من خلال حفر الآبار، قال تعالى: ثُمَّ قَسَتْ قُلُوبُكُمْ مِنْ بَعْدِ ذَلِكَ فَهِيَ كَالْحِجَارَةِ أَوْ أَشَدُّ قَسْوَةً وَإِنَّ مِنَ الْحِجَارَةِ لَمَا يَتَفَجَّرُ مِنْهُ الْأَنْهَارُ وَإِنَّ مِنْهَا لَمَا يَشَّقَّقُ فَيَخْرُجُ مِنْهُ الْمَاءُ وَإِنَّ مِنْهَا لَمَا يَهْبِطُ مِنْ خَشْيَةِ اللَّهِ وَمَا اللَّهُ بِغَافِلٍ عَمَّا تَعْمَلُونَ (٧٤) [البقرة، الآية: ٧٤].

والمياه العميقة تكون ثابتة التدفق وذات درجة حرارة ثابتة، ولا تتأثر بالظواهر الطبيعية السطحية، وبالتالي لا تصل إليها الملوثات الناجمة عن أنشطة الإنسان.

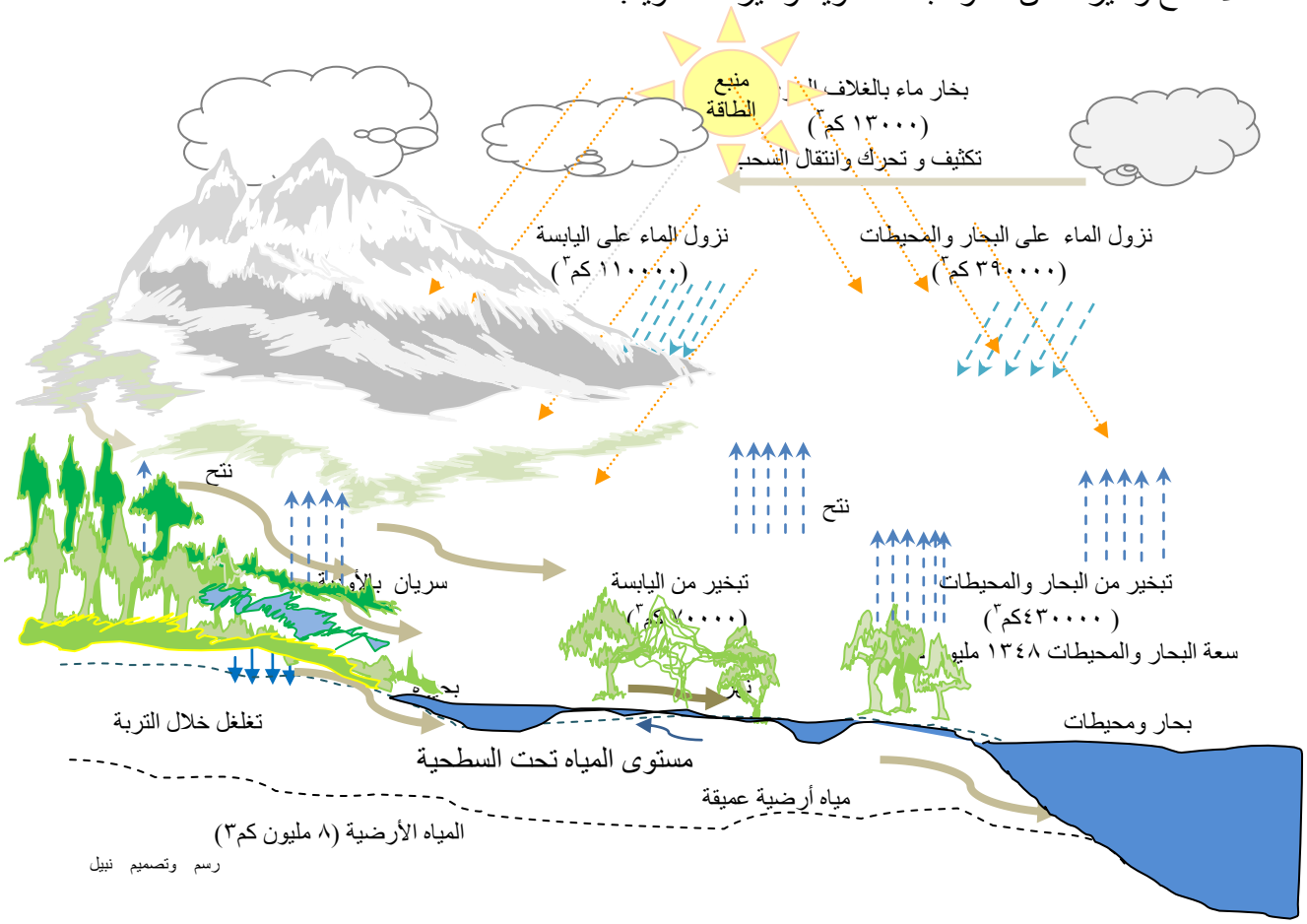
يتدفق جزء من الماء خلال الأودية إلى أن يصب في الأنهار التي تصب هي الأخرى في البحار والمحيطات في نهاية المطاف إلى من حيث بدأت الدورة، هذا يعنى أن دورة الماء تبدأ بصورة كبيرة من المحيطات نظرا لاتساع سطحها ثم تنتهي إليها، ثم تتوالى هذه الدورة بآلية تكرارية لانهائية فسبحان القادر على كل شيء.

الدورة المائية الطبيعية

تتأثر الدورة المائية في الطبيعة بطبوغرافية سطح الأرض وبتيارات المحيط التي تغير من النمط المناخي الذي يسبب حدوث الغيث غير الموزع بالتساوي؛ بحيث تكون هناك أماكن غزيرة نزول الماء وأماكن أخرى جدباء شحيحة الغيث.

يوضح الشكل (١/١) الدورة المائية الطبيعية، فنجد أن هناك علاقة هيدروجيولوجية حركية بين المياه الأرضية والسطحية وحركة المياه في الغلاف الجوي. والدورة المائية أو الدورة الهيدروجيولوجية أو الأرض مائية هي بمثابة رحلة النقاء واستعادة الحيوية بصورة دورانية بين الغلاف المائي والغلاف الجوي. وهذه المياه لا تفقد في الطريق أو تضل السبيل، فكمية المياه الموجودة في الأرض هي نفسها التي تواجدت منذ أن خلق الله الأرض.

تدور المياه بصورة مستمرة وتغير من حالتها من السائلة إلي البخارية ثم الى الصلبة. وقد تتلوث المياه أثناء رحلة العودة إذا احتوى الغلاف الجوي على غازات مثل: الأكاسيد الكبريتية والنيتروجينية أو أتربة أوغيرها من الملوثات. وعملية تبخير المياه من البحار والمحيطات تجعل المياه خالية من الأملاح وغيرها من الشوائب العضوية وغير العضوية.



شكل (١/١) الدورة المائية الطبيعية

يحدث تلوث للمياه أثناء الدورة الطبيعية، وهذا يتفاوت من حيث الكمية والنوعية، والهدف من إدارة نوعية المياه هو درء أو الحد من هذا التلوث كلما أمكن. وقد تحدث تأثيرات تلوث حاد أو مزمن للمياه، وهذا الأخير يستمر لمدة طويلة من الوقت مؤديا إلى تدهور نوعية مصدر المياه ومثال ذلك:

النشاط البشرى الذي يُجرى في المياه السطحية مسببًا زيادة نسب بعض العناصر والمركبات أهمها وأكثرها شيوعًا مركبات النيتروجين والفسفور المسببة لظاهرة التسميد أو التخصيب الزائد، أما التأثير الحاد فيتمثل في الحوادث العارضة التي تحدث أثناء الممارسات الملاحية والنقل عبر المجارى المائية العذبة، مثل انسكاب البترول والزيوت، وهذا النوع العارض الفجائي يمكن السيطرة عليه وتداركه.

لذلك تقوم الجهات المعنية بمراقبة وإدارة مصادر المياه بدراسة كل المصادر المؤثر على نوعية المياه حتى يمكنها السيطرة على مناطق الخطر للحيلولة دون تدهور نوعية المياه، فدرء الخطر والوقاية منه خير من الاكتفاء بمعالجة آثاره. وفى الأحوال التي تتواجد فيها مصادر الخطر، فلا بُد من اتخاذ جميع التدابير للمواجهة وإجراء المعالجات المناسبة للحصول في النهاية على نوعية مياه نظيفة وآمنة.

البنود المهمة لنوعية المياه

١ـ المكونات العضوية (الكربون العضوي الكلى)

تأتي المكونات العضوية في الماء من ثلاثة مصادر رئيسية وهي: تحلل المواد العضوية الطبيعية، والأنشطة الصناعية والزراعية، والتفاعلات التي تحدث أثناء معالجة المياه ونقلها. ويمكن توضيحها على النحو التالي:

أـ تحلل المواد العضوية الطبيعية

ويعتبر هذا المصدر هو الشائع الحدوث، وتتألف المادة العضوية الآتية من هذا المصدر من المواد الدبالية الناشئة عن العمليات الحيوية للنبات والطحالب والكائنات الدقيقة وتحلل بقايا هذه الكائنات، ومواد عضوية أخرى هيدروكربونات أليفاتية وأروماتية ذات وزن جزيئي عالٍ. وبعض تلك المركبات ليست خطيرة، ولكن البعض منها له تأثير ضار مثل نواتج العمليات الحيوية ذات الرائحة. وهناك قليل من الهيدروكربونات الأليفاتية والأروماتية قد يكون لها تأثيرات صحية عكسية، بالإضافة إلى أن المواد الدبالية تعمل كمتفاعلات مع الكلور المضاف لتطهير المياه، وينجم عن ذلك تكون مواد عضوية مكلورة مثل: الهالوميثانات الثلاثية (THMs) وأحماض هالواسيتيك (HAAs).

ب ـ الأنشطة الصناعية والزراعية

تأتى المركبات الخطرة من بعض الأنشطة الصناعية والزراعية التي تقوم بصرف مياهها العادمة إلى مصادر المياه العذبة، وقد يكون تأثير تلك المركبات حاداً فيظهر تأثيرها سريعا بمجرد شرب الماء

وقد يكون التأثير مزمنا فلا يظهر التأثير الا بعد وقت طويل من الاستخدام. بعض تلك المركبات يكون مسرطنا مثل: مبيدات الأعشاب والآفات ومركب ثنائي فينول عديد الكلور.

تعتبر المخلفات العضوية (الأسمدة الناتجة من حيوانات المزرعة ومخلفات التصنيع الزراعي والأسمدة العضوية الصناعية النيتروجينة والفوسفاتية) هي من أهم أسباب تلوث المياه؛ حيث تضاف تلك المخلفات إلى التربة الزراعية لتحسين خصائصها الطبيعية والكيميائية بكميات كبيرة، وهذا يؤدي إلي العديد من المركبات الكيميائية التي تجد طريقها إلى المياه السطحية عن طريق الصرف أو الى المياه الأرضية عن طريق الارتشاح، ومن أمثلة تلك المركبات: الأمونيا والنيتريت والنترات.

ج- الإضافات التي تضاف للمياه أثناء المعالجة ونواتج تفاعلاتها مع مواد التطهير

هناك مُركبات تتخلف عن البوليمر (بولي أكريليمايد) مثل: أكريلامايد (Acrylamide) وايبيكلوروهيدرين (Chloro alkyl epoxide or Epichlorohydrin). وقد تتواجد مع البوليمر وحدات حرة منفردة من الاكريليمايد (Monomers) التي تبقى ذائبة في الماء ولا يتم التخلص منها. ويستخدم الايبيكلوروهيدرين في تصنيع المروبات العضوية وراتنجات الايبوكسي والفينوكسي، وأيضا كمذيب للراتنجات والسيليولوز والدهانات. وقد وضعت وكالة حماية البيئة الأمريكية حدود لكمية البولي اكريلامايد المستخدمة في معالجة مياه الشرب، وكذلك تركيز الوحدات الحرة المتواجدة في هذا المركب.

وتشير الدراسات إلى أن الاكريليمايد يسبب الإصابة بالسرطان لفئران التجارب.[١] ينجم عن عملية التطهير بالكلور تكوّن مركبات عضوية جديدة مثل: تراهالوميثان والهالواسيتيك أسيد، وقد تلوث المياه المنقاة أثناء نقلها ببعض المركبات التي تخرج من مواد العزل الداخلي للمواسير أو مواد اللصق، ومن أمثلتها الهيدروكربونات عديدة الأنوية وايبيكلوروهيدرين.

ويعبر عن تلك المكونات العضوية إجمالا بالكربون العضوي الكلي. ويعتبر هذا القياس في غاية الأهمية للمياه السطحية لأنه مرتبط بتكوّن النواتج العضوية الثانوية لعملية الكلورة.

وهناك ما يتعلق بالصحة مباشرة وهو تكسير الاندوكراين (المتعلق بالهرمونات) بواسطة مجموعة كبيرة من المركبات العضوية.[٢] كما أن هناك مركبات عضوية محل الاهتمام في هذا الصدد مثل: بعض مبيدات الآفات والدايوكسينات والبولي كلورينيتيد باي فاينايلز (PCBs)، ومركبات نونايل فينول المستخدمة في تصنيع البلاستيك والمنظفات.[٣]

٢- العناصر الثقيلة

تؤثر العناصر الثقيلة تأثيرًا سلبيًّا على الصحة العامة والحياة المائية وتتمثل مصادرها في الأنشطة الصناعية، وصرف المياه العادمة إلى المياه العذبة، أهم هذه العناصر: الزرنيخ – الكادميوم – الكروم - الرصاص – الزئبق – النيكل.

جدول (١/١) العناصر الثقيلة الخطرة الشائعة ومصادرها[٤]

العنصر	الاستخدامات والمصادر
الزرنيخ (As)	مبيد حشري – مشتقات البترول والفحم – المنظفات
الكادميوم (Cd)	طلاء المعادن – البويات – مثبت البلاستيك – صناعة البطاريات
الكروم (Cr)	طلاء المعادن – الصلب الذي لا يصدأ – مصانع الطوب
الرصاص (Pb)	احتراق الوقود والفحم – مصانع إنتاج الحديد والصلب
الزئبق (Hg)	المبيدات – صناعة المعادن – الترمومترات – تصنيع البوليمرات
النيكل (Ni)	احتراق البترول والفحم – صناعة السبائك – طلاء المعادن

٣- الزيوت والشحوم

تأتى الزيوت والشحوم من عمليات التشحيم، ومن المخلفات الصناعية وزيوت الطهي التي تجد طريقها إلى مصادر مياه الشرب. تعمل الزيوت على أضعاف المعالجة البيولوجية في محطات معالجة الصرف الصحي، كما أنها تسبب مشاكل عديدة للمعدات وآليات المعالجة مما يستلزم معه إجراء أعمال الصيانة المستمرة للتخلص من آثار تلك الزيوت والشحوم.

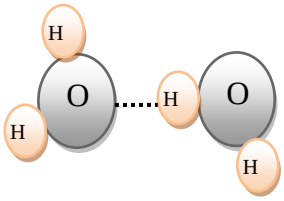
٤- الأكسجين الذائب:

هناك آليتين لذوبانية الغازات في الماء:

- بعض الغازات تتفاعل كيميائيًّا مع الماء مثل: كبريتيد الهيدروجين والامونيا والكلور وثاني أكسيد الكربون.
- والبعض الآخر لا يتفاعل كيميائيًّا مع الماء مثل: الأكسجين والميثان.

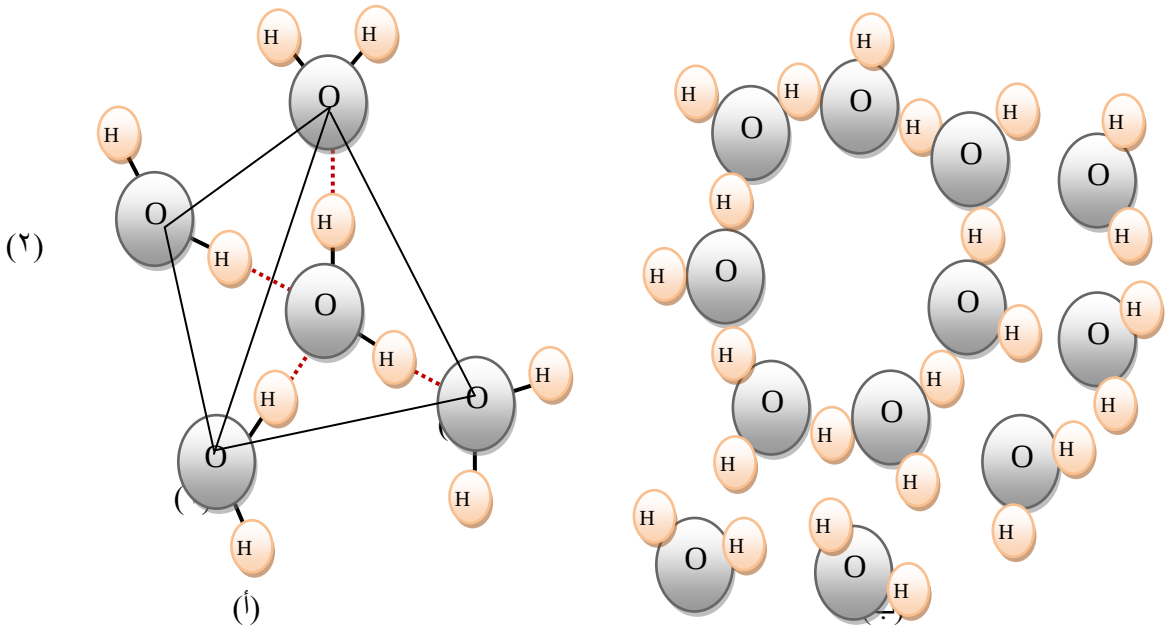
في الحالة الثانية تزداد طاقة الحركة للنظام (الانتروبيا)، فانتشار وذوبانية للأكسجين في الماء هي زيادة في الانتروبيا للنظام بالمقارنة بالمكونين (الأكسجين والماء) في حالة انفرادية لكل منهما.

والقوة التي تزيد من الانتروبيا تتعارض مع قوى تجاذب جزيئات الماء. لذلك فلزيادة ذوبانية غاز في الماء لا بُد من التغلب على قوى تجاذب جزيئات الماء من خلال حركة الماء.



الرابطة الهيدروجينية بين جزيئين ماء

تأخذ جزيئات الماء الشكل الرباعي الأوجه، وترتبط ببعضها بعضًا من خلال الروابط الهيدروجينية. (شكل١/٢) تترابط جزيئات الماء وتتفكك بمعدل ثابت، وبالتالي فالتعنقد والانفراط قصير الأجل، وتتحكم فيه عوامل كثيرة. ولكي يذوب غاز في الماء فلا بُد من أن تنجذب جزيئاته إلي جزيئات الماء أكثر من انجذاب جزيئات الماء إلى بعضها بعضًا.

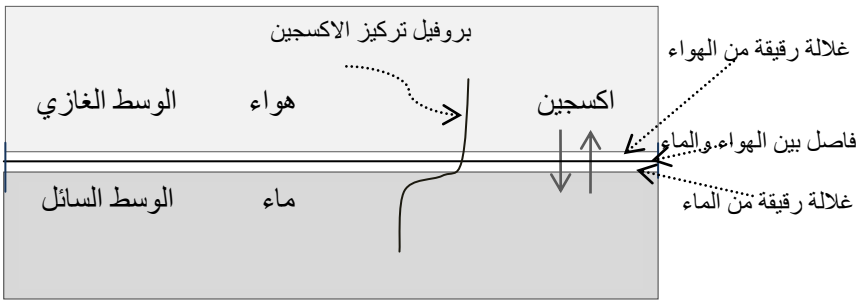


شكل (١/٢) أ - ترابط جزيئات الماء مع بعضها البعض بروابط هيدروجينية. على هيئة الشكل رباعي الأوجه مكتمل المحاور، فالجزئ (١) و(٢) والجزئ المركزي (٥) يقعون في مستوى الصفحة بينما الجزئ (٣) يقع أعلى مستوى الصفحة والجزئ (٤) يقع أسفل مستوى الصفحة، وبالتالي فذرة الأكسجين ١و٢و٣و٤ يقعون عند أركان شكل رباعي الأوجه منتظم. الرابطة الهيدروجينية O H ذات طول = ١,٧٧ انجستروم، والرابطة التساهمية O H = ٠,٧٧ انجستروم. ب- تتكون عناقيد من جزيئات الماء نتيجة الروابط الهيدروجينية، وتتواجد بين العناقيد جزيئات منفردة من الماء.

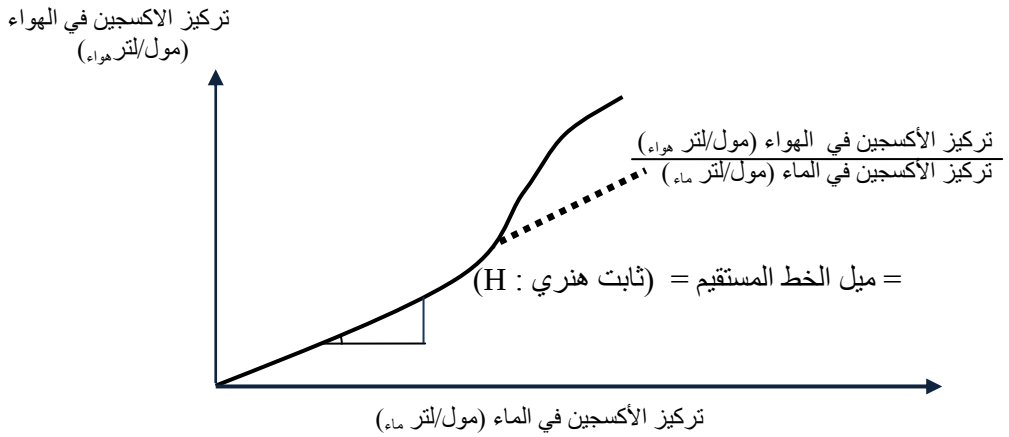
إذا قمنا بوضع ماء خالٍ من الأكسجين في وعاء مغلق ثم أدخلنا إليه هواء، يبدأ جزء من جزيئات الأكسجين في الانتقال إلى الماء، وبعد وقت معين ينتقل جزء من جزيئات الأكسجين التي

ذابت في الماء إلى الهواء (الحالة الغازية) مرة أخرى. وفي الواقع فإن عدد جزيئات الأكسجين التي انتقلت إلى الماء تساوي عدد الجزيئات التي تتركه وتسبح في الهواء الذي يعلوه، ويظل هذا الانتقال المتبادل مستمرًا إلى أن يصبح تركيز الأكسجين في الماء ثابتا مشيرا إلى الوصول إلى حالة الاتزان.

وإذا قمنا بزيادة تركيز الأكسجين في الهواء الذي يعلو الماء، فعندئذ تنتقل جزيئات الأكسجين مرة أخرى إلى الماء حتى تنشأ حالة جديدة من الاتزان يحتوي فيها الماء على تركيز أعلى من الأكسجين.



شكل (١/٣) شكل تخطيطي لحالة الاتزان بين الاكسجين في الهواء وفي الماء



شكل (١/٤) توزيع تركيز الأكسجين بين الحالة الهوائية والمائية عند الاتزان عند درجة حرارة ثابتة

يمثل شكل (١/٤) العلاقة بين التركيز المولي للأكسجين في الهواء وتركيز الغار في الماء. وحيث انه في معالجة المياه يكون الضغط المؤثر هو الضغط الجوي، وبالتالي يكون الضغط ثابتا، أما درجة الحرارة فهي المتغيرة.

المبادئ العامة لأنظمة "الغاز- ماء" المطبقة في معالجة الماء:

١- عند حدوث الاتزان لا يحدث انتقال متبادل بين الوسط الغازي والوسط السائل.

٢- إذا لم يتحقق الاتزان، يظل انتقال الغاز إلى الوسط السائل حتى يتحقق الاتزان الذي قد يكون لحظيا أو يأخذ وقت طويلا.

٣- لكل غاز درجة الحرارة وضغطا كليا، وعدد من ظروف الاتزان يمكن تمثيلها بيانيا كما في شكل (١/٤).

٤- تنخفض ذوبانية الغاز مع زيادة درجة الحرارة ومع تناقص الضغط.

نلاحظ أن منحنى التوزيع في شكل (١/٤) يأخذ خطا مستقيما عند التركيزات المنخفضة، ويمكن التعبير حسابيا عن هذا الجزء المستقيم بمعادلة خط مستقيم يمر بنقطة الصفر، يحقق هذا الخط ما يُعرف بقانون هنري. ويعبر ميل هذا الخط عن ثابت هنري (H) ويساوي:

$$p = Hc/P_T \qquad (١/١)$$

حيث (H) = ثابت التناسب المعروف بثابت هنري وهو يمثل الجزء المستقيم من منحنى التوزيع

وحدات القياس لبنود القانون:

(p) : مول غاز / مول هواء (c) : مول غاز / مول ماء

(H) = جو (مول غاز/ مول هواء) / مول غاز / مول ماء (P_T) : الضغط الكلي : جو

في معالجة المياه يكون الضغط (P_T) هو الضغط الجوي ويساوي واحد ضغط جوي = ١ جو، تختلف وحدات ثابت هنري تبعا للوحدات المستخدمة للتعبير عن التركيز في كل من حالة الوسط الغازي والوسط المائي. وتعتبر وحدات المول هي الأكثر استخداما.

ويمكن التعبير عنه في سياق المعادلة الآتية:

$$\frac{\text{نسبة تركيز الأكسجين في الهواء (p)} \times \text{الضغط الجوي } (P_T)}{\text{نسبة تركيز الأكسجين في الماء(c)}} \qquad (١/٢)$$

وحيث أن الضغط الجوي (P_T) = ١ ، فيصبح ثابت هنري =

$$\frac{\text{نسبة التركيز المولي للأكسجين في الهواء (مول أكسجين/ مول هواء)}}{\text{نسبة التركيز المولي للأكسجين في الماء (مول أكسجين/مول ماء)}} \qquad (١/٣)$$

وتبعًا لقانون دالتون فان مول من الغاز لكل مول من الهواء هي نفسها الضغط الجزئي للغاز، أو أيضا تساوي حجم الغاز لكل حجم من الهواء. ويمكن استنتاج عامل للتحويل علي النحو التالي:-

واحد لتر من الماء يحتوي على ٥٥،٦ مول ماء (١٠٠٠ جرام/لتر ماء ÷ ١٨ جرام/مول = ٥٥,٦ مول/لتر). ويمكن التعبير عن الوحدة لثابت هنري بالكتلة لكل وحدة حجم أو المول لكل وحدة حجم، وطالما أن وحدة الضغط (p) والتركيز (c) واحدة ومن هنا يكون الثابت عديم الوحدة كما يلي:-

$$p = H_u c$$

حيث (p) بوحدات التركيز، كجم /م^3 ، مول/لتر، مجم/لتر، و (H_u) بدون وحدة.

فعند ١ ضغط جو ودرجة حرارة صفر مئوية يكون الواحد مول من الهواء يشغل حجم = ٢٢,٤١٥ لتر، وعند درجة حرارة أخرى (٢٠ °م) يكون حجم الهواء باللتر = ٠,٠٨٢ (٢٠ + ٢٧٣) (حيث درجة الحرارة معبر عنها الدرجة المطلقة).

$$\text{هنري } (H_u) = \frac{\text{مول أكسجين/ مول هواء}}{\text{مول أكسجين/مول ماء}} = \frac{\text{مول أكسجين} \times \text{مول ماء}}{\text{مول هواء} \times \text{مول أكسجين}} = \frac{\text{١ لتر ماء} \times \text{مول ماء}}{\text{٥٥,٦ مول ماء} \times \text{٠,٠٨٢} \times \text{٢٩٣ لتر هواء}}$$

$$= \frac{١}{٥٥,٦ \times ٠,٠٨٢ \times ٢٩٣} = \frac{١}{٠,٠٠٠٠٧٤٩} = ٧,٤٩ \times ١٠^{-٤} \text{ عند ٢٠°م}$$

أو أن ثابت هنري $(H_u) = ٧,٤٩ \times ١٠^{-٤}$ عند ٢٠°م × H

ويمكن تلخيص التحويل إلى الوحدات المختلفة على النحو الآتي:-

- ثابت هنري بوحدة لتر – جو / مول = " جو" / ٥٥,٦
- ثابت هنري بوحدة "جو" = ثابت هنري بوحدة لتر ماء / لتر هواء × ٥٥,٦
- ثابت هنري بوحدة "لتر ماء / لتر هواء" = ثابت هنري بوحدة "جو" / الثابت العام للغازات × درجة الحرارة المطلقة × ٥٥,٦
- ثابت هنري بوحدة لتر – جو / مول = لتر ماء / لتر هواء الثابت العام للغازات × درجة الحرارة المطلقة

الثابت العام للغازات = ٠,٠٨٢٠٥

جدول (١/٢) ثوابت هنري لبعض الغازات في الماء عند ٢٠°م[٥]

الغاز	الثابت (لتر ماء/ لتر هواء)
الأكسجين	٣٢,٥
ثاني أكسيد الكربون	١,١٤
كبريتيد الهيدروجين	٠,٣٨٩
الأوزون	٣,٧٧
الكلور	٠,٤٤٢
الأمونيا	٠,٠٠٠٥٧٤

تعتمد ذوبانية الأكسجين في الماء على خصائص الماء الفيزيائية والكيميائية، وكذلك على النشاط الكيميائي الحيوي به.

يؤدى نقص الأكسجين الذائب في الماء إلى ذوبانية للحديد والمنجنيز مما ينعكس سلبا على عملية المعالجة. كما تنشأ مشكلة الطعم والرائحة نتيجة تولد غاز كبريتيد الهيدروجين الذي يتكون في الظروف اللاهوائية. وبالتالي فتركيز الأكسجين الذائب بالماء قرينة مهمة تعكس كمّ التلوث الموجود به بطريقة غير مباشرة. وعندما ينعدم الأكسجين في الماء فهذا يعني أننا بصدد تلوث عالٍ وأصبح الماء آسنًا .

تعتبر المواد العضوية هي من مستهلكات الأكسجين الذائب في الماء، لذا فان معالجة المياه تهدف إلى إزالة تلك المواد. وهذا نلاحظه عندما نقيس تركيز الأكسجين المستهلك للمياه الخام، ثم نقيسه للمياه بعد المعالجة، فإذا زاد الفرق فهذا يعني أن المعالجة أزالت كمًّا كبيرًا من المواد العضوية، والعكس صحيح.

(تستخدم الطريقة التقليدية بالأكسدة بالبرمنجانات البوتاسيوم حيث تقوم البرمنجانات بأكسدة المواد العضوية ومن ثم تستهلك كمًّا مكافئًا من الأكسجين).

يزداد معدل انتقال الأكسجين إلى الماء (عند ثبات درجة الحرارة) مع العوامل الآتية:-

١- زيادة الفرق بين تركيز الأكسجين في حالة التشبع وتركيز الأكسجين عند زمن معين.

٢- زيادة مساحة السطح المعرض للهواء لوحدة الحجم من الماء (كما في الصورة السابقة).

٣- زيادة حركة الماء عند السطح الفاصل بين الماء والهواء.

وتعتبر درجة الحرارة عاملا مهمًّا في انتقال الأكسجين الى ومن الماء؛ حيث تؤثر درجة الحرارة على خصائص الماء والنفاذية الجزيئية للغاز خلالها، هذا في حالة عدم وجود إثارة أو تقليب للماء أو أن معدل الإثارة ثابت، أما في حالة زيادة معدل الإثارة للماء فهذا يجعل تأثير درجة الحرارة مهملا.[٦]

جدول (١/٣) ذوبانية الأكسجين في الماء المعرض للهواء المشبع بالماء عند ضغط جوي ٧٦ سم زئبق ودرجات حرارة مختلفة وتركيزين من الكلوريد[٧]

درجة الحرارة (°م)	تركيز الكلوريد* (مجم/لتر)	
	صفر	٥٠٠٠
صفر	١٤,٦	١٣,٧٢
٥	١٢,٧٥	١٢,٠٢
١٠	١١,٢٧	١٠,٦٥
١٥	١٠,٠٧	٩,٥٣
٢٠	٩,٧	٨,٦٠
٢٥	٨,٢٤	٧,٨٣
٣٠	٧,٥٤	٧,١٧

*تتأثر ذوبانية الاكسجين في الماء تأثرا طفيفا بتركيز الكلوريد فكلما زاد تركيز الكلوريد قلت ذوبانية الاكسجين.

٥ - ثاني أكسيد الكربون والاتزان الجيري

تحتوي المياه السطحية على أقل من ١٠ مجم/لتر من ثاني أكسيد الكربون، بينما تحتوي بعض المياه الأرضية على أكثر من ١٠مجم/لتر من هذا الغاز. والماء في حالته الطبيعية به عدد من المواد

الذائبة التي تؤثر علي خصائصه، وأكثر هذه المواد شيوعا هي بيكربونات الكالسيوم، وهذا المركب يكون في حالة غير ثابتة؛ حيث أنه يتحول إلي كربونات الكالسيوم غير الذائبة وينطلق ثاني أكسيد الكربون تبعا للمعادلة الآتية:-

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 \uparrow + H_2O + CO_2 \uparrow \qquad (١/٤)$$

ومركب كربونات الكالسيوم هو المكون الأساسي للقشور والترسبات التي تتكون علي جدران الغلايات وعلي وحدات التسخين عندما لا يكون هناك اتزان بين كربونات الكالسيوم و ثاني أكسيد الكربون.

تتحدد خصائص المياه من كونها عدوانية أو غير عدوانية من علاقة الاتزان بين بيكربونات الكالسيوم وثاني أكسيد الكربون، و تؤثر درجة الحرارة تأثيرًا بالغًا علي هذا الاتزان، فقد يكون هذا الاتزان متحققا عند درجة الحرارة العادية (درجة حرارة الغرفة)، بينما يختل هذا الاتزان في حالة ارتفاع درجة الحرارة وتتكون ترسبات جيرية ويحدث التآكل للأجسام المعدنية.

ثاني أكسيد الكربون (كلي)			
حُر		بيكربوناتي	
عدواني	مُتحد	نصف مثبت في كربونات الكالسيوم	مثبت في كربونات الكالسيوم

شكل (١/٥) الحالات المختلفة لتواجد ثاني أكسيد الكربون في الماء

يمتنع تكوّن ترسبات كربونات الكالسيوم وتصبح في حالة ذائبة وثابتة إذا احتوى الماء علي نسبة من ثاني أكسيد الكربون الحر التي تحقق التوازن مع بيكربونات الكالسيوم، وإذا احتوى الماء علي تركيزات عالية من ثاني أكسيد الكربون الحر أكثر من المطلوب لإحداث التوازن، لأصبح الماء ذي تأثير عدواني، وحينئذ تُعرف الزيادة من ثاني أكسيد الكربون بثاني أكسيد الكربون العدواني.

إذا احتوى الماء علي نسبة منخفضة من ثاني أكسيد الكربون الحر، ففي هذه الحالة يحدث خلل للتوازن الذي سبق الإشارة إليه، ويترسب مركب كربونات الكالسيوم الذي يؤدي إلي حدوث انسدادات للمواسير وترسبات علي أسطح السخانات وتكوّن قشور داخل الغلايات. نلاحظ ذلك عندما نقوم بغلي

الماء في الغلايات المنزلية، ونشاهد هذه الترسبات أيضا في وحدات التقطير المعملية. ويجب التخلص من تلك الترسبات أو القشور أو منع تكونها في الغلايات الصناعية.

ينقسم التركيز الكلي لثاني أكسيد الكربون إلي نوعين رئيسيين الأول يطلق عليه ثاني أكسيد الكربون الحر والثاني ثاني أكسيد الكربون بيكربونات الكالسيوم. (شكل ١/٥)

أن حساب حالة الاتزان نظريًا ليست بالأمر اليسير حيث أن ثوابت الاتزان المطلوبة و ثوابت التحلل والتفكك وثوابت حاصل الإذابة تعتمد جميعها علي درجة الحرارة و التركيز الكلي للايونات الأخرى في الماء. هذا يعني انه علي سبيل المثال الماء الذي يتواجد في حالة اتزان في شبكات المياه يمكن أن يُرَسِّب كربونات الكالسيوم علي الأسطح الداخلية للمواسير عند ارتفاع درجة الحرارة أو علي الأسطح الساخنة مثل المبادلات الحرارية.

٦- عسر المياه Water hardness

يلعب عُسر المياه دورًا جوهريًا في كيمياء المياه؛ حيث يعتمد العسر بصفة أساسية علي وجود ايونات الكالسيوم والماغنسيوم. ومن الناحية النظرية فان عنصر الاسترانشيوم والباريوم والألومونيوم والحديد والمنجنيز والزنك يساهمون في إحداث عُسر للمياه ولكنهم قد يتواجدون بتركيزات ضئيلة جدا و بالتالي فتأثيرهم مهمل مقارنة بالكالسيوم والماغنسيوم، ويعبر عن عُسر الماء بالملليجرام/لتر (كربونات الكالسيوم).

يقيس العُسر قدرة المياه على إحداث رغوة مع الصابون، وبالتالي يؤدى عُسر المياه إلي مزيد من استهلاك الصابون، ومن خلال هذا المفهوم فان المياه العسرة تكون مدركة من قبل المستهلك، وتختلف درجة قبول درجة العُسر من مجتمع لآخر، يعتبر الماء "يسر" إذا احتوت على أقل من ٧٥ مجم/لتر (كربونات كالسيوم)، وإذا تجاوز التركيز ٣٠٠ مجم/لتر فالماء يصبح شديد العُسر.[٨] جدول (١/٤)

جدول (١/٤) الدرجات المختلفة لعسر الماء

قيمة العُسر (مجم/لتر) (كربونات كالسيوم)	درجة العُسر
أقل من ٧٥	يسر
٧٥ ــ ١٥٠	قليل العُسر
١٥٠ ــ ٣٠٠	متوسط العسر
أكبر من ٣٠٠	شديد العُسر

عند تسخين الماء العسر المحتوي علي أكثر من ٢٠٠ مجم/لتر (كربونات كالسيوم)، تتكون ترسبات من كربونات الكالسيوم.

يعتمد حدوث تلك الترسبات علي عوامل هامة مثل:

- **الرقم الهيدروجيني - قلوية المياه - درجة الحرارة**

تتسبب الترسبات التي تتكون في داخل الغلايات في إحداث تأثير دراماتيكي؛ حيث تعمل ترسبات الكالسيوم والماغنسيوم كعازل حراري يحول دون انتقال الحرارة من وحدة التسخين إلى الوسط المراد تسخينه وتراكم تلك الترسبات يؤدي إلى احتراق وحدة التسخين نتيجة التسخين المتزايد. لذلك لابد من إزالة الأملاح من الماء لمنع ترسيبها داخل المنظومة الحرارية. وتجدر الإشارة إلي أن المياه المحتوية علي أقل من ١٠٠ مجم/لتر كربونات كالسيوم يكون لها قدرة تنظيمية منخفضة وبالتالي ينشا عنها عدوانية علي المواسير المعدنية.

٧- المخصبات في المياه Nutrients

تعتمد الطبيعة التركيبية الكيميائية لمياه المصدر على مستوى المغذيات والنشاط الميكروبيولوجى به، وهذه المغذيات تأتى من الاسرف في استخدام الأسمدة الزراعية وإلقاء مياه الصرف والمخلفات الزراعية في مصادر المياه والمواد المخصبة هي عبارة عن مركبات الفسفور ومركبات النيتروجين وهى بمثابة مسمدات تساعد على زيادة معدل النمو الطحلبي وبالتالي تهدد التوازن البيئي المائي.

أولا : الفوسفور

تأتي تسمية الفوسفور من الاسم اليوناني "فوس فوروس" و معناها الضوء. لا يتواجد الفسفور بصورته العنصرية في الطبيعة، ولكنه يكون مرتبطا مع الأكسجين مكونًا المركبات الفسفورية، ويتواجد الفسفور في حوالي ٢٠٠ مركبا كيميائيا، وتبلغ مساهمة كل فرد لهذا العنصر في المياه الصرف المنزلية بنسبة تتراوح ما بين ٢-٣ جرام فسفور في اليوم. وتأتي النسبة الأكبر منه من الغائط والبول وما يقرب من الثلث يأتي من المنظفات الصناعية. كما أن المجاري المائية المستقبلة لمياه الصرف المعالج تحصل علي الفسفور من الأنشطة الزراعية بالإضافة إلي النيتروجين الذي يمثل النسبة الأكبر.

يتواجد الفوسفور في ثلاثة مركبات رئيسية هي: الاورثوفوسفات و عديد الفوسفات و الفسفور المتواجد في المركبات العضوية، وعند الحديث عن الفوسفور فهذا يعني الثلاثة أنواع معًا . يتحلل عديد الفوسفات في المياه العادمة و تتكون مركبات الاورثوفوسفات الأكثر بساطة في تركيبها.

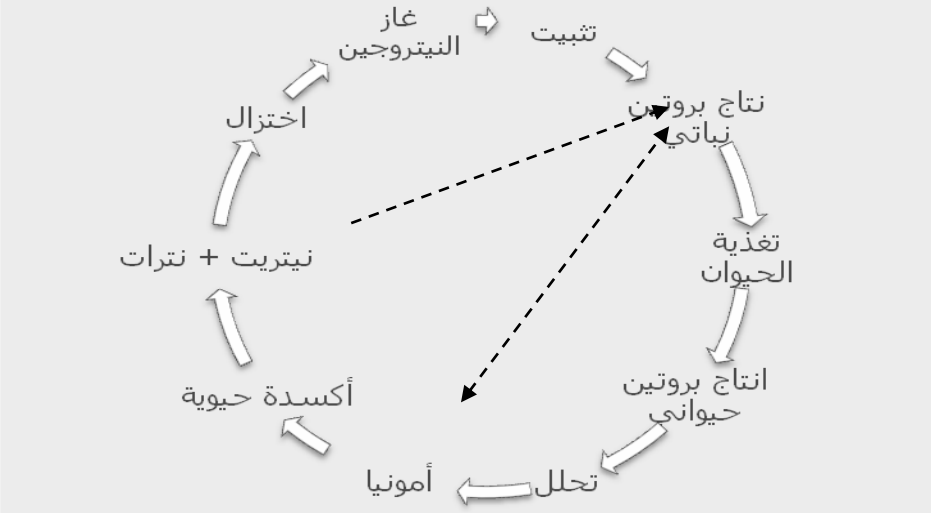
تتراوح نسبة الفوسفور العضوي ما بين ٣٠-٥٠ % من إجمالي تركيز الفوسفور في مياه الصرف الصحي وتكون في صورة غروية أو عالقة في المياه. تعمل المعالجة الميكانيكية في المحطات التقليدية لمعالجة مياه الصرف الصحي علي إزالة ما يقرب من ٣٠% من الفسفور وهذا يمثل الفوسفور المتواجد في صورة عالقة في الماء، وهذا الفوسفور يجد طريقه إلي مرحلة تثبيت الحمأ وتجفيفها.

تعمل المعالجة الحيوية التقليدية لمياه الصرف الصحي علي الإقلال من الفوسفور بنسبة تمنع تحلل المواد العضوية؛ حيث هناك دور كبير لعنصر الفوسفور في المعالجة البيولوجية؛ حيث يساعد علي نمو الكائنات الدقيقة باعتباره من المغذيات الحيوية مع النيتروجين. تحتوي الكتلة الحيوية في الحمأة علي ٢% فوسفور، وبتقدير تقريبي فان جرام من الفوسفور يلزم لتكسير أو تحلل ١٠٠جرام من المواد العضوية القابلة للتحلل الحيوي بفعل البكتريا.

يُزال الفوسفور في محطات المعالجة بطرق كيميائية أو حيوية، فنجد في بعض بلاد أواسط أوروبا وأمريكا الشمالية تتم إزالة مركبات الفوسفور من خلال الترسيب الكيميائي باستخدام مروبات الالومونيوم أو الحديد.

ثانيا: النيتروجين (الازوت)

النيتروجين هو العنصر السادس من حيث الشيوع في الكرة الأرضية، فيتواجد في الغلاف الحيوي والقشرة الأرضية والغلاف المائي والحيوي. يحتوي الهواء الجوي الجاف علي ٧٨% تقريبًا من النيتروجين. تأتي المركبات النيتروجينية في المجاري المائية بصفة أساسية من الغلاف الجوي ومن الأنشطة الزراعية (أكثر من ٨٠ %) وتأتي بعد ذلك المياه العادمة المنزلية. وتختلف تلك المصادر من مجتمع لآخر تبعا للممارسات الزراعية والأنماط الغذائية ولعنصر النيتروجين دورة في الطبيعة (شكل ١/٦)، وتعتبر أملاح النيتروجين هي مصادر النيتروجين اللازم للنبات.



شكل (١/٦) دورة النيتروجين في الطبيعة

جدول (١/٥) الأشكال التي يتواجد عليها عنصر النيتروجين

الشكل	البيان
غاز النيتروجين (N_2)	يشكل حوالي ٧٨% تقريبًا من الغلاف الجوي للأرض.
أيون الامونيوم (NH_4^+)	ينتج من تحلل النيتروجين المتحد عضويا وهو سهل الامتصاص للنباتات المائية والأرضية.
النشادر (NH_3)	يتكون عند ارتفاع الرقم الهيدروجيني للمياه المحتوية علي ايون الامونيوم. يذوب بصورة سريعة للغاية في الماء، وهو غاز سام.
النترات (NO_3^-)	تنتج النترات من أكسدة النشادر، وتكون أملاحا باتحادها مع بعض الفلزات، وهي سهلة الامتصاص بواسطة النبات.
النيتريت (NO_2^-)	هي مرحلة وسطية لأكسدة النشادر إلي النترات.
البروتين (CHNO)	يشكل البروتين وحدة البناء الأساسية لأنسجة النبات والحيوان والإنسان، وعنصر النيتروجين هو المكون الأساسي لكل أنواع البروتين مع كل من الكربون والهيدروجين والأكسجين.

تتواجد المركبات النيتروجينية في المجاري المائية والمسطحات المائية في صورة ذائبة وإذا لم يحدث لها إزالة فإنها تتراكم، وتؤدي عمليات الأكسدة الحيوية بفعل البكتريا أو غير الحيوية بفعل الأكسجين إلي تكون مركبات النيتريت (الازوتيت) ثم النترات (الازوتات)، وهذه العمليات يطلق عليها مصطلح التأزت "Nitrification". وتقوم عمليات أخري بعكس هذه العمليات بفعل البكتريا اللاهوائية لتكوّن غاز النيتروجين ويطلق علي هذه العمليات مصطلح "Denitrification". فإذا حدثت بفعل ميكروبات التأزت فيطلق عليها التأزت الحيوي bionitrification والذي يحدث علي مرحلتين:

المرحلة الأولي: أكسدة ايون الامونيوم إلى نيتريت كما في المعادلة الآتية:-

$$2NH_4^+ + 1.5O_2 \rightarrow 2NH_2OH + H_2 \quad (١/٥)$$

$$2NH_2OH + H_2O + 0.5O_2 \rightarrow N_2H_2O_2 + 2H_2O \quad (١/٦)$$

$$N_2H_2O_2 + H_2O + O_2 \rightarrow 2HNO_2 + H_2O + E \quad (١/٧)$$

وفي هذه المرحلة يتحول ايون الامونيوم الى هيدروكسيل أمين NH_2OH (ثم الى حامض هيبونيتروز ($N_2H_2O_2$) ثم إلى حامض النيتروز (HNO_2).

المرحلة الثانية: أكسدة النيتريت (حامض النيتروز) الى النترات (حامض النيتريك) كما في المعادلة الآتية:-

$$2HNO_2 + O_2 \rightarrow 2HNO_3 + E \quad (١/٨)$$

تقوم كثير من الميكروبات بهذين التفاعلين بعضها عضوي التغذية مثل فطر اسبرجيلاس Aspergillus niger وبكتريا ارثروباكتر Arthrobacter (بكتريا عصوية سالبة الجرام) أو بكتريا معدنية التغذية مثل نيتروزوموناس Nitrosomonas، ونيتروزوكوكاس Nitrosococcus، ونيتروزوسبيرا Nitrosospira، حيث تحول ايون الامونيوم الي نيتريت، وهناك ميكروب آخر مثل نيتروباكتر اجيليس Nitrobacter agilis يقوم بتحويل النيتريت إلى نترات. ونظرًا إلى أن مركب النيتريت له تأثير سام على النشاط الحيوي لميكروبات التأزت، فان معدل أكسدتها إلى النترات يكون أعلى من معدل أكسدة الأمونيا إلى النيتريت.

تقوم الكائنات الدقيقة بتثبيت النيتروجين الحيوي وتحويله إلي مركبات نيتروجينية عضوية وهذا يمثل النسبة الأكبر للنيتروجين العضوي.

قد تتواجد النترات في المياه الطبيعية بتركيزات منخفضة وقد تكون معدومة ولكنها تزيد نتيجة صرف المخلفات الزراعية المحملة بالأسمدة إلي المياه السطحية أو الأرضية أو الارتشاح من خزانات تجميع مياه الصرف الصحي. قد يصل تركيز النترات في المياه السطحية إلي ٢ مجم/لتر، ويرتفع هذا التركيز في بعض مياه الآبار.

يصل ما يتناوله الفرد من النترات في اليوم حوالي ٢٠ مجم/لتر، يأتي أغلبها من الخضروات مثل: الخس والكرفس والبنجر والسبانخ[٩] ، والجزر والكرنب والفجل والخيار والفاصوليا الخضراء كما

يوجد في الذرة الشامية والذرة الصفراء، ولا تتواجد النيتريت في المياه الطبيعية بكميات كبيرة إلا عند حدوث الظروف اللاهوائية المختزلة، فقد تتواجد عند احتواء المياه علي الأمونيا بكميات كبيرة.

وجدير بالذكر انه تستخدم نيتريت الصوديوم كمادة مضافة إلي اللحوم المعبأة والبيرة. وحينما تزداد تركيزات مركبات النيتريت في المياه فهذا يشكل خطورة علي صحة الأطفال نتيجة سمية مركبات النيتريت، وقد تنشأ من اختزال مركبات النترات.

تتسبب مركبات النيتريت في تفاعلات كيميائية داخل الجسم محدثة تأثيرات ضارة على الصحة (تسمم الدم) للأطفال ذوي الأعمار الأقل من سنة. تتواجد مادة ميتهيموجلوبين بنسب تتراوح ما بين ١ - ٣ % في الدم وهو الشكل المؤكسد للهيموجلوبين، وهذا الشكل لا يحمل الأكسجين في الدم. يقوم ايون النيتريت كعامل مختزل على اختزال النترات من خلال تفاعل النترات مع سائل اللعاب في الفم عند الأطفال دون العام. كما تسمح الظروف القلوية لمعدة هؤلاء الأطفال، بأن تقوم البكتريا بتحويل النترات إلي نيتريت بنسبة ١٠٠% بفعل البكتريا مقارنة بنسبة ١٠ % للكبار والأطفال الأكبر من سنة.

لا تحدث للأطفال دون العام استعادة الهيموجلوبين من الميتهيموجلوبين عندما يزيد تركيز الميتهيموجلوبين إلي المدى ٥ - ١٠ % وبالتالي تظهر أعراض الخمول وضعف التنفس ويتلون الجلد باللون الأزرق، ويحدث الاختناق والموت عند التركيزات العالية من النيتريت والنترات. ونظر لخطورة هذه المركبات فقد وضعت الجهات المعنية بالصحة العامة حدود قصوى لتلك المركبات على النحو الموضح بالجدول (١/٦):-

جدول (١/٦) الحدود القصوى المسموح بها لمركبات النترات والنيتريت ببعض المواصفات

المركب / المواصفة	نترات (NO_3^-)		نيتريت (NO_2^-)		النيتروجين الكلي
	نترات	نيتروجين	نيتريت	نيتروجين	
القياسية المصرية، ٢٠٠٧[١٠]	٤٥	١٠	٠,٢	٠,٠٦	-
منظمة الصحة العالمية، ٢٠١١[١١]	٥٠	١١	٣	٠,٩	١٠
الوكالة الأمريكية لحماية البيئة، ٢٠١١[١٢]	٤٥	١٠	٣	١	١٠

تتفاعل أملاح النيتريت مع بعض نواتج تحلل المبيدات التي قد تتواجد في المياه السطحية مما يؤدي الي تكوّن نيتروزومينات وهي مركبات مسببة للسرطان كما أن هناك سُمية تنشأ عن ايونات النشادر التي تتحول إلي غاز النشادر السام عند ارتفاع الرقم الهيدروجيني، وهي تسبب تسمم للأسماك. وفي

حالة اختزال النترات وانطلاق الازوت يصاحبه تكون بعض الأكاسيد النيتروجينية مثل أكسيد النيتروز (N_2O) وأكسيد النيتريك (NO) وثاني أكسيد النيتروجين (NO_2)، وهذه الأكاسيد إذا وصلت إلي جسم الإنسان فإنها تتفاعل مع الأمينات الموجودة بخلايا الجسم وتتحول الي مركبات النيتروزامين المسرطنة.

وتشير الدراسات الراهنة إلى أن النيتروزامينات تتكون أيضا نتيجة تفاعل الكلور مع المواد العضوية الطبيعية.[١٣]

تعمل محطات المعالجة الكيميائية الحيوية والكيميائية علي إزالة النيتروجين من المياه العادمة، وتعتبر المعالجة الكيميائية هي الأكثر تكلفة وتستخدم في الأحوال التي تكون الطرق الحيوية غير فعالة كما هو الحال مع المياه العادمة الصناعية.

٨ - المحتوى الميكروبيولوجي

يكمن الخطر في هذا المحتوى الميكروبيولوجي في كونه مصحوبا بكائنات مسببة للأمراض، وتتمثل مصادر هذا التلوث في الآتي:-

- مياه الصرف المنزلية إلى مصادر المياه - الأنظمة البدائية لتجميع مياه الصرف (ترنشات)
- تواجد المزارع الحيوانية والمراعى غير الصحية - استخدام مسطحات أرضية لنشر المخلفات الحيوانية

وقد تتسبب الأنشطة الزراعية في تلوث المياه بطفيليات البروتوزوا مثل الجياردیا لامبيليا والكريبتوسبوريديوم. وتستخدم بكتريا القولون (كولي فورم) كدلائل لتواجد كائنات تسبب الأمراض للإنسان، ويشير تواجد البكتريا القولونية الغائطية إلى التلوث الناجم عن الحيوانات ذات الدم الحار.

تشير بعض الدراسات الى أن بعض أنواع البكتريا الممرضة (سيدوموناس ايوجنوزا Pseudomonas aeuginosa)، ايروموناس (.Aeromonas spp)، وستافيلوكوكاس اوريوس Staphylococcus aureus) قد تتواجد على الرغم من خلو الماء المعالج من البكتريا الدليلية، وقد يرجع ذلك الى تلوث طارئ بشبكات التوزيع أو تلوث بالخزانات بالمنشآت[١٤].

٩- الخصائص الجمالية للمياه

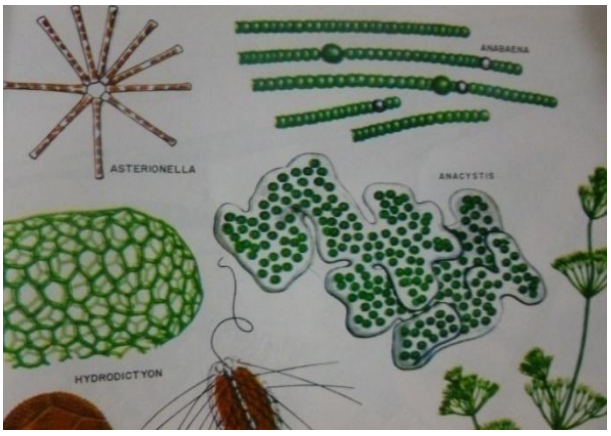
تشتمل الخصائص الجمالية للمياه على المذاق و الرائحة واللون و العكارة والقدرة التلوينية.

أ- المذاق والرائحة

يأتي المذاق والرائحة المنفرة للمياه من جراء التلوث بالكيماويات الصناعية ، ويأتي أيضا من نواتج العمليات الحيوية التي تقوم بها الطحالب ونواتج تحلل البقايا النباتية، كما أن هناك مواد عضوية طبيعية تعطى هذا التأثير، وقد تنشأ الرائحة والمذاق من تفاعل الكلور مع المواد العضوية أثناء عمليات المعالجة. وتعتبر الرائحة والمذاق من المؤشرات علي حدوث بعض أشكال التلوث أو سوء التشغيل لوحدات المعالجة.

يختلف الاحساس بمذاق الكلور لدى الناس، فالعديد يشعر بمذاق الكلور عند تركيز ٠,٢ مجم/لتر، بينما يشعر بعض الناس بمذاق احادي كلورامين عند تركيز ٠,٤٨ مجم/لتر.[١٥]، والبعض يشعر بمذاق للكلور عند تركيز ٠,٣ مجم/ لتر[١١]، وعندما يصل تركيز كلور الى المدى من ٠,٦ – ١ مجم/لتر كلور تكون هناك رائحة غير مقبولة لبعض الناس[١٥]، وعلي الرغم من أن الكلور يقلل من العديد من مشاكل المذاق والرائحة من خلال أكسدة المركبات المسببة لتلك الخصائص، إلا أنه يتفاعل مع المواد العضوية مسببا مشاكل مذاق ورائحة أخري جديدة. عند تكون ثنائي كلورامين أو ثلاثي كلورامين تظهر رائحة شديدة.

وهناك روائح تنشأ من تفاعل الكلور مع الفينول إن وجد في المياه. وهناك نواتج ثانوية لعملية التطهير بالكلور مثل الكلوروفورم الذي يعطي رائحة عندما يصل تركيزه الى ٠,١ مجم/لتر،[١٥] والبروموفورم الذي يعطي رائحة عند تركيز ٠,٣ مجم/لتر.



ليس لجرعات الكلور المستخدمة في تطهير مياه الشرب تأثير سلبي علي صحة الإنسان والحيوان، وقد بنيت القيمة الدليلية للحد الأقصى المسموح من الكلور الكلي في مياه الشرب (٥ مجم/لتر) علي أساس أن الحد الأقصى اليومي المسموح به ١٥٠ ميكروجرام كلور/ كيلوجرام من وزن الجسم يوميا[١١]. فإذا كان

وزن الجسم ٦٠ كجم فيكون المتناول اليومي ٩٠٠٠ ميكروجرام (٩ مجم)، ويصل هذا إذا تناول الفرد ٢,٠ لتر تقريبا من الماء المحتوي علي الحد الأقصى الموصى به في اليوم.

تتحقق فعالية التطهير إذا تبقى كلور حر ≤ ٠,٥ مجم /لتر بعد فترة مكوث لا تقل عن ثلاثين دقيقة عند رقم هيدروجيني أقل من "٨"، ولا ينبغي أن يقل الكلور عند أي نقطة من نقاط شبكة التوزيع عن ٠,٢ مجم /لتر

وهناك نوعيات من الكائنات الدقيقة تسبب مذاقًا ورائحة للمياه مثل بكتريا اكتينومايسيس وبكتريا الحديد والكبريت والطحالب الخضراء الزرقاء. (ملحق ب)

وينتج عن عمليات الهدم الحيوي التي تقوم بها بكتريا اكتينومايسيتس والطحالب الخضراء الزرقاء مادتي **الجيوسمين والمثيل ايزوبرنيول**، وهاتان المادتان تسببان الرائحة الطينية الأرضية العطنة للمياه عند تركيزات منخفضة جدا (أجزاء من التريليون)، وقد تم استخلاصهما من أجناس **اكتينومايسيتس مثل اكتينومايسيتس نوكارديا** (Actinomycetes nocardia) **وستريبتومايسيتس** (Striptomycetes)ومن الطحالب الخضراء الزرقاء (Blue green algae) مثل: **أنابينا واوسيلاتوريا**. ولكلا المادتين مستوي الإحساس بالرائحة عند تركيز أقل من ١٠ نانو جرام.[١٥]

وقد يحدث في بعض أنواع المياه الأرضية وفي شبكات التوزيع تكون رائحة كبريتيد الهيدروجين وهذه الرائحة تنشأ في الظروف اللاهوائية حينما تقوم البكتريا اللاهوائية باختزال الكبريتات، ويمكن الإحساس برائحة البيض الفاسد عند تركيز ٠,١ ميكروجرام/لتر.[١١]

يرتبط المذاق كثيرًا بالأملاح، فالماء العذب يحتوي على تركيز من الكلوريد أقل من ٢٥٠ مجم/لتر. وتكون الأملاح مقبولة لبعض المستهلكين عندما تحتوي على أقل من ١٢٠٠ مجم/لتر (أملاح كلية شاملة الكلوريد والكبريتات والكربونات)، ومن المفضل ألا تتجاوز الأملاح الكلية الذائبة ٦٥٠ مجم/لتر. هناك أملاح يكون لها تأثير ملحوظ علي المذاق مثل كلوريد الماغنسيوم وبيكربونات الماغنسيوم، وهناك أملاح أخري مثل كبريتات الماغنسيوم وكبريتات الكالسيوم تكون غير منفرة.

لا يكون للكبريتات مذاق محسوس عند تركيزات أقل من ٢٥٠ مجم/لتر، ويكون للكلوريدات مذاق ملحي إذا تجاوز تركيزها ٢٥٠ مجم/لتر، [٥] ويتراوح المدى المقبول لمذاق أنيون الكلوريد اعتمادا عل نوع الكاتيون المصاحب ما بين ٢٠٠ – ٣٠٠ مجم/لتر لكلوريد الصوديوم،والبوتاسيوم

والكالسيوم. ويتراوح المدى المقبول لتذوق الكالسيوم من ١٠٠- ٣٠٠ مجم/لتر اعتمادًا علي نوع الأنيون المتحد مع الكالسيوم (كبريتات أو كربونات أو كلوريدات). كما تعطي الفلوريدات رائحة للمياه إذا تجاوز تركيزها ٢,٤ مجم/لتر.[٥]

تؤثر الكبريتات عند تركيزات معينة علي مذاق المياه، فنجد المذاق المثالي لكبريتات الكالسيوم يكون عند ٢٥٠ مجم /لتر، ولكبريتات الماغنسيوم عند ٢٧٠ مجم/لتر، وكبريتات الصوديوم ٩٠مجم/لتر. كما أن هناك بعض العناصر التي تعطي للمياه مذاق عندما تكون ذات تركيزات معينة مثل الحديد والنحاس والمنجنيز والزنك، وقد وضعت مستويات الإحساس بالمذاق لتلك العناصر. (جدول ١/٧)

جدول (١/٧) مستويات الإحساس بالمذاق لعنصر الزنك والنحاس والحديد والمنجنيز في المياه[٥]

العنصر	الزنك	النحاس	الحديد	المنجنيز
مدي التركيز (مجم/لتر)	٤- ٩	٢ – ٥	٠,٠٤ – ٠,١	٤ – ٣٠

تصبح المياه شديدة الملوحة "أجاج" إذا كانت مشبعة بأملاح الكلوريد التي قد تصل إلى أكثر من ٤ % كما في مياه البحر الأحمر، أو تقل قليلا كما في مياه البحر المتوسط. وقد تصل الأملاح الكلية الذائبة إلى ٤٠ % كما في مياه البحر الميت التي لا تسمح بحياة الكثير من الكائنات الحية، وتستغل حاليا مياه البحر الميت لإنتاج العديد من الأملاح ذات القيمة الاقتصادية مثل أملاح البوتاسيوم.

ب - اللون

ينشأ اللون من تواجد بعض الفلزات المتواجدة بصورة طبيعية في المياه مثل الحديد والمنجنيز والمواد العضوية الطبيعية مثل الأحماض الدبالية (الهيوميك و الفولفيك). يعمل وجود العكارة علي زيادة الإحساس باللون ويكون لونًا ظاهريًّا وغير حقيقي، أما اللون الحقيقي فهو لون الماء بعد إزالة العكارة منه. يُزال اللون من خلال عمليات الترويب والتجميع والترسيب والترشيح. يتراوح لون المياه النقية النموذجية ما بين ٣ - ١٥ وحدة كوبالت- بلاتين وتكون العكارة أقل من ١ وحدة نفيلومترية، ويكون اللون مقبولا إذا كان أقل من ١٥ وحدة كوبالت – بلاتين.

ج- العكارة

تنشأ العكارة من تواجد جسيمات غروية عالقة (غرين- طفلة) وطحالب غير قابلة للترسيب. يؤدي ارتفاع العكارة في المياه المعالجة إلى حماية الكائنات الدقيقة من تأثير المطهرات مثل الكلور كما تعمل العكارة علي تحفيز النشاط البكتيري، لذلك لا بُد من أن تكون العكارة أقل ما يمكن حتى يكون التطهير فعالا، وقد حددت منظمة الصحة العالمية في عام ٢٠١١ قيمة للعكارة لا تتجاوز "١" وحدة نفيلومترية بمياه الشرب.

د- القدرة التلوينية للمياه

يقوم الماء بتلوين الأجسام التي تلامسها إذا احتوت على بعض مركبات الفلزات ذات التأثير التلوينى مثل أكاسيد الحديد والمنجنيز والنحاس. وقد تحتوي بعض المياه الأرضية التي تعرضت للتهوية ذات الرقم الهيدروجيني الذي يتراوح ما بين ٥- ٨ علي تركيز حديديك في ألمدي من ٠,٠٥- ٠,٢ مجم/لتر، ويؤدي هذا إلى تلوين الأجسام التي تنساب عليها تلك المياه مثل أحواض الغسيل وأحواض الاستحمام.

قد تحتوي المياه الأرضية علي حديد يتراوح ما بين ١- ١٠ مجم/لتر، وقد تصل إلي ٥٠ مجم/لتر حديدوز عند تركيز منخفض من البيكربونات والأكسجين. وعند خروج الماء من البئر فسرعان ما تتكون به ترسبات ذات لون بني محمر من هيدروكسيد الحديديك بمجرد تعرضه للهواء الجوي.

وتُعتبر الطحالب من أهم العوامل المؤثرة علي الخصائص الجمالية للمياه فتؤدى الى تغير المذاق والرائحة واللون وتسبب مشاكل تشغيلية بمحطات المعالجة. وقد تفرز بعض الطحالب سمومًا تؤثر علي الأحياء المائية والإنسان بالتبعية.

ه- تكون الزبد على سطح الماء (الفوم)

تحتوي المياه على مركبات عضوية ذائبة، بعض هذه المواد نشطة نتيجة وجود مجموعات وظيفية نشطة بها وكما هو الحال في حالة الصابون، فإن هذه المركبات النشطة تقلل من التوتر السطحي للماء، وعندما يقل التوتر السطحي للماء تظل الفقاعات الهوائية التي تكونت بفعل الحركة الاضطرابية للماء وتزداد مع الوقت مكونة ما يعرف بالرغوة أو الزبد أو الغثاء.

طبيعة المواد العضوية المكونة للفوم

تأتي المواد العضوية المسببة الفوم من تحلل الطحالب والبقايا النباتية المتواجدة بالمياه السطحية بصورة طبيعية. وهناك مواد عضوية طبيعية مثا الأحماض الدهنية الكربوكسيلية الناتجة من اللبيدات واللجنين والأخشاب. تتحرر هذه المركبات في الماء، ويمكن التعبير عن كم المواد العضوية بمقياس يعرف بالكربون العضوي الذائب. (Dissolved Oxygen Demand)، ومع تواجد هذه المركبات في الماء يكتسب الماء اللون الأصفر أو البني الفاتح.

في محطات معالجة مياه الصرف الصحي ينشأ الفوم من مركبات مصنعة مثل المنظفات الصناعية (Detergents) التي تحتوي على مركبات نشطة (Surfactants). وهناك مركبات أخرى تسبب تكون الفوم مثل مستحضرات التجميل والشامبو، ومركبات تسبب رغوة شديدة مثل: الكايل بنزين سالفونات متفرعة التركيب، وهذه المركبات غير قابلة للتحلل الحيوي.

بعض المنظفات تحتوي على الفوسفات وخصوصا المواد التي تستخدم في ازالة العسر من الماء وتزيد من فعاليتها (Surface – active)، وعلى الرغم من أن الفوسفات ينشط عمل المركبات ذات الفاعلية في المنظفات الا أنها تسبب زيادة النمو الطحلبي بكثافة لكونها مخصبات وتعمل على ازدهار النباتات المائية على نحو شديد مما يؤدي الى تدهور البيئة المائية وحدوث ما يعرف بالتخصيب الزائد (Eutrophication) . ولتجنب حدوث مثل هذه التأثيرات السلبية فقد استبعدت مجموعات الفوسفات في المنظفات واستُبدِلت بأخرى محتوية على مركبات الكايل بنزين سالفونات خطية التركيب القابلة للتحلل الحيوي مثل: كبريتات اللورايل أو لوريل الصوديوم أو الأمونيوم.

تستخدم المواد النشطة سطحيا في صناعات عديدة مثل دباغة الجلود ازالة الأحبار الطلاء الدهانات مبيدات الآفات البلاستيك استخلاص وانتاج الزيوت. يتميز الفوم الناشئ عن المنظفات العضوية بأنه تكون بيضاء اللون ولها رائحة.

كيف تؤثر المواد النشطة على التوتر السطحي للماء؟

التوتر السطحي: هو خاصية للماء يأتي من تماسك جزيئاتها مع بعضا بعضا، وهذا التماسك يعطي الماء القدرة على تشكيل قطرات الماء، ويسهم في احداث الموجات والتيارات المائية التي تلعب دورا هاما في توزيع الحرارة والغازات الذائبة والمخصبات والكائنات الدقيقة والنباتات المائية.

يسبب التوتر السطحي تكون غلالة رقيقة علي السطح الفاصل بين الماء الهواء، وهذه الغلالة الرقيقة تسمح للحشرات أن تتحرك على سطح الماء وتتوالد عليه يرقات تلك الحشرات.

المواد ذات النشاط السطحي: هي مواد تتواجد على اليابسة وفي الماء بعضها يكون محب للماء والبعض الآخر يكون كاره لها. تعمل الماد المحبة للماء على تكوين روابط مع جزيئات الماء، وتتجاذب مع بعضها بعضا على حساب التجاذب بين جزيئات الماء، وبهذه الآلية، فإن تلك المواد تقلل من قوى التجاذب بين جزيئات الماء وهذا بدوره يقلل من التوتر السطحي للماء، وتصبح الماء أكثر انسيابية ومرونة وعندما يخض الماء بعنف تتكون فقاعات تظل متماسكة وباقية لفترات من الوقت.

كيف ينشأ الفوم؟

يعتبر الانخفاض في التوتر السطحي الناشئ عن تواجد المواد العضوية المحبة للماء هو السبب في تكون الفوم بالاضافة الى عامل آخر وهو الحركة العنيفة للماء التي تعمل على تكون فقاعات هواء. يكتسب الفوم اللون الأبيض عند بداية تكوينه، وتكون له رائحة الأسماك أو الأعشاب المقطوعة حديثا، أو رائحة طينية، ومع مرور الوقت يتحول اللون الأبيض الى البني الفاتح. يتكون الغثاء أثناء فترات الخريف وبداية الشتاء نتيجة تساقط أوراق الأشجار في المياه السطحية التي تتحلل مع الوقت مكونة مواد عضوية ذائبة.

إذن لا بُد لابد من تدارك أي تغير جوهري في أي بند من البنود سالفة الذكر لأنه قد يؤدى إلى مشاكل عديدة ابتدءً من النواحي الجمالية وانتهاءً بالتأثيرات الصحية الخطيرة للمياه وبالتالي الصحة العامة للإنسان. يوضح الجدول (١/٨) بنود نوعية المياه من حيث المصدر والتأثير.

جدول (١/٨) البنود المهمة لنوعية المياه من حيث المصدر والتأثير على جودة المياه

البند	المصدر	التأثير
المواد الصلبة (العكارة)	مياه الصرف المنزلية والأنشطة الزراعية والملاحية وأنشطة تنمية مجري النهر والترع والرياحات	- إعاقة عملية المعالجة - تقليل كفاءة المعالجة - حجب المطهرات عن الكائنات الدقيقة مما يحول دون وصول المطهر إليها وتصبح في مأمن من تأثيرها.
المغذيات (المخصبات)	- الارتشاح الناتج عن أنظمة تجميع المخلفات (ترنشات) - صرف المياه العادمة الصناعية الي مصادر مياه الشرب. - صرف المياه الزراعية ومياه المزارع الي مصادر مياه الشرب.	- تواجد النترات التي قد تكون سامة للأطفال الرضع والأجنة عند تركيزات معينة. - التعجيل بحدوث عواقب التسميد الزائد. - زيادة تعداد الطحالب. - تناقص الأكسجين الذائب. - زيادة نشاط الطحالب. - زيادة العكارة واللون. - تكون نواتج ثانوية أثناء عملية التطهير بالكلور. - نشوء مشاكل المذاق والرائحة.
المواد العضوية الطبيعية	- تتواجد بصورة طبيعية نتيجة تواجد الأحياء المائية من نباتات وحيوانات.	- تؤثر على المغذيات - تحرك المواد العضوية الكارهة للماء. - تتسبب في تكون المواد العضوية الثانوية للتطهير. - تكون رغاوي على سطح الماء.
الملوثات العضوية الصناعية	- الأنشطة الصناعية والزراعية والمنزلية. - الانسكابات والتسريبات. صرف المياه العادمة الي مصادر مياه الشرب.	- التأثيرات العكسية على البيئة المائية والصحة العامة للإنسان والحيوان.
بكتريا القولون	- مياه الصرف المنزلية. - مياه الصرف العادمة. - الارتشاح والتسرب من أنظمة تجميع مياه الصرف المنزلية. - المزارع الحيوانية. - مزارع الطيور. - طرح المخلفات الصلبة الحيوانية علي الأراضي.	- تواجد البكتريا القولونية الغائطية، وتعتبر دلائل علي التلوث بالمخلفات الغائطية للحيوانات ذات الدم الحار والتي تشكل خطرا نتيجة التلوث بالمسببات المرضية الميكروبية مثل الجياردیا والكريبتوسبوريديوم والفيروسات.

تابع جدول (١/٨) البنود الهامة لنوعية المياه من حيث المصدر والتأثير على جودة المياه

البند	المصدر	التأثير
الفلزات	- الأنشطة الصناعية. - صرف المياه العادمة الي مصادر المياه السطحية.	- إحداث تأثيرا عكسيا علي البيئة المائية والصحة العامة.
الزيوت والشحوم	- مياه الصرف المحتوية علي الزيوت والشحوم التي تجد طريقها الي مصادر المياه السطحية. - الانسكابات البترولية أثناء نقل البترول، وتسرب الكيروسين أثناء الممارسات الملاحية. - التشحيم بمحطات خدمة السيارات. - المخلفات الغذائية ومخلفات الطهي. - الأنشطة الصناعية.	- التداخل أثناء عمليات المعالجة البيولوجية مما يؤدي الي تقليل أو انعدام الكفاءة. - إحداث مشاكل أثناء إجراءات الصيانة. - تكون بشكل غير مستحب نتيجة التراكم المستمر والتصاق الشوائب الأخرى عليها. - التأثير السلبي على الأحياء المائية. - التأثير السلبي على الصحة العامة نتيجة تواجد مركبات الهيدروكربونات.
جماليات المياه (الطعم ،الرائحة، اللون، العكارة، القدرة، التلوينية)	- الكيماويات الصناعية. - النواتج الهضمية التي تنتجها الطحالب. - المواد العضوية الطبيعية. - اليوريا. - بعض الفلزات مثل الحديد. - المواد العضوية الطبيعية. - مواد صلبة وطحالب. - تواجد الفلزات مثل الحديد	- فقدان ثقة الجماهير في نقاء وصلاحية مصدر المياه للشرب.
الطحالب	- صرف المياه العادمة إلي مصادر المياه. - أنظمة التجميع للمياه المنزلية. - الارتشاح من التربة. - الأنشطة الزراعية.	- المذاق والرائحة. - صعوبة الترسيب في المروقات - انسداد المرشحات. - بعض الطحالب تكون سامة للبيئة المائية.
تناقص الأكسجين الذائب	- تواجد مواد عضوية. - مياه الصرف العادمة. - الاستهلاك بواسطة الكائنات المائية والمواد الكيميائية.	- مشاكل في محطات المعالجة. - ذوبان الحديد والمنجنيز. - مشاكل المذاق والرائحة. - تكون الأمونيا.

العوامل المؤثرة على نوعية مياه المصدر (مياه سطحية)

يمكن تقسيم العوامل المؤثرة على نوعية المياه إلى عوامل طبيعية وعوامل بشرية، ويمكن توضح تلك العوامل على النحو التالي:-

أولا: العوامل الطبيعية

تتمثل هذه العوامل في المناخ، طبوغرافية المناطق التي تستقبل مياه المطر، وجيولوجية المكان الذي تنساب فيه الماء، تواجد مركبات غير عضوية محتوية على عنصري الفسفور والنيتروجين، التداخل مع المياه المالحة، وحدوث طبقية لمصدر المياه (أي يصبح مصدر المياه عبارة عن طبقات متفاوتة في درجة نقائها أو في درجة احتوائها علي عناصر الجودة). وسوف نتناول تأثيرعمق المصدر المائي على نوعية المياه.

تأثير عمق المصدر على نوعية المياه

أ- **في فصل الصيف؛** تختلف الكثافة النوعية أو الطبقة الحرارية لمصادر المياه الضحلة الأقل من ٢٠ قدمًا والعميقة الأكثر من ٢٠ قدمًا[١٦]، فبالنسبة للأجسام المائية الضحلة: تعتمد درجة الحرارة وتركيزات الأكسجين في الماء على هبوب الرياح المسببة للخلط مع الهواء. وعندما ترتفع درجة حرارة المياه المتواجدة على السطح بالمقارنة بالمياه المتواجدة في القاع فتنشأ طبقية في عمود المياه (اختلاف نسبى في كثافات الطبقات) نتيجة الاختلاف في درجات الحرارة فيقل الأكسجين الذائب في منطقة التماس مع رواسب القاع مكونة ظروف بيئية لا هوائية تحفز النشاط الميكروبيولوجى غير الهوائي، وبالتالي تؤدى هذه الظروف إلى ذوبانية المغذيات والمعادن من رواسب القاع وهذا يعمل على تكوين أو زيادة رائحة ومذاق ولون وعكارة المياه.

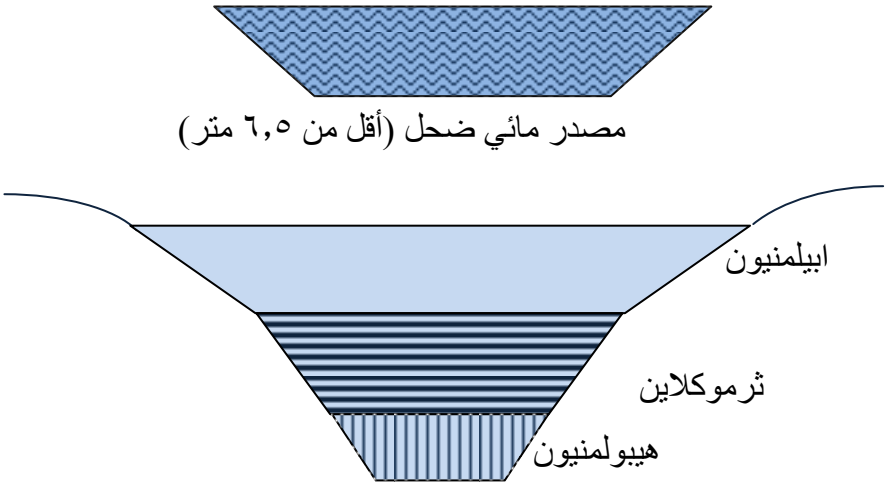
هناك تفاعلان مهمان يؤثران على نوعية المياه تحت الظروف اللاهوائية هما:-

- اختزال الكبريتات وتكون غاز كبريتيد الهيدروجين.

$$SO_4^{2-} + 8H^+ + 6e^- \rightarrow H_2S + 2H_2O + 2OH^- \quad (١/٩)$$

- وإذا تواجد مركب فوسفات الحديد فيحدث تفاعل مع غاز كبريتيد الهيدروجين ويتكون كبريتيد الحديد ويتحرر الفوسفات ذائبا في الماء.

$$3H_2S + 2FePO_4 \rightarrow 2FeS + S + 2H_3PO_4 \quad (١/١٠)$$



شكل (٧) طبقية الجسم المائي (طبقية توزيع الكثافة أو الطبقية الناشئة عن الحمل الحراري)

ب- **في فصل الشتاء**؛ تنخفض درجة الحرارة وتقل فترات تعرضها للضوء، وهذا يعمل على خفض النشاط البنائي الضوئي و بالتالي تبقى المخصبات غير مستغلة وتتراكم ويزداد تركيزها وعندما يطول اليوم وترتفع درجة الحرارة وتزداد نسبة الضوء المتخلل للماء فيزداد البناء الضوئي ويستتبع ذلك نموًّا طحلبيًّا كثيفًا ويزدهر ويستمر النشاط الميكروبيولوجي حتى يصل إلى ذروته مستهلكا المخصبات المتاحة إلى أن يقضى على الكثير منها وتعود إلى التناقص مرة أخرى. كثيرًا ما تحدث مشاكل التجمعات الطحلبية الكثيفة في فصل الصيف.

تظل مستويات درجات الحرارة والأكسجين في المياه متقاربة في عمود المياه؛ حيث أن كثافة المياه تكون متقاربة وطبقية المياه تكون أقل ما يمكن، كما أن ذوبانية الأكسجين تزيد عند انخفاض درجة الحرارة ويكون النشاط الميكروبيولوجي قليلا في الشتاء عنه في الصيف.

فى حالة الأجسام المائية العميقة تنشأ طبقية حرارية (شكل ٧)، ويتشكل الجسم المائي إلى ثلاث طبقات واضحة هي:-

أ - الطبقة العليا ويطلق عليها " ابيلمنيون" (Epilimnion) ،وتتميز بدرجة حرارة متجانسة نتيجة

تقليب المياه بفعل الرياح وبتيارات الحمل.

ب- الطبقة الوسطى ويطلق عليها " ميتالمنيون " أو " ثيرموكلين" (Metalimnion or Thermocline)، وهي تمثل النطاق الفاصل بين طبقتين بهما تباين واضح من حيث درجة الحرارة والحركة والتغير في نوعية المياه.

ج - الطبقة السفلى ويطلق عليها " هيبولمنيون" (Hypolimnion)، وتتميز بأنها ساكنة، وتفتقر الى الأكسجين، وهي ذات درجة حرارة متجانسة نسبيا ولكنها أكثر برودة من الطبقة العليا.

في فصل الصيف؛ تتشكل طبقة الهيبولمنيون وتصبح معزولة عن الطبقة العليا "ابيلمنيون" وهذا يؤدى إلى خلق ظروف لا هوائية وحدوث مشاكل تتعلق بنوعية المياه (لون وطعم ورائحة)، أما أثناء أشهر الشتاء فقليلا ما يحدث تناقص للأكسجين الذائب في طبقة الهيبولمنيون.

تشهد الأجسام المائية العميقة ذات الطبقية، تغيرًا واضحًا أثناء التغير الفصلي الذي يصاحبه تغيرا في درجة حرارة المياه. فبعد حلول فصل الخريف تنخفض درجة الحرارة فتتحرك المياه الباردة الموجودة على السطح إلى أسفل نحو طبقة الهيبولمنيون نتيجة الحمل الحراري محدثة عملية خلط في عمود الماء، وهذا يؤدى إلى تقليب المغذيات مع المياه الخالية من الأكسجين، وهذا يفضي إلى حدوث مشاكل لون ومذاق ورائحة وذوبانية للحديد والمنجنيز، وتتولد الأمونيا وتنشأ العكارة، وفى مثل هذه الظروف لابد من سحب المياه من مستويات مختلفة لعمود الماء لتقليل تأثير طبقية المياه على عملية المعالجة.[٨]

إن وجود الأمونيا يعتبر قرينة واضحة علي الآتي:

- وجود مصدر مباشر مثل مياه صرف صحي حديثة "غير معالجة"
- حدوث ظروف اختزالية للمياه وانعدام الأكسجين مما يؤدي إلى تحول النترات إلى أمونيا.

ثانيا: العوامل البشرية

تتمثل العوامل البشرية في: صرف المياه العادمة سواء أكانت منزلية أو صناعية إلى المياه السطحية (مصدر مياه الشرب) أو إلقاء المخلفات الخطرة في تلك المياه، أو حدوث انسكابات بترولية

غير مقصودة أو غيرها أثناء الملاحة النهرية أو رحلات النقل عبر النهر، كما أن الأنشطة الزراعية والترفيهية قد تتسبب بطريقة مباشرة أو غير مباشرة في تلوث مياه الأنهار.

تأثير زيادة المغذيات أو المخصبات على حالة الجسم المائي ونوعية المياه به

تعتمد طبيعة وحالة الجسم المائي علي مستويات المغذيات به (مركبات النيتروجين والفوسفور)، والنشاط الميكروبيولوجي الذي يحدث داخله، فدورة المياه الطبيعية لمصدر المياه السطحي تمر بثلاثة مستويات أو ثلاث مراحل غذائية باعتبار أن ما يميز كل مرحلة هو الاحتواء على المغذيات المصاحبة بالنشاط البيولوجي، ويمكن تقسيم تلك المراحل على النحو التالي:-

أ- مرحلة منخفضة في تركيز المغذيات بها (اوليجوتروفيك) Oligotrophic

فى هذه المرحلة يكون مستوى المغذيات في المياه منخفضًا وبالتالي يكون تواجد الطحالب تواجدًا محدودًا والنشاط البيولوجي محدودًا أيضا.

ب - مرحلة متوسطة التركيز للمغذيات (ميزوتروفيك) Mesotrophic

هذه المرحلة تتميز بتواجد متوسط من المغذيات والنشاط البيولوجي، وبناءً على ذلك فتواجد الطحالب يكون متناسبًا مع كم المغذيات، أي سيكون متوسطا نسبيا.

جـ - مرحلة عالية المغذيات (ايوتروفيك) Eutrophic

تتميز هذه المرحلة بارتفاع تركيز المخصبات مع زيادة النشاط البيولوجي ويكون ذلك مصحوبًا بانعدام للأكسجين الذائب، وارتفاع عكارة المياه، وزيادة أعداد الطحالب، وزيادة تركيز اللون، ومثل هذه الظروف البيئية المائية، تساعد على تكوّن مركبات تكون سببًا في تخليق مركبات ثانوية خطرة أثناء عملية التطهير بالكلور. ويعتبر النمو الطحلبي الكثيف دليلا دامغًا على حدوث ظاهرة التسميد الزائد Eutrophication.

تتسبب الزيادة الفجائية للطحالب في إحداث عواقب مأساوية على البيئة المائية، وعبء ثقيل على المحطات؛ حيث تتدخل تدخلا سلبيًّا في عمليات المعالجة، مما يؤدى إلى تدهورها ويصحب تلك الزيادة حدوث الآتي:-

- تكوّن لون ورائحة غير مقبولة للمياه.

- استنفاذ الأكسجين الذائب في المياه نتيجة تحلل البقايا الطحلبية مسببة بيئة مائية اختزالية تعمل على ذوبان الحديد والمنجنيز وتحرر الفسفور من رواسب القاع إن وجدت مركبات تلك العناصر. وعلي الرغم من أن الطحالب تنتج الأكسجين أثناء عملية البناء الضوئي إلا أنه يحدث خلل في توازن الأكسجين الذائب في الماء نتيجة الهدم الحيوي للمواد العضوية الناتجة التي تستنفذ الأكسجين.
- تولد الأمونيا في الماء نتيجة اختزال النترات ومركبات النيتروجين العضوي.
- انسداد المرشحات نتيجة ازدياد أعداد الطحالب التي يصعب ترسيبها في أحواض الترسيب وبالتالي تصل إلي المرشحات وتتماسك مع حبيبات الوسط ألترشيحي مما يؤدي الي انسداده وزيادة معدلات الغسيل العكسي الذي يستهلك ماءً معالجًا وكهرباء ومعدات الغسيل والهواء، فضلا عن فقد في الوسط ألترشيحي وخلل في توزيع ونسب حبيباته.
- ازدياد الحاجة إلي المروب والكلور للتغلب علي مشاكل اللون والطعم والرائحة.
- ومع تواجد المواد العضوية الكبيرة تتكون نواتج ثانوية تؤثر سلبا علي جودة المياه.

ماذا يحدث عند إلقاء المياه الملوثة إلى مصدر المياه؟

عندما تُلقى المياه الملوثة في المياه السطحية مثل الأنهار أو غيرها فيحدث تحلل للمادة العضوية الموجودة بتلك المياه بفعل الكائنات الدقيقة (البكتريا) التي تستهلك الأكسجين الموجود في هذه المياه وتُعرف هذه العملية بالتحلل. ومع نمو الاهتمام البيئي في أواخر القرن العشرين بضرورة الإقلال من تركيزات المواد المستهلكة للأكسجين بالمياه السطحية مثل المواد العضوية والمركبات النيتروجينية لمنع عمليات التحلل، فقد وُضِعَت طرق قياس معيارية للتعرف على نوعية وتقدير تركيزات الملوثات. أهم تلك القياسات:-

الأكسجين المستهلك ومركبات النيتروجين والمواد الطينية العالقة في المياه.

ومع تواجد الكثير من الملوثات التي تصل إلى المياه السطحية أصبح من الصعب المحافظة على التوازن الأكسجيني بها، وهي تعتبر مصدرا للشرب أو مصدرًا للغذاء.

تزيد تركيزات المواد المخصبة بالمياه (مركبات فوسفور ومركبات نيتروجين)، وعلى الرغم من إنشاء محطات المعالجة الحيوية للمياه العادمة (مياه الصرف المنزلية) ووضع معايير لقياس فعالية المعالجة مثل: الأكسجين الحيوي المستهلك- العوالق الصلبة- المركبات النيتروجينية إلا أن المياه السطحية أصبحت تعانى من وصول مياه الصرف غير المعالج جيدًا إليها، وهذا يشجع علي النمو

الطحلبي بغزارة محدثا ما يُطلق عليه الحمل العضوي الثانوي الذي يزدهر مع زيادة مركبات الفوسفور والنيتروجين، وبالتالي يستنفذ الأكسجين نتيجة تحلل المادة الطحلبية وتحلل المواد العضوية الناتجة من النشاط الحيوي لتلك الطحالب.

ويطلق علي الأكسجين المستهلك بفعل الميكروبات وعمليات الأكسدة بالاحتياج الأكسجيني الحيوي (BOD). ويرجع هذا الي أن محطات معالجة مياه الصرف التقليدية لا تتمكن من إزالة مركبات الفوسفور والمركبات النيتروجينية.

وكما ذكرنا من قبل؛ فإن زيادة تركيزات الفوسفور والنيتروجين في المياه السطحية يؤدى إلى حدوث عواقب وخيمة على نوعية المياه السطحية نتيجة حدوث ظاهرة التسميد الزائد بالمركبات سالفة الذكر.

ولتوضيح كيف أن زيادة المخصبات تؤدى إلى تأثيرا أتلافيا لنوعية المياه لنأخذ هذا التوضيح بالأرقام:

"جرام فوسفور يسبب تكون ١٧٠٠ جرام من الطحالب أو ما يعادل ١٤٠ جرام طحالب جافة"[١٧]

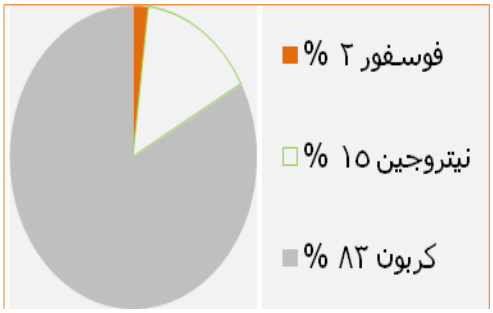
عند تتحلل تلك الطحالب فإنها تستهلك الأكسجين الذائب في المياه جزئيًّا نتيجة عملية أكسدة الكربون الموجود في المادة العضوية للطحالب وتحويلها إلى ثاني أكسيد الكربون وهناك جزء آخر من الأكسجين يستهلك في أكسدة بعض المركبات النيتروجينية وتحويلها إلى نترات".

تبلغ كمية الأكسجين الكلية اللازمة لأكسدة جرام من نيتروجين ايون الامونيوم حوالي ٤,٦جرام أكسجين. طبقا للمعادلتين التاليتين:

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \rightarrow NO_2^+ + 2H^+ + H_2O \qquad (١/١١)$$

$$NO_2^+ + 0.5O_2 \rightarrow NO_3^+ \qquad (١/١٢)$$

تحتوى المادة الطحلبية على النسب الآتية من الفوسفور والنيتروجين والكربون:



تعمل المخصبات الموجودة في المياه على استهلاك ثانوي للأكسجين الذائب في المياه بما يعادل خمسة أضعاف ما يُستهلك في تحلل المادة العضوية الأولية،

لهذا كان الاهتمام يتجه نحو الإقلال من تركيزات المخصبات في المياه العادمة قبل صرفها إلى مصادر المياه السطحية.

يرجع الاهتمام بإقلال من تركيزات مركبات الفسفور والنيتروجين فى محطات المعالجة للمياه العادمة باعتبارها المركبات الأكثر إنماءً وإنعاشًا للطحالب، فقد يتسبب في نفوق أعداد كبيرة من الأسماك نتيجة تكون تجمعات طحلبية شاطئية تستهلك الأكسجين اللازم لحياة الأسماك.

مثال لمشكلة بيئية:

حدث في النصف الثاني من القرن العشرين مشكلة بيئية في مياه خليج المكسيك وحول السواحل الآسيوية الأوروبية؛ تمثلت هذه المشكلة في نمو عدد هائل من الطحالب نتيجة وجود صرف مياه محملة بمركبات الفوسفور والنيتروجين إلى الخليج؛ حيث تسببت تلك المركبات في خلق بيئة خصبة لنمو وازدهار الطحالب مما أدى إلى مزيد من إفراز السموم في المياه فضلا عن استنفاذ الأكسجين مما سبب نفوق أعداد كبيرة من الأسماك، وقد أطلق على هذه الظاهرة البيئية الخطيرة بالمد والجزر الأحمر نظرًا لما أعطته تلك الطحالب من لون أحمر للمياه في تلك المناطق.

الملوثات الأكثر شيوعا في المياه السطحية

المياه السطحية هي المياه الموجودة بالأنهار والقنوات والبحيرات العذبة. ولهذه المياه خصائص تجعلها مذيب جيد وبالتالي من السهل أن تتلوث ومن النادر أن تتواجد هذه المياه فى حالة نقية بحيث تستخدم للشرب مباشرة بدون معالجة. ويأتي التلوث لهذه المياه عادة من جراء تعرضها المباشر للأجسام و الأشياء التي تصل إليها من خلال العوامل الطبيعية أو من خلال أنشطة الإنسان.

أولا: المواد العضوية الطبيعية

١- النشأة والتركيب البنائي

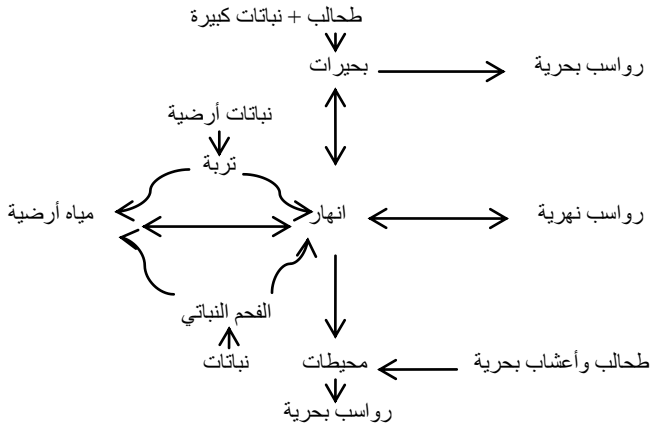
تعتبر المواد الدبالية من أكثر المكونات الأساسية في مصادر الإمداد بالمياه وتسبب اللون الأصفر أو البني الفاتح للمياه. تنشأ هذه المواد في التربة وفي المياه الطبيعية عن طريق عمليتين حيويتين تقوم بهما الكائنات الحية وهما:-

- تحلل البقايا النباتية مثل أوراق الشجر والطحالب.
- تخليق مواد جديدة عضوية وغير عضوية .

والمواد الدبالية هي مركبات عديدة الألكتروليت أنيونية ذات أوزان جزيئية منخفضة أو متوسطة، تتميز باحتوائها على مجموعات الكربوكسيل والفينول والكيتون والميثوكسى والكحول ومجموعات أروماتية وأليفاتية. تكتسب هذه المواد شحناتها بصفة أساسية من مجموعتي الكربوكسيل والفينول وهى ذات سطح نشط.

تتراوح أوزانها الجزيئية ما بين ٣٠٠٠ حتى ١٠٠٠٠٠٠ جرام/مول (أحماض هيومية) بينما الأحماض الفولفية فتتراوح ما بين ٥٠٠ - ٣٠٠٠ جرام/مول، وكلا النوعين يمكن إزالته أو تقليله من خلال الترويب بأملاح الالومونيوم وأملاح الحديديك.[١٧]

تتواجد المواد الدبالية في مسارات عديدة في البيئة، فيتواجد حامض الهيوميك في المياه الغدقة ومياه الصرف الصحي والترسبات البحرية والنهرية والفحم البني، ويعتبر الماء هو العامل الأساسي في انتقال هذه المواد الدبالية في البيئة (شكل١/٨).

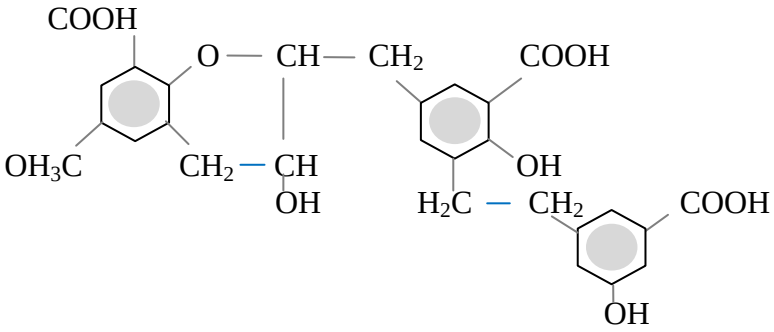


شكل (١/٨) رسم تخطيطي يوضح مسارات المواد الدبالية في البيئة[١٨]

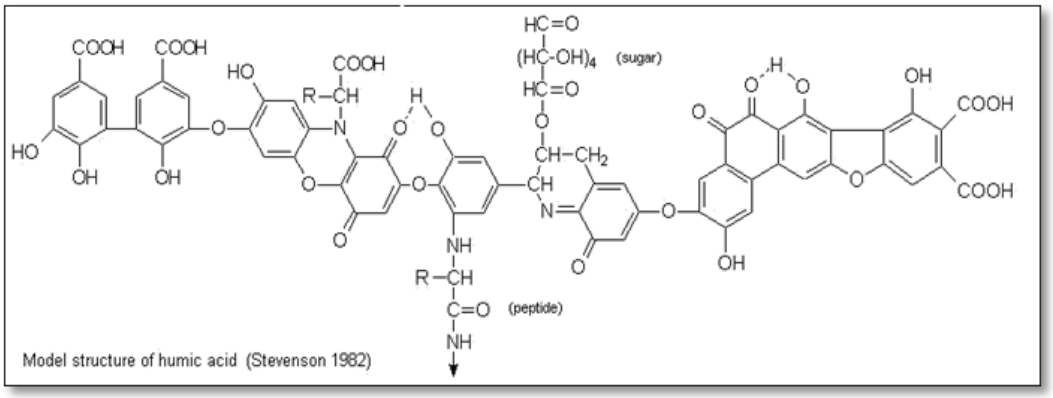
لهذه المواد الدبالية القدرة الكبيرة على البقاء في البيئة، فقد تستمر لقرون عديدة دون أن تتحلل، وتعتبر الأحماض الفولفية هي الأكثر ذوبانا في الماء من الأحماض الهيومية،[١٩] وتتواجد بنسب عالية في المياه السطحية، ويمكن تعريفها من خلال طرق استخلاصها من الماء أو التربة.

جدول (١/٩) النسب المئوية للعناصر في كل من حامض الهيوميك وحامض الفولفيك في المواد الدبالية[٢٠]

الحامض / العنصر	حامض الهيوميك (%)	حامض الفولفيك (%)
كربون	٥٣,٨ – ٥٨,٧	٤٠,٧ – ٥٠,٦
هيدروجين	٣,٢ – ٦,٢	٣,٨ – ٧,٠
أكسجين	٣٢,٨ – ٣٨,٣	٣٩,٧ – ٣٩,٨
نيتروجين	٠,٨ – ٤,٣	٠,٩ – ٣,٣
كبريت	٠,١ – ١,٥	٠,١ – ٣,٦



شكل (١/٩) التركيب البنائي لحامض الفولفيك[١٧]



شكل (١/١٠) التركيب البنائي لحامض الهيوميك

في هذا التركيب البنائي لحامض الهيوميك يتواجد الأكسجين في مجموعات كربوكسيلات وفينولات وهيدروكسيلات كحولية واثيرات كربوكسيلية بينما يتواجد النيتروجين في مجموعات نيترايل وفي تركيبات حلقية. والرمز الكيميائي للتركيب البنائي لهذا الحامض الموضح بالشكل (١/١٠) هو:

$C_{308}H_{328}O_{90}N_5$ ، ووزنه الجزيئي = ٥٥٤٠، والنسب المئوية للعناصر كما يلي:-

C	:	H	:	O	:	N
%٦٦,٧		%٦		%٢٦		%١,٣

ترجع حامضية المواد الدبالية إلى تواجد مجموعات الكربوكسيل والفينول ,وتبعًا لظروف الرقم الهيدروجيني وقلوية الماء فإن الأحماض الدبالية تحمل شحنات سالبة عند الرقم الهيدروجيني الأكبر من ٧ ، وينشأ هذا من تفاعل الحامض مع القاعدة الموجودة بالماء على النحو الآتي:-

$$R-\underset{\underset{O-H}{|}}{C=O} + Na^+ \rightarrow R-\underset{\underset{O^- Na^+}{|}}{C=O} \qquad (١/١٣)$$

تقاس كمية هذه المواد العضوية من خلال تجربة يُستخدم فيها عامل مؤكسد (مركب برمنجانات البوتاسيوم). ويعبر عن المواد العضوية بالأكسجين الكيماوي المستهلك (COD_{Mn}) لكل لتر من الماء (مجم أكسجين/ لتر). ويطلق على نتيجة هذا القياس " قيمة البرمنجانات" (Permanganate value) ، ويعبر عن هذه القيمة بوحدة المليجرام برمنجانات بوتاسيوم / لتر حيث أن (١ مجم أكسجين كيماوي مستهلك/ لتر يكافئ ٤ مجم برمنجانات بوتاسيوم / لتر).

وهناك طرق أخرى لقياس هذه الشوائب العضوية مثل الأكسجين الكيماوي المستهلك (COD_{Cr})، حيث يستخدم عامل مؤكسد قوي (مركب ثاني كرومات البوتاسيوم) في وسط شديد الحامضية، وهناك أيضا الكربون العضوي الكلى (TOC) الذي يعبر عن المواد العضوية ككربون.

وكنتيجة للتقدم الهائل في طرق التحليل الكيميائي فقد وجد أن هناك مواد عضوية ذات سمية تتكون في المياه وهي بطيئة التحلل و الهدم الحيوي مثل مركبات عديد ثنائي فينيل الكلور (PCB)، والدايوكسينات والمبيدات ومركبات الفينول بالإضافة الى المركبات العضوية الهالوجينية و التي تتكون أثناء عملية تطهير المياه بالكلور.

ويمكن التعبير عن تركيز المواد العضوية في المياه من خلال تركيز الكربون العضوي الذي يمر خلال مرشح غشائي ذي مسام قطر ٠,٤٥ ميكروميتر وهذا ما يُعرف بالكربون العضوي الذائب (DOC)، أما الكمية التي لا تمر وتحتجز على سطح المرشح الغشائي؛ فهي تمثل الكربون العضوي

ألجسيمي (POC)، ومجموع الاثنين معًا يشكل الكربون العضوي الكلى (TOC). إن أغلب المياه الأرضية تحتوى على كربون عضوي كلى أقل من ٢ مجم كربون/ لتر، بينما الكربون العضوي الذائب بالبحيرات والأنهار يتراوح بين ٢ مجم كربون / لتر حتى ١٠ مجم كربون/ لتر.

٢- التأثيرات الناجمة عن المواد العضوية (الدبالية)

تتسبب المواد الدبالية في إحداث مشاكل عديدة بالمياه المعالجة أهمها:

- تلوين المياه باللون الأصفر أو البني الفاتح.
- تكوين مواد عضوية مكلورة أثناء عملية التطهير بالكلور.
- تقليل سعة الادمصاص لحبيبات الكربون المنشط. (في أنظمة المعالجة التي تستخدم الكربون المنشط لإزالة الروائح أو اللون)
- استهلاك كمية كبيرة من الكلور للوصول إلى نقطة الانكسار لتحقيق كلور حر.
- يمكن للمواد العضوية الدبالية أن تصبح ناقل للفلزات السامة عن طريق تكوين معقدات ثابتة (ذائبة) مع تلك الفلزات وبذلك تزيد من انتقال هذه الفلزات السامة في الماء، وقد يحد هذا من كفاءة الترسيب للعناصر الثقيلة أثناء المعالجة.
- كما أنها تكوُّن معقدات ثابتة يؤثر سلبًا على عمليات معالجة المياه بالتبادل الأيوني.
- هناك تأثيرا ايجابيا عند حدوث الارتباط بين المواد الدبالية والعناصر الثقيلة وهو أن كفاءة المعالجة البيولوجية للملوثات غير العضوية بمحطات معالجة مياه الصرف الصحي تزيد وذلك عن طريق خفض سمية العناصر الثقيلة بالنسبة للميكروبات.
- يمكن إزالة الأنيونات غير العضوية مثل الفوسفات والسيانيد من الماء عن طريق تكوين معقدات مع المواد الدبالية.
- زيادة نسبة أو جرعة المروب المطلوب لإزالة هذه المواد العضوية.

٣- النواتج الثانوية لعملية تطهير المياه

تتناسب تركيزات النواتج الثانوية لعملية التطهير للمياه بالكلور مع تركيز الكربون العضوي في المياه. وقد صيغت العديد من العلاقات التي تربط ما بين تركيز الكربون العضوي وتركيزات النواتج الثانوية للتطهير بالكلور. فمثلا هناك ارتباط وثيق بين الكربون العضوي الكلى وإمكانية تكوين مركبات تراي هالوميثان وتوضح العلاقة الرياضية التالية تركيز مركبات تراي هالوميثان المتوقع تكونها أثناء عملية التطهير بالكلورة[٢١]:-

(١/١٤) = ٤٣,٧٨ × (الكربون العضوي الكلي) ^{١,٢٤٨}

ويعبر عن تركيز تراي هالوميثان بوحدة الميكروجرام/لتر، ويعبر عن الكربون العضوي الكلي بوحدة بالملليجرام كربون/ لتر. ويجرى تقدير مركبات تراي هالوميثان المتوقع تكونها من خلال اختبار يتم باستخدام عينة مياه تحتوى على مواد عضوية طبيعية ويضاف إليها الكلور، وتترك لمدة سبعة أيام عند درجة حرارة ٢٥°م وبعد ذلك تقاس مركبات تراي هالوميثان.

٤- الامتصاص النوعي للأشعة فوق البنفسجية SUVA

تقوم المركبات العضوية الأروماتية بامتصاص الضوء في مدى الأشعة فوق البنفسجية. والمواد العضوية ذات الوزن الجزيئي الأعلى هي التي يمكن إزالتها بالترويب، وهى التي تعطى أكبر نواتج عضوية ثانوية بعد التطهير بالكلور.[٢٢] وتلك المواد هى التي تمتص الأشعة فوق البنفسجية، وبالتالي فهذا القياس الذي يتم عند طول موجي ٢٥٤ نانو متر يستخدم كمقياس أو كمؤشر للكربون العضوي الذائب أو كم المواد العضوية الذائبة، ويطلق على النسبة بين امتصاص الأشعة فوق البنفسجية وتركيز الكربون العضوي الذائب بالامتصاص النوعي للأشعة فوق البنفسجية، أي المرتبط بنوعية المواد العضوية الموجودة وتستخدم كدليل لتوزيع الوزن الجزيئي للمواد العضوية الأروماتية الطبيعية في المياه، حيث أن الامتصاص للأشعة فوق البنفسجية يأتي من المواد العضوية الأروماتية ذات الوزن ألجزيئي العالي كما ذكر من قبل.

وحيث أن وحدة قياس الامتصاص تساوى م$^{-١}$ (أي مقلوب طول المسار الضوئي)، فإذا قسمنا قيمة الامتصاص على تركيز الكربون العضوي الذائب (مجم/لتر) فنحصل علي ما يسمى بالامتصاص النوعي للأشعة فوق البنفسجية الذي يأخذ الوحدة: ل/مجم كربون. م$^{-١}$

المياه المحتوية على نسبة منخفضة من الحامض الدبالي (أي تركيز منخفض من الكربون العضوي الذائب) يكون لها امتصاص نوعى أقل من ٢ لتر/مجم كربون.م$^{-١}$ بينما المياه التي تحتوي على نسبة عالية من الحامض الدبالي يكون لها امتصاص نوعى بين ٣- ٥ لتر/مجم كربون .م$^{-١}$، ومع ارتفاع نسبة الامتصاص النوعي فإن الكربون العضوي المتواجد بالمياه سوف يؤثر على جرعة المروب المطلوبة، ويمكن التوقع بحدوث إزالة عالية من الكربون العضوي الذائب (٥٠ -٨٠%). وعندما تكون الامتصاص النوعي أقل من ٣ لتر/ مجم كربون.م$^{-١}$، فإن تأثير الكربون العضوي الذائب على جرعة المروب يكون مهملا، وبالتالي تكون نسبة إزالته منخفضة (٢٠- ٥٠%).[٢٢]

٥- متطلبات تحقيق ترويب مُحسن أو مُعزز:

تتطلب قاعدة النواتج الثانوية المرحلة الأولي الموصى بها من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية، استخدام إستراتيجية لإزالة المواد العضوية الطبيعية (الترويب المُحسن)، وذلك للحد من تكوين النواتج الثانوية للتطهير بالكلور،[٢٣-٢٥] ويطبق هذا في محطات معالجة المياه التقليدية التي تعالج مياه سطحية أو أرضية، وتعتمد كمية الكربون العضوي الكلى المطلوب إزالتها على تركيز هذا الكربون العضوي والقلوية بالمياه الخام.

هذا النوع من الترويب المرتفع الكفاءة يربط ما بين متطلبات إزالة الكربون العضوي الكلى وقلوية المياه الخام لتجنب إجبار مرفق المياه على إضافة جرعات عالية من المخثر الفلزي لتقليل الرقم الهيدروجيني إلى ٦ – ٦,٥ وهذا هو المدى الذي يكون فيه أداء المروب فى أقصاه، كما أن الإزالة العالية للكربون العضوي الكلى تكون ممكنة عندما يكون تركيز الكربون العضوي الكلى عاليا نسبيا، وفي نفس الوقت الجزء من المواد العضوية الطبيعية التي من السهل إزالتها بالمروب غير العضوي تكون كبيرة.

توضح المصفوفة بالجدول (١/١٠) "المرحلة الأولي" من قاعدة النواتج الثانوية للتطهير.

جدول (١/١٠) النسبة المئوية المطلوب إزالتها من الكربون العضوي من خلال الترويب العالي الكفاءة وفقا لتركيز الكربون العضوي الكلي وقلوية المياه – مرحلة (١) من قاعدة النواتج الثانوية للتطهير لسنة ١٩٩٨.

الكربون العضوي الكلى بالمياه (مجم كربون/لتر)	قلوية المياه الخام (مجم كربونات كالسيوم/لتر)		
	صفر- ٦٠	>٦٠-١٢٠	١٢٠<
٢ – ٤	%٣٥	%٢٥	%١٥
٤ – ٨	%٤٥	%٣٥	%٢٥
٨ <	%٥٠	%٤٠	%٣٠

ولتوضيح الجدول السابق سنتناول هذا المثال:

إذا كانت المياه الخام تحتوى على ٣,٥ مجم كربون/لتر كربون عضوي كلى وكانت قلوية هذه المياه ١٢٠ مجم/لتر (كربونات كالسيوم ، فتبعًا للجدول السابق لابد من إزالة ٢٥% من الكربون العضوي

الكلى، ويجب أن يكون تركيز الكربون العضوي الكلى بالمياه الخام أقل من ٢,٦٣ مجم كربون/لتر، ويحسب ذلك كما يلي:-

٣,٥× ٠,٧٥ = ٢,٦٣ مجم كربون/ لتر ، أي لابد من إزالة ٠,٨٨ مجم كربون/ لتر

هذه القاعدة تتطلب إجراء "اختبار الجار" لتحديد الإستراتيجية المناسبة لإزالة الكمية المطلوبة من الكربون العضوي الكلى. وقد يستوجب ذلك تكلفة عالية لدي المحطات التي تعاني من نسب عالية من المركبات العضوية بالمياه التي لا يمكن إزالتها مباشرة بالمروبات، وتلجأ تلك المحطات إلي الاستعانة بالجدول (١/١٠) حيث أن القاعدة تسمح باستخدام اختبار الجار لتحديد البديل المناسب لإزالة الكربون العضوي الكلي.

تتمثل هذه الإستراتيجية في إضافة المروب (ملح ألومونيوم أو حديد) بمعدل تزايدي ١٠مجم /لتر حتى يتم خفض الرقم الهيدروجيني إلى المستوى المستهدف، والذي يعتمد علي قلوية المياه الخام. فمثلا: إذا كان مدى القلوية من صفر – ٦٠ أو >٦٠-١٢٠ أو ١٢٠-٢٤٠ أو >٢٤٠ (كربونات كالسيوم) فيكون الرقم الهيدروجيني الأقصى المستهدف هو ٥,٥، ٦,٣ ، ٧,٠ ، ٧,٥ على التوالي، وبعد إجراء التجربة يقاس الكربون العضوي الكلى المتبقي وترسم علاقة بين الكربون العضوي الكلى وجرعة المروب المستخدم.

تتحدد نسبة الكربون العضوي الكلى البديلة عند نقطة يطلق عليها **"نقطة تضائل تأثير جرعة المروب"** التي عندها يكون ميل منحني العلاقة بين جرعة المروب - الكربون العضوي يقل إلى أن يصل إلى أقل من ٠,٣ مجم كربون /١٠ مجم من المروب. فإذا لم تتحدد نقطة تضائل تأثير الجرعة علي الرسم، اي انه ليس هناك تأثر من إضافة المروب، فحينئذ تكون المياه غير قابلة للترويب المحسن. يستخدم مرفق المياه هذه الإجراءات للوقوف علي مدي الاحتياج لهذه الدرجة العالية من الترويب، ولابد للمرفق من تحقيق معايير الخطوة الأولي (انظر الملحق أ).

وهناك معايير إذا تحققت فلا ضرورة لإجراء الترويب المحسن وهى[٨]:

- إذا كانت المياه الخام تحتوى على كربون عضوي كلى أقل من ٢,٠ مجم/لتر،
- إذا كانت المياه المعالجة تحتوى على كربون عضوي كلى أقل من ٢,٠ مجم/لتر،

- إذا كانت المياه الخام تحتوى على كربون عضوي كلى أقل من ٤,٠ مجم/لتر وكانت قلوية المياه أكبر من ٦٠ مجم/لتر (كربونات كالسيوم) وكانت عملية المعالجة تحقق هالوميثان كلية أقل من ٤٠ ميكروجرام/لتر وكانت أحماض هالواسيتيك أقل من ٣٠ ميكروجرام/لتر.
- إذا كان تركيز هالوميثان كلية أقل من ٤٠ ميكروجرام/لتر وكانت أحماض هالواسيتيك أقل من ٣٠ ميكروجرام/لتر وكان الكلور يستخدم فقط للتطهير الأولي مع المحافظة على إبقاء كلور متبقي في الشبكة.
- إذا كان الامتصاص النوعي للأشعة فوق البنفسجية (٢٥٤ نانو متر) للمياه الخام أقل من ٢ لتر/(مجم.م$^{-1}$).
- إذا كان الامتصاص النوعي للأشعة فوق البنفسجية (٢٥٤ نانو متر) للمياه المعالجة أقل من ٢ لتر/(مجم.م$^{-1}$).

ثانيا: الجسيمات المتواجدة بالمياه

تختلف الجسيمات الموجودة في المياه الطبيعية اختلافا كبيرا من حيث المنشأ والتركيز والمقاس، فالبعض يكون من التربة مثل الطفلة والغرين والكائنات المسببة للأمراض وألياف الاسبستوس والبعض الآخر يكون مصدره عمليات كيميائية أو بيولوجية مثل: ترسبات الحجر الجيري وهيدروكسيد الحديد وثاني أكسيد المنجنيز والجسيمات العضوية المائية.

ويطلق على الشوائب الطبيعية التي تتكون من جسيمات دقيقة مثل: الطفلة والغرين بالجسيمات المعدنية وهذه تسبب عكارة للمياه ويعبر عن هذه العكارة بوحدات قياسية تعرف بوحدات العكارة النفيلومترية أو وحدات العكارة الفورمازينيه، وكلا الوحدتين متساويتان من حيث القيمة.

وحدة عكارة نفيلومترية (NTU)= وحدة عكارة فورمازينية(FTU)

ونظرا لاهمية التعرف على طبيعة الجسيمات المعدنية فسوف نتحدث عنها بشئ من التفصيل في الفصل الثاني.

تتراوح مقاسات الجسيمات ما بين عشرات النانومترات (مثل الفيروسات) إلى مئات الميكرمترات (مثل الكائنات الحيوانية الدقيقة) شكل (١١، ١٢، ١/١٣)، وجميع هذه الجسيمات يمكن إزالتها بكفاءة عالية من خلال الترويب والترسيب والترشيح. يوضح الشكل (١/١١) مقاسات الجسيمات المتواجدة

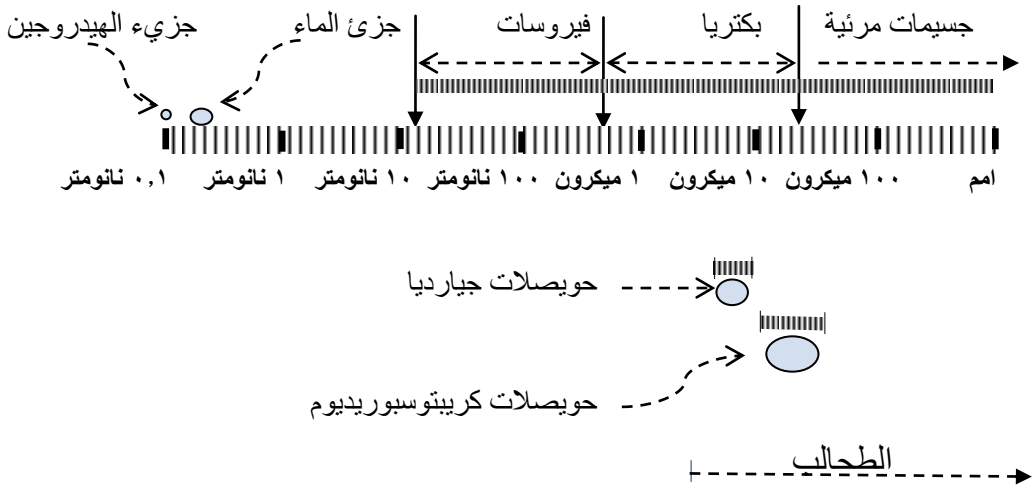
في المياه ومسام الأوساط الترشيحية. وتعتبر حويصلات طفيليات البروتوزوا المسببة للأمراض مثل: **الكريبتوسبوريديوم** هي جسيمات دقيقة مجوفة ذات أبعاد كلية تقع في المدى من ٣ - ٦ ميكروميتر، وهي لا تقتل بفعل المطهرات الشائعة، وهناك أيضا طفيليات **الجيارديا** ذات الشكل البيضاوي والكروي ذات الأبعاد ٥ - ١٥ × ٨ - ١٨ ميكروميتر.

المقاس		ايون		جزيئات	غرويات		جسيمات ناعمة		جسيمات خشنة	
					ناعمة	خشنة				
الوحدة	انجستروم	١	١٠	$١٠^{٢}$	$١٠^{٣}$	$١٠^{٤}$	$١٠^{٥}$	$١٠^{٦}$	$١٠^{٧}$	$١٠^{٨}$
	ميكرون	$١٠^{-٤}$	$١٠^{-٣}$	٠,٠١	٠,١	١	١٠	١٠٠	$١٠^{٣}$	$١٠^{٤}$
	ملليمتر	$١٠^{-٧}$	$١٠^{-٦}$	$١٠^{-٥}$	$١٠^{-٤}$	$١٠^{-٣}$	٠,٠١	٠,١	١	١٠
	وزن جزيئي	١٠٠		$٤ ١٠ \times ٢$		$٥ ١٠$	$٥ ١٠ \times ٥$			
المكونات										
	الايونات الفلزية									
	الجزيئات									
	الأملاح المائية									
	اللون									
	المواد العضوية الطبيعية									
	الأحماض الدبالية									
	الفيروسات									
	معلق									
	ألياف الاسبستوس									
	الطفلة									
	البكتريا									
	حويصلات الطفيليات									
عمليات فصل الأملاح والمواد العضوية والعوالق	**الغرين**									
	الندف									
	التناضح العكسي									
	الالكتروديناميز									
	ترشيح النانو									
	الكربون المنشط									
	الترويب									
	الترشيح الفائق									
	الترشيح الدقيق									
	الترشيح التقليدي									
	الترشيح الورقي									
	ترشيح رملي + كربون									
	الترسيب/ساعة									

شكل (١/١١) مقاسات الجسيمات والمكونات الموجودة بالمياه وعمليات الفصل لتلك الجسيمات والمكونات.

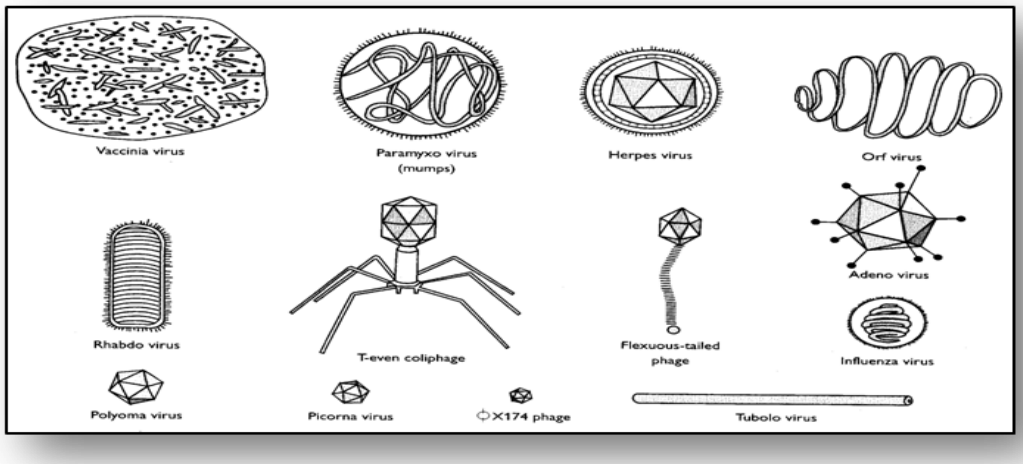
١ـ الفيروسات:

تعتبر الفيروسات هي أصغر المسببات المرضية، وبالتالي من الصعب إزالتها بالطرق الفيزيائية مثل الترشيح. وهناك بعض الفيروسات تكون أقل حساسية للتطهير من البكتريا والطفيليات (مثل: ادينوفيروس أقل حساسية للأشعة فوق البنفسجية)، ويمكن للفيروسات أن تبقى في المياه لفترات طويلة. أكثر الفيروسات المعوية لا تنتقل إلى الإنسان من الحيوان. وعندما تتلوث المياه بالمخلفات البشرية فمن المحتمل أن تحتوي على أعداد هائلة من الفيروسات.

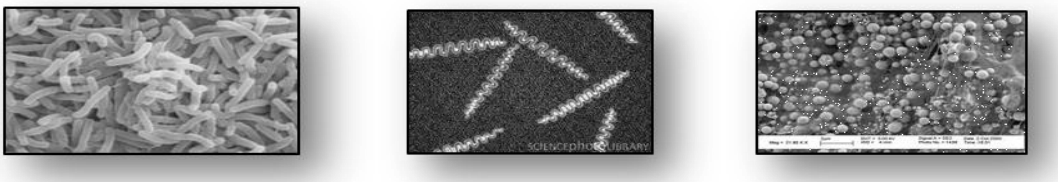


شكل (١/١٢) مدي مقاسات الجسيمات المرئية والبكتريا والفيروسات والطحالب وجزئ الماء وذرة الهيدروجين[١٧]

(أ)



(ب)



كروي حلزوني عصوي

شكل (١/١٣) (أ) أشكال مختلفة من الفيروسات (ب) أنواع مختلفة من البكتريا

٢- البكتريا:

البكتريا؛ من الكائنات الدقيقة التي تتميز بصغر حجمها والتركيب البدائي للخلية الحية، وهى وحيدة الخلية تصغر عن البروتوزوا، فيتراوح حجمها ما بين ٠,٣٥ – ٣٥ ميكرون، والبكتريا هي أكثر الكائنات الدقيقة حساسية للمطهرات. تتواجد البكتريا في ثلاثة أشكال: شكل كروي، وشكل عصوي، وشكل حلزوني، وهذه الأشكال السابقة قد تكون مفردة أو في أزواج أو في سلاسل تبعًا لطريقة الانقسام لكل نوع. شكل (١/١٣أ)

تتحرك البكتريا في البيئة من خلال الأسواط التي تنشأ من السيتوبلازم، فبعض البكتريا يتحرك بسوط واحد والبعض الآخر يتحرك بأسواط عديدة، وقد تكون في جانب واحد أو على جانبي الخلية، أو موزعة على طول محيط الخلية.

عند تعرض الخلية البكتيرية لظروف بيئية غير مناسبة تحاط الخلية بحويصلة (Capsule) كربوهيدراتية أو بروتينية لحمايتها.

وإذا كانت الظروف المحيطة غير مواتية للنشاط والنمو تلجأ البكتريا إلى التجرثم؛ حيث تنكمش داخل الخلية مكونة الجرثوم Spore ، وعند الظروف المناسبة تعود إلى النشاط.

تنقسم البكتريا إلى قسمين تبعا لطريقة التغذية:-

أ- بكتريا ذاتية التغذية؛ وهي تحصل على الكربون والنيتروجين من مصدر غير عضوي.

ب- بكتريا غير ذاتية التغذية؛ وهي تحصل على الكربون من مصدر عضوي، أما النيتروجين فقد يكون المصدر عضويًّا أو غير عضويًّا.

وتنقسم البكتريا إلى أربعة أقسام تبعًا للاحتياجات الغازية (أكسجين وثاني أكسيد الكربون):

أ- بكتريا هوائية حتما؛ وهي تنمو في وجود الأكسجين فقط

ب- بكتريا لاهوائية اختيارية؛ وهي تنمو في وجود أو عدم وجود الأكسجين الجزيئي، وينتمي الى هذا القسم معظم أنواع البكتريا الممرضة.

ج- بكتريا لاهوائية حتما؛ وهي تنمو في عدم وجود الأكسجين الجزيئي وإذا وجد يثبط نموها.

د- بكتريا شحيحة الهواء؛ وهي تنمو في وجود تركيز منخفض من الأكسجين، ويتوقف نشاطها في حالة انعدامه.

أما بالنسبة للاحتياج إلى ثاني أكسيد الكربون، فان معظم أنواع البكتريا يكتفي بالنسبة الموجودة في الهواء، وهناك بعض الأنواع تنمو أكثر عند زيادة ثاني أكسيد الكربون.

تعتبر درجة الحرارة عاملا مهمًّا في نمو البكتريا، فهناك ثلاث درجات من الحرارة تتميز بها البكتريا عموما:-

درجة الحرارة القصوى، ودرجة الحرارة الدنيا، والدرجة المثلى. وتبعا لدرجة الحرارة المثلى تقسم البكتريا الى ثلاثة أقسام:

أ- بكتريا محبة للبرودة (Psychrophilic) ودرجتها المثلى ٢٠ °م.

ب- بكتريا وسطية الحرارة (Mesophilic) ودرجتها المثلى ٣٥ – ٣٧ °م.

ج- بكتريا محبة للحرارة (Thermophilic) ودرجتها المثلى ٤٥ °م.

تعيش معظم أنواع البكتريا عند درجة التعادل، ولكن هناك أنواع تتحمل الحموضة والقلوية، وتجدر الإشارة إلى أن بكتريا الكوليرا لا تنمو إلا في قلوية عالية نسبيا (pH = 8.5).

تعتبر البكتريا من الكائنات الدقيقة التي تلعب دورًا مهمًّا في التخلص من المواد ذات الوزن الجزيئي العالي حيث؛ تحولها الى مواد أولية ابسط ، وهذا ما يطلق عليه التكسير الحيوي وتشترك أنواع مختلفة من البكتريا في هذا العمل. وعلى سبيل المثال: فان المواد الكربوهيدراتية هي مواد الدهايدية أو كيتونية عديدة الهيدروكسيل، وتنقسم الكربوهيدرات إلى: سكريات أحادية وثنائية وعديدة. وكل من السكريات الثنائية والعديدة تتكون من وحدات بنائية من السكريات الأحادية المرتبطة مع بعضها بعضًا.

وما تقوم به البكتريا هو تحلل مائي بالإنزيمات التي تنتجها للروابط الموجودة بين الوحدات البنائية، ومن ثم يحدث التفكك إلى الوحدات السكرية الأحادية المكونة لجزئ الكربوهيدرات، ثم لا تلبس أن تقوم أنواع أخرى من البكتريا بتكسير للوحدة البنائية ذاتها وتحولها إلى مركبات أولية بسيطة، وهي: ثاني أكسيد الكربون والماء. وخلال هذه العملية الحيوية تنطلق طاقة تستفيد بها البكتريا في العمليات الحيوية المطلوبة للتكاثر.

مثال: التخمر الكحولي لجزئ سكر اللاكتوز ليعطي الكحول والغاز:

يتحول سكر اللاكتوز، وهو سكر ثنائي، إلى سكر الجلوكوز الأحادي وسكر الجلاكتوز الذي يتحول الى جلوكوز ويستمر التكسير الحيوي ليعطي حامض اللاكتيك وحامض الخليك وثاني أكسيد الكربون والماء على النحو التالي:-

$$C_6H_{10}O_6 + H_2O \rightarrow 2C_3H_5O_3$$

(سكر الجلوكوز) (حامض اللاكتيك)

$$\rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

(كحول اثيلي)

في بعض الأحيان لا يحدث التخمر الكامل، أي لا يصل التخمر إلى تكوين ثاني أكسيد الكربون والماء.

ويستفاد من البكتريا في معالجة المياه المحتوية على المواد العضوية لقيامها بتكسير تلك المواد وتحويلها إلى مركبات بسيطة وغير ملوثة للبيئة، كما هو الحال في المعالجة البيولوجية لمياه الصرف الصحي (بالحمأة المنشطة أو المرشحات الدوارة)، وأيضا في إزالة الحديد والمنجنيز.

تتواجد البكتريا في أي جسم مائي (سطحي أو ارضي) ومن أمثلتها: ليجيونيللا ***Legionella*** ومايكوبكتريا ***non-tuberculous mycobactria*** ، ومن البكتريا الممرضة المنقولة بالماء فيبريو كوليرا ***Vibrio cholerae*** المسببة للكوليرا وكاميلوباكتر ***Campylobacter*** المسببة للإسهال و إي كولاي ***E.coli O157*** التي قد تؤدي إلى الوفاة، والسالمونيللا ***Salmonella Typhi*** المسببة للتيفؤيد والشيجيللا ***Shigella*** التي قد تؤدي إلى الوفاة.

٣- البروتوزوا:

البروتوزوا؛ هي كائنات دقيقة وحيدة الخلية تنتمي إلى المملكة الحيوانية، وهى تختلف فيما بينها في الشكل والتركيب وكذلك الصفات الفسيولوجية والطبيعية. بعض هذه الكائنات عديمة الفائدة والبعض الآخر له فائدة، وتسبب بعض أنواع البروتوزوا ضررا بالغا للإنسان والحيوان والنبات. معظم البروتوزوا تتغذى على المواد الصلبة، لذلك يلاحظ وجود نظام هضمي أكثر تعقيدا من الكائنات الدقيقة الأخرى.

تعيش البروتوزوا في البحار والبحيرات والأنهار والتربة لفترات طويلة، وكذلك تعيش في أمعاء وفم الحيوانات. وتأتي العدوى من الإنسان والحيوان. ومن الأمثلة الشائعة للبروتوزوا المسببة للأمراض ومصدرها الإنسان الأميبة دوسنتاريا وهي المسببة لمرض الدوسنتاريا الأميبية.

البروتوزوا أقل الكائنات الدقيقة حساسية للمطهرات الكيميائية، ويعتبر التطهير بالأشعة فوق البنفسجية فعالا في إهلاك حويصلات الكريبتوسبوريديوم، ولكنها تكون أكثر مقاومة للمطهرات المؤكسدة مثل الكلور. يزيد حجم البروتوزوا عن ٢ ميكروميتر، وبالتالي يمكن إزالتها بالطرق الفزيكوكيميائية مثل الترويب والترسيب والترشيح وقد يصعب إزالة حويصلات الكريبتوسبوريديوم والجياردیا لذلك لابد من إدارة جيدة لعمليات الترويب والترشيح، وتجدر الإشارة إلى أن والكريبتوسبوريديوم أكثر مقامة للكلور من الجياردیا ويعيش لفترات طويلة في البيئة المائية.

٤ـ الطحالب:

هى مجموعة من الكائنات الحية المتباينة فيما بينها تباينا شديدا منها ما هو وحيد الخلية ومنها ما هو عديد الخلايا تنتمي للمملكة النباتية، وقد تكون صغيرة في الحجم بحيث لا تُرى إلا بالمجهر (٥ - ١٠٠ميكرون) أو أن تكون كبيرة الحجم وتكون خيوطا ومستعمرات تصل إلى عدة أقدام في الطول، وتتميز هذه الكائنات بأنها عديمة الجذور والسوق والأوراق والأزهار، وتنمو وتتكاثر في الأنهار والبحيرات والترع والمستنقعات والبحار والمحيطات، وقد تتواجد في الأماكن الرطبة علي الصخور والمباني. ويمكن أن تعيش في مدى واسع من درجات الحرارة والرقم الهيدروجيني.

ويبلغ عدد أنواع الطحالب ما يقرب من واحد وعشرين ألف نوع وأهم طوائفها:-

- **الطحالب الخضراء؛** وتعيش في المياه العذبة، و تشمل خمسة وعشرون نوعًا، ويصل طولها الى حجم الطحالب الحمراء، وهناك نوعيات مجهرية وحيدة الخلية مثل طحلب الكلوريلا.
- **الطحالب البنية؛** وتعيش غالبا في مياه البحار، وتشمل حوالي أربعة وخمسين نوعًا، **وهي** طحالب كبيرة الحجم؛ حيث يبلغ طولها حوالي عشرين مترًا، وهناك أنواع صغيرة الحجم يتراوح طولها ما بين ٣ إلى ٦ مم، ومن أمثلتها طحلب لامينياريا.
- **الطحالب الحمراء؛** وتضم واحدًا وثمانين نوعًا، وهي طحالب صغيرة الحجم حيث يتراوح طولها ما بين عدة سنتيمترات إلى مترا واحدا، و من أمثلتها طحلب البروفيرا.
- **الطحالب الزرقاء الخضراء** blue green algae (السيانو بكتريا Cyanobactria).ومنها طحلب سبيرولينا.

تتميز الطحالب بعدم احتياجها إلى مصدر كربوهيدراتي؛ حيث أنها تتمكن من خلال عملية البناء الضوئي أن تصنع غذائها بنفسها عن طريق امتصاص ثاني أكسيد الكربون والماء في وجود ضوء الشمس (نظرا لاحتوائها على مادة الكلوروفيل)، وتنتج من خلال هذه العملية المادة العضوية بالإضافة إلى الأكسجين كما في المعادلة التالية:-

$$CO_2 + 2H_2O \xrightarrow[\text{الكلوروفيل}]{\text{الضوء}} (CH_2O)_n + O_2 + H_2O$$

لا تشكل الطحالب خطورة علي صحة الإنسان، إلا أن هناك بعض الأنواع تفرز سموم عصبية أو سموم كبدية، وبعض هذه السموم تشكل خطورة إذا أخذت بتركيزات كبيرة. تؤثر الطحالب على نوعية

المياه، وقد تستخدم كقرينة لنقاء الماء أو تلوثها وبعضها يحدث تأثيرًا دراماتيكيًّا في محطات معالجة المياه. (ملحق ب)

هناك ثلاثة أنواع من الطحالب الزرقاء الخضراء تنتج تلك السموم وهذه الطحالب شائعة التواجد فى المياه العذبة التى تكتنفها كثير من الملوثات. ومن أمثلتها:[٢٦]

انابنا فلوس اكوا، وميكروسيس اروجيوزا، وامانزومينون فلوس- اكوا.

وقد تتسبب التجمعات الطحلبية الخضراء الزرقاء الكثيفة (Algae bloom) في إحداث المرض للثدييات والطيور والأسماك التي تتغذي عليها.

وقد تتسبب أنواع من الطحالب في إعطاء مذاق ورائحة للمياه مثل:-

انابينا، اناسيستس، استيريونيلا، نيتيلا، تابيلاريا، ستوراسترام، مالوموناس، سيندرا، سينيورا.

وقد تؤدي نوعيات من الطحالب إلي إعاقة عملية الترشيح في محطات تنقية المياه مثل:
سيندرا، كلوريلا، تابيلاريا، سيكلوتيلا، نافيكيولا، استيريونيلا، دياتوما، فراجيلاريا، اوسيلاتوريا، بالميلا، انابينا.

وهناك نوعية من الطحالب تعتبر مؤشرا لنقاء المياه مثل:-
نافيكيولا، كوكونيس، ميكراستيرياس، انكيستروديسماس، ميكروكوليس، سايكلوتيلا، رايزوكلونيوم.

وهناك أيضا نوعية أخري تعتبر مؤشرا لتلوث المياه مثل:-

سبيروجايرا، انابينا، اييوجلينا، كلوروكوكام، تيترادرون، اوسيلاتوريا، اناسيستس، كلاميدوموناسو نيدزشيا

وقد تستخدم أنواع معينة من تلك الطحالب كغذاء غني بالقيمة الغذائية مثل طحلب سبيرولينا في الولايات المتحدة الأمريكية وتايلاند والهند واليابان والمكسيك.

٥- الجسيمات المعدنية

سوف يتم الحديث عن الجسيمات المعدنية بالتفصيل في الفصل القادم.

مكونات تسبب حدوث التآكل للمواسير الفلزية

يعتبر التآكل من المشاكل الملحة التي يجب أن تؤخذ في الاعتبار أثناء إجراء أعمال معالجة المياه لأنه في بعض الأحيان تكون المياه ذات نوعية تسبب التآكل للمواسير وأنظمة ومعدات المعالجة.

ويمكن إيجاز العوامل المسببة للتآكل في ثلاثة بنود رئيسية و هي: الرقم الهيدروجيني – القلوية – تركيز عنصر الكالسيوم. ولا تتأثر المواسير البلاستيك بالرقم الهيدروجيني والقلوية و الكالسيوم ولكنها قد تسبب نموًّا بكتيريًّا نتيجة نمو طبقة هلامية رقيقة من الكتلة الحيوية علي السطح الداخلي لتلك المواسير.

جدول (١/١١) مواصفات لنوعيات مياه مقبولة من حيث التأثير على الفلزات في بعض بلدان العالم[١٧]

البيان / البلد	الرقم الهيدروجيني	قلوية (مجم/لتر)	كالسيوم (مجم/لتر)	كلوريد (مجم/لتر)	كبريتات (مجم/لتر)	أكسجين كيماوي (مجم/لتر)
السويد	٧,٥ – ٩	<٦٠	٢٠-٦٠	<١٠٠	<١٠٠	<٢
النرويج	٧,٥ – ٨,٥	٣٦-٦٠	١٥-٢٥	<٢٥	<٢٥	<٢
الدنمارك	٧ – ٨	<١٠٠	٢٠-٢٠٠	<٥٠	<٥٠	<١,٥
فنلندا	٧,٥ – ٨,٨	<٣٦	<١٠٠	<٢٥	<٢٥	<٢
هولندا	٧,٨ – ٨,٣	<١٢٠	<١٥٠	<١٥٠	<١٠٠	-
ألمانيا	٦,٥ – ٩,٥	-	<٤٠٠	<٢٥٠	<٢٥٠	<٥
انجلترا	٥,٥ – ٩,٥	<٣٠	<٦٠	<٤٠٠	<٢٥٠	-
اتحاد أوروبي	٦,٥ – ٨,٥	-	-	<٢٥٠	<٢٥٠	-
الولايات المتحدة	٦,٥ – ٩,٥	-	-	-	<٢٥٠	<٥

معالجة مياه الشرب السطحية والأرضية

أولًا: المياه السطحية

في أغلب الأحيان تكون المياه بمصادر المياه غير نقية مما يجعلها غير صالحة للاستخدام الآدمي المباشر بغرض الشرب (أي بدون معالجة)، لذلك كان لا بُد من استخدام طرق المعالجة التي تختلف أساليبها تبعا لتركيزات ونوعيات الملوثات أو الشوائب المتواجدة بالمياه الخام، وكذلك تبعًا للمواصفات المطلوبة للمياه المعالجة.

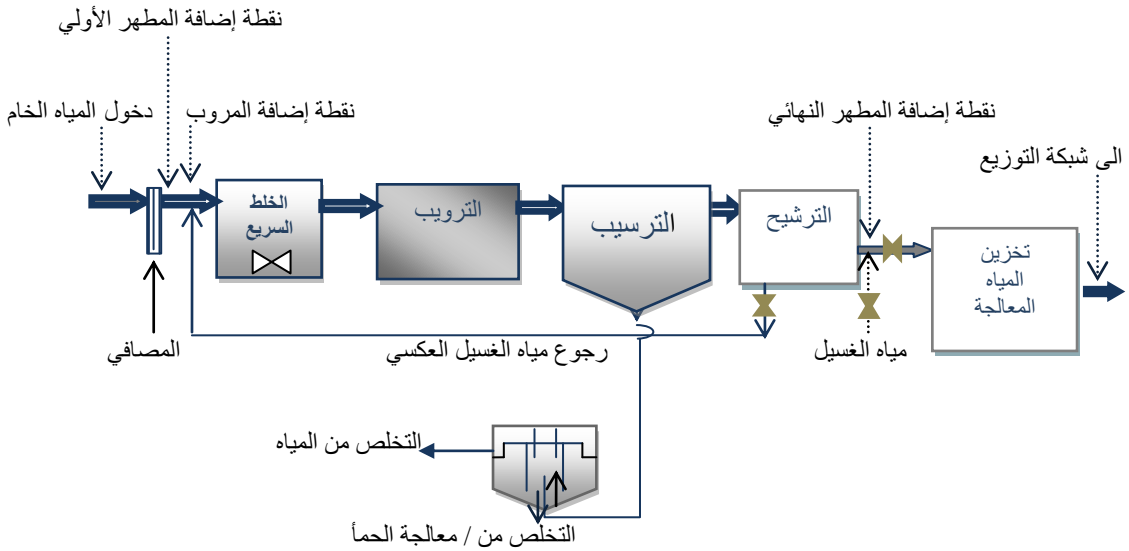
تتمثل الأولوية الأولي لمنتجي المياه في إنتاج مياه ذات نوعية مطابقة للمواصفات القياسية التي بنيت في وضعها علي الاعتبارات الصحية التي تتمثل في خلوها من البكتريا والفيروسات والمواد

السامة العضوية وغيرالعضوية والمبيدات مع الأخذ في الاعتبار الخصائص الجمالية للمياه، مثل اللون والطعم والرائحة. وكنتيجة لاتساع آفاق المعرفة في مجال تقنيات معالجة المياه وكذلك المواد الكيميائية المستخدمة لهذا الغرض، فقد ساعد ذلك علي إنتاج مياه شرب تفي باحتياجات المستهلك وتتوافق مع الاشتراطات المشددة لنوعية المياه الخام ونوعية المياه المنتجة.

١ـ المعالجة التقليدية للمياه السطحية

لكي يتحقق فصل جيد للشوائب من خلال عملية الترشيح فلا بُد من إجراء معالجة مسبقة للماء، وهذه المعالجة هي ما يُطلق عليه المعالجة التقليدية، والتي تتمثل في عمليات الترويق (التخثير Coagulation والتجميع Flocculation والترسيب Precipitation) (شكل ١/١٤).

وفي هذه المعالجة التقليدية يضاف إلى الماء الخام مادة كيميائية مخثرة مثل كبريتات الالومونيوم أو كلوريد الحديديك مع المزج السريع لتحقيق التجانس الكامل، ثم تأتي مرحلة التخثير أو الترويب ثم التجميع للشوائب وفي النهاية تتهاوى الشوائب المرتبطة مع بعضها بعضًا بواسطة المروب الى القاع تاركة الماء صافيًا. وتعتبر عملية التطهير جزءً مهمًّا في المعالجة التقليدية؛ حيث يضاف المطهر الي الماء في نقطة أو أكثر للتخلص من الكائنات الدقيقة والمسببات المرضية. وقد يختلف موقع وعدد نقاط إضافة المطهر من محطة لأخرى.



شكل (١/١٤) شكل تخطيطي للمعالجة التقليدية للمياه السطحية

فقد يضاف عند بداية دخول المياه إلى المحطة أو بعد مرحلة الترسيب مباشرة أو بعد الترشيح. وفي حالة ارتفاع المواد العضوية الطبيعية، فلا بُد من اتخاذ الإجراءات للحيلولة دون تكوّن النواتج العضوية الثانوية، ويجب الفصل الجيد للشوائب أثناء عمليات الترويق لتحقيق أداء أفضل للمرشحات.

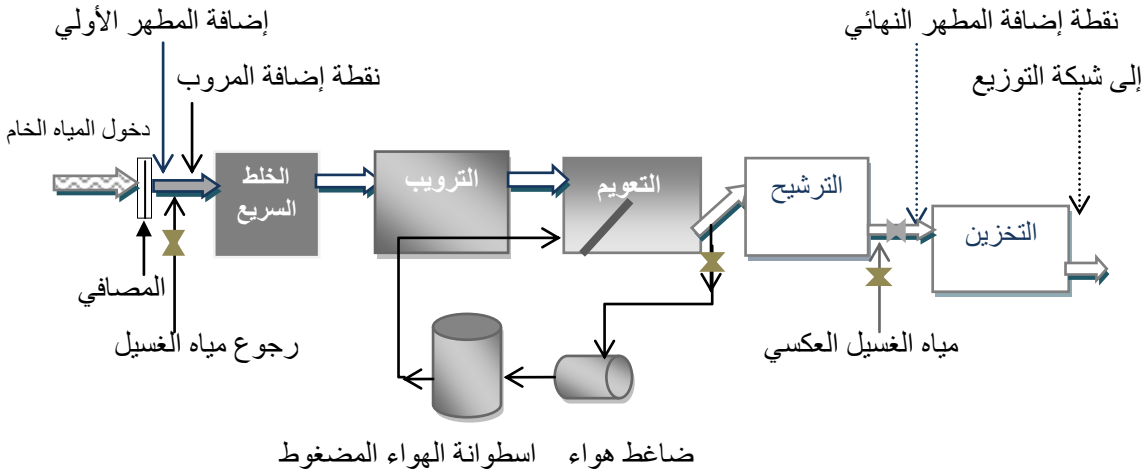
وتُعتبر المعالجة التقليدية مناسبة لأنواع المياه السطحية ذات العكارات الدائمة والمتغيرة، والتي قد تصل الي ٥٠ وحدة عكارة نفيلومترية في الظروف المعتادة، ويمكن لهذه المعالجة أن تتعامل مع العكارة الفجائية التي قد تصل الى ١٠٠٠ وحدة نفيلومترية أثناء فترات الفيضان. تتراوح الجرعات المستخدمة من المخثر من ٥ إلى ١٠٠ جم/م٣ اعتمادًا على نوعية المياه، ويختار المروب المناسب من خلال إجراء التجارب المعملية باستخدام وحدة المحاكاة للتخثير والترسيب (اختبار الجار).

٢- عمليات المعالجة المطلوبة للمياه الخام السطحية ذات الجودة العالية

عندما تكون مياه المصدر ذات نوعية عالية الجودة (تحتوي على عكارة ومواد عضوية طبيعية منخفضة)، ففي هذه الحالة قد تكون بعض مراحل المعالجة التقليدية غير مطلوبة، وقد يكتفى بالترشيح فقط.

٣- المعالجة بالتعويم أو الطفو بالهواء الذائب

في حالة احتواء الماء على الطحالب بأعداد كبيرة ويكون الترويق التقليدي غير قادر على فصل الطحالب بالترسيب الطبيعي بالجاذبية الأرضية؛ حيث تميل الطحالب إلى الطفو بدلا من الغوص، وبالتالي يحدث انسداد مبكر للمرشحات. والذي يساعد على طفو الطحالب اقتراب الكثافة النوعية لها من الكثافة النوعية للماء، كما أن عملية البناء الضوئي تكون مصحوبة بخروج الأكسجين من الطحالب وبالتالي تكون الطحالب قد صنعت لنفسها وسيلتها الخاصة للطفو بعوامات من الفقاعات الدقيقة الملتصقة بجسمها. لذلك فان أنسب طريقة لإزالة الطحالب هي المعالجة بالطفو بالهواء الذائب.



شكل (١/١٥) شكل تخطيطي لمعالجة المياه السطحية بنظام الطفو بالهواء الذائب

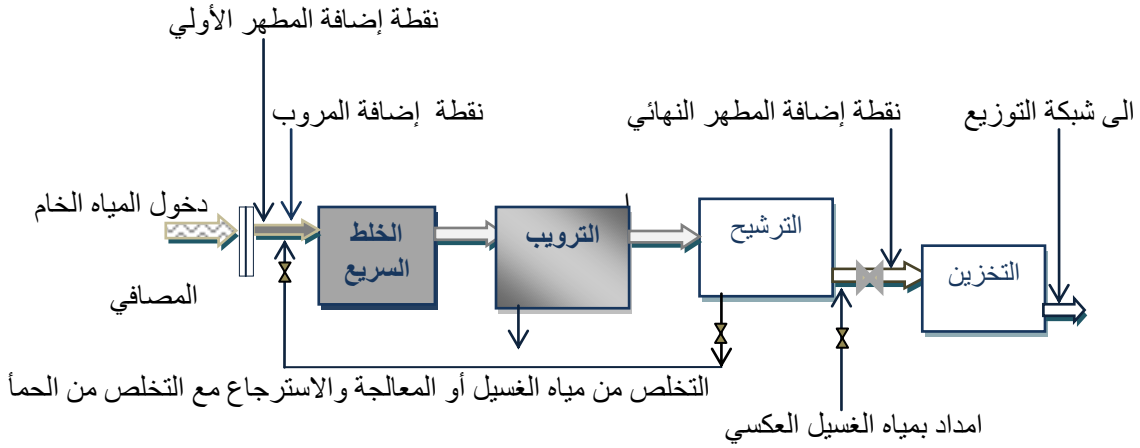
في هذه المعالجة تتحرك الشوائب بما فيها الطحالب إلى أعلى حوض الترسيب.
هناك بعض الطحالب تؤثر سلبا على أداء المرشحات مثل: دينوبريون، واستيريونيللا، وتابيلاريا (ملحق ب).

تعتبر المعالجة بالطفو بالهواء الذائب ذات كفاءة عالية في التخلص من حويصلات الكريبتوسبوريديوم والجيارديا. وكما هو الحال في المعالجة التقليدية، تضاف المادة المروبة في مرحلة الخلط السريع ثم يتبعها الترويب فالتجميع ثم الطفو بالهواء الذائب. (شكل ١/١٥)

ينبغي الإشارة هنا إلى أن المياه المحتوية على أعداد كبيرة من الطحالب قد تحتوي على تركيزات عالية من المواد العضوية الطبيعية، وهي نواتج التمثيل الحيوي الطبيعي للكائنات الحية بالماء أو التحلل الحيوي للمادة العضوية. وهذه المواد العضوية الطبيعية تتسبب في تكوين نواتج عضوية ثانوية غير مرغوب فيها من خلال تفاعلها مع المطهر المستخدم مثل الكلور. لذلك ففي حالة ارتفاع تركيزات المركبات العضوية الطبيعية بالماء الذي يعالج فلا بُد من إضافة الكلور قبل أو بعد الترشيح أو استخدام مطهر بديل مثل الأوزون أو الأشعة فوق البنفسجية حرصا علي إنتاج ماء خالي من النواتج الثانوية للتطهير بالكلور. ولا غنى عن استخدام جرعة نهائية من الكلور لضمان التطهير المتبقي حتى نهاية الشبكات.

٤- المعالجة بالترشيح المباشر:

يستخدم الترشيح المباشر في معالجة المياه السطحية التي تحتوي بصفة ثابتة نسبيًّا على عكارة ولون منخفضين وذات عُسر متوسط (٧٥ – ١٥٠ مجم / لتر كربونات كالسيوم). يتمثل الفرق بين المعالجة التقليدية والترشيح المباشر في أن مرحلة الترسيب غير موجودة في الترشيح المباشر، وقد يلغي حوض الترويب والتجميع ويستبدل بحوض تلامس ليقوم بدور الترويب والتجميع للشوائب معًا، وفي بعض الأحيان يلغي حوض الترويب ويكتفي بإضافة المروب مع الخلط السريع قبل المرشح. وهذا النوع يُطلق عليه الترشيح المباشر عبر الخط، حيث تتم عملية الترويب داخل المرشح ذاته. (شكل ١/١٦)



شكل (١/١٦) معالجة المياه السطحية بنظام الترشيح المباشر

وحيث أن هذا النظام يختصر مرحلة الترسيب؛ فهو يحقق خفض في تكلفة الإنشاء والتشغيل أيضا. تتكون ندف نقطية ذات أحجام صغيرة قابلة للترشيح، وبطبيعة الحال لا تتكون الندف كبيرة الحجم التي تتطلب الترسيب. وحيث أن الجرعات صغيرة فالحمأ المتكون صغير وبالتالي تكلفة معالجة الحمأ والتخلص منه تكون صغيرة.

عيوب هذا النوع من المعالجة:

- لا يستجيب الترشيح المباشر للتغيرات الفجائية الحادة في العكارة أو اللون أو في كليهما معًا.
- لا يمكن لهذا النوع أن يتعامل مع المياه ذات العكارة العالية أو اللون الشديد أو كليهما معًا.

- ففترة مكوث المياه قليلة نسبيًا بالمقارنة بالمعالجة التقليدية، وبالتالي لا يمكن التحكم في المذاق والرائحة اللتين قد يأتيان بصورة موسمية.

يعتبر اختيار نوع المروب والجرعة لهما أهمية قصوى في نظام الترشيح المباشر. تتراوح جرعات المروب (كبريتات الألومونيوم) المستخدمة في الترشيح المباشر تتراوح ما بين ٦ – ١٢ جم/م٣ وقد تصل أحيانا إلى ١٥جم/م٣.

وقد حددت وكالة أعمال المياه الأمريكية معايير المياه السطحية التي تستوجب المعالجة بنظام الترشيح المباشر، وهي على النحو المبين بالجدول التالي:[٢٧]

جدول (١/١٢) معايير المياه السطحية التي تستوجب المعالجة بنظام الترشيح المباشر

البند	القيمة
اللون	اقل من ٤٠ وحدة كوبالت – بلاتين
العكارة	اقل من ٥ وحدة عكارة نفيلومترية
الطحالب	أقل من ٢٠٠٠ وحدة في الملليلتر
الحديد	اقل من ٠,٣ مجم/لتر
المنجنيز	أقل من ٠,٠٥ مجم/لتر

وقد يُستخدم الترشيح المباشر مع نوعيات من المياه أقل جودة من المذكورة، ولكن هذا يستلزم إجراء بعض التعديلات على نظام المعالجة لمواجهة المشاكل التي قد تطرأ.

٥- استخدام الكربون المنشط في المعالجة

يُستخدم الكربون المنشط إذا كان هناك مشاكل تتعلق باللون والطعم و الرائحة كما أن للكربون المنشط دورًا كبيرًا في التخلص من المواد العضوية ذات السُمية، مثل المواد العضوية المكلورة. ويضاف الكربون المنشط علي شكل بودرة ناعمة في مرحلة الترويب والترسيب، أو أن يكون مضاف إلي المرشح السريع علي شكل حبيبات، و يمكن لهذا النوع المحبب أن يعاد تنشيطه علي دورات منتظمة مرة كل ثلاث سنوات أو حسبما تكون درجة الفعالية وكم الملوثات التي قام بامتصاصها والاحتفاظ بها، فكلما كانت المياه أنقي وأقل في كمية الملوثات القابلة للامتصاص أو الادمصاص علي سطح الكربون المنشط طالت فترة فعاليته واستخدامه.

ثانيًا: معالجة المياه الأرضية

تنشأ المياه الأرضية نتيجة الارتشاح خلال طبقات الأرض، ويذوب فيها غاز ثاني أكسيد الكربون الذي ينتج من هدم المواد العضوية (بقايا النباتات). وأثناء مرور هذه المياه خلال طبقات الأرض فان المحتوي من المواد الدبالية واللون والرائحة تقل وتقل معها البكتريا والفيروسات والكائنات وحيدة الخلية (بروتوزوا) إن وجدت.

تعمل المياه أثناء حركتها علي إذابة الأملاح المحتوية علي عنصر الماغنسيوم والكالسيوم والصوديوم والحديد والمنجنيز وكذلك الكبريتات والكلوريدات والكربونات. وقد تكون المياه الأرضية عالية الجودة ومطابقة للمواصفات القياسية لنوعية مياه الشرب من دون أي نوع من المعالجة. وقد تحتاج لمعالجة لإزالة الحديد والمنجنيز والأملاح إن وجدت بتركيزات عالية.

يوضح الجدول (١/١٣) ملخصًا للمكونات غير المرغوب فيها في المياه الأرضية وطرق معالجتها.

قد تكون المياه الأرضية العميقة عالية الجودة من حيث الاحتواء على الشوائب التي تعطي عكارة والشوائب الميكروبيولوجية، وقد تكون خالية أيضا من الشوائب المعدنية، ففي هذه الحالة يكتفي بالتطهير النهائي.

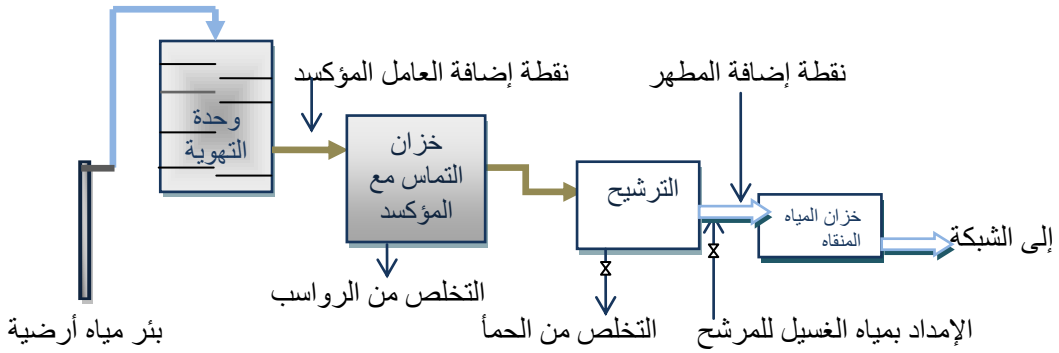
جدول (١/١٣) ملخص للمكونات غير المرغوب فيها في المياه الأرضية وطرق معالجتها.

المكون	التأثير	طريقة الإزالة
الحديد (Fe^{2+}, Fe^{3+}) والمنجنيز (Mn^{2+}, Mn^{4+})	- تعكير المياه بعكارة بنية اللون. - تلوين الاجسام التي تسقط عليها الماء باللون الاصفر والبني والأسود. - إعطاء رائحة ومذاق غير مقبول	- الأكسدة بالتهوية أو بإضافة احد عوامل الأكسدة مثل الكلور أو برمنجانات البوتاسيوم أو الأوزون ثم الترشيح
العسر العالي (Ca^{2+}, Mg^{2+})	- تكوين الترسيبات في أنظمة معالجة المياه والمراجل - عدم تكون رغوة عند استخدام الصابون واستهلاك كمية كبيرة منه.	- التبادل الأيوني باستخدام وحدة التبادل الكاتيوني. - الترسيب باستخدام الجير أو قلويات أخرى.
النترات (NO^{3+}) النيتريت (NO^{2+})	- إعاقة أكسجة الدم	- التبادل الأيوني باستخدام وحدة التبادل الانيوني. - المعالجة البيولوجية
الفلوريد (F^{-})	- تؤدي زيادته أو نقصه إلى تشويه الأسنان	- الادمصاص باستخدام الالومينا المنشطة. - الترسيب باستخدام كبريتات الالومونيوم أو بالجير، أو الترشيح خلال وسط تبادل انيوني.
مبيدات الآفات	- تسبب مشاكل صحية بالغة.	- الادمصاص باستخدام الكربون المنشط. - التكسير باستخدام الأكسدة بالأوزون أو فوق أكسيد الهيدروجين. - الهدم البيولوجي.

١- إزالة الحديد والمنجنيز

قد تحتوي المياه الأرضية على عنصري الحديد والمنجنيز وينبغي إزالتهما، ويجرى ذلك من خلال عمليات الأكسدة والترسيب والترشيح. (شكل ١/١٧)

عند احتواء ذلك الماء على مواد عضوية فهذا يسبب إعاقة لعمليات الإزالة بالأكسدة والترسيب. يمكن أكسدة الحديد بالتهوية عند رقم هيدروجيني "٨" أو أعلى من ذلك بصورة سريعة عند عدم وجود مواد عضوية بالمياه. تجرى الأكسدة باستخدام الكلور أو الأوزون أو ثاني أكسيد الكلور، وتستخدم برمنجانات البوتاسيوم بصورة شائعة في إزالة المنجنيز وهو الأكثر صعوبة في إزالته عن الحديد. ويستخدم الرمل الأخضر مع البرمنجانات في تلك المعالجة.



شكل (١/١٧) شكل تخطيطي لمراحل إزالة الحديد والمنجنيز من مياه أرضية

٢- إزالة العسر بالترسيب بالجير

تحتوي المياه العسرة على كميات متزايدة من كاتيون الكالسيوم والماغنسيوم. وتُجرى إزالتهما باستخدام الجير المطفأ (ماء الجير)، تتطلب هذه المعالجة إضافة الجير المطفأ إلى الماء العسر لرفع الرقم الهيدروجيني بالقدر الكافي لترسيب الكالسيوم والماغنسيوم. وفي حالة إذا كان العُسر غير كربوناتي، فانه من الضروري إضافة الصودا آش لترسيب الكالسيوم والماغنسيوم.

عند استخدام الجير في ترسيب الكالسيوم والماغنسيوم يترسب الكالسيوم على هيئة كربونات كالسيوم ويترسب الماغنسيوم على هيئة هيدروكسيد ماغنسيوم. وهذا الراسب المتكون والذي يتجمع في قاع أحواض الترسيب يكون ما يكوّن ما يُعرف بالحمأ، ويمكن إعادة تدوير هذا الحمأ في الأنظمة التي تستخدم مراحل الخلط السريع والتجميع والترسيب، تعمل إعادة التدوير على تحسين ترسيب كربونات الكالسيوم وتجميع الجسيمات المرسبة. وينبغي إعادة ضبط الرقم الهيدروجيني للماء المعالج الذي أصبح ما بين ١٠- ١١ من خلال إضافة الحامض المناسب لنوعية المياه المطلوبة.

٣- التبادل الأيوني الكاتيوني

يُعتبر الزيوليت هو الأكثر شيوعًا كمبادل ايوني صوديومي، حيث يعتمد على التبادل بين الصوديوم وكل من الكالسيوم والماغنسيوم. ومع التشغيل المستمر للمبادل الأيوني يفقد قدرته على التبادل، وهذا يتطلب إعادة تنشيطه وتجديد قدرته من خلال الغسيل العكسي باستخدام محلول كلوريد الصوديوم (ملح الطعام) ثم الغسيل بالماء النقي.

والزيوليت من معادن السليكات التي تتركب من سيليكات الالومونيوم والصوديوم وقد يتواجد معهما البوتاسيوم والكالسيوم والباريوم. وتتواجد معادن الزيوليت في الطبيعة مصاحبة للصخور النارية، ويتم تصنيعها من السليكا وأكسيد الألومونيوم وهيدروكسيد الصوديوم، ونظرا للطبيعة التركيبية لمعادن الزيوليت فيطلق عليها "الغربال الجزيئي" (Molecular sieve)؛ حيث يحتجز بعض العناصر ويمرر الأخرى.

٤- التبادل الأيوني الانيوني

تستخدم هذه المعالجة راتنج التبادل الأيوني الانيوني لإزالة انيونات النترات والكبريتات. وتجدر الإشارة إلى أن تواجد الحديد والمنجنيز والمواد العضوية الطبيعية يتطلب معالجة أولية للتخلص منهم حتى لا يحدث تلف للمبادل الأيوني.

مراحل المعالجة الكيماوية للمياه السطحية

يوضح الشكل (١/١٤) مراحل المعالجة الكيميائية للمياه السطحية، وقد تضاف الى هذه المراحل مراحل أخري اعتمادًا علي نوعية المياه الخام التي تعالج.

- **مرحلة الفصل الميكانيكي:** تقوم هذه المرحلة بفصل الشوائب ذات الأحجام الكبيرة.
- **مرحلة الترويب:** في هذه المرحلة يضاف المروب (ملح الالومونيوم أو الحديد).
- **مرحلة الترسيب أو التعويم:** في هذه المرحلة تفصل الجسيمات التي تجمعت و التي تكونت في مرحلة الترويب عن المياه إما بالترسيب أو بالطفو.

في نظام الترسيب؛ تتوجه الجسيمات التي تجمعت الى قاع حوض الترسيب نتيجة ارتفاع كثافتها بالمقارنة بكثافة المياه؛ حيث يصل التحميل السطحي المعتاد في حوض الترسيب حوالي ١متر مكعب/ ساعة. أما في نظام التعويم أو الطفو تلتصق الفقاعات الهوائية بالجسيمات التي تجمعت، مما يجعلها اقل كثافة من المياه وبالتالي تطفو فوق سطح المياه مكونة طبقة من الحمأ.

يذوب الهواء في الماء عند ارتفاع الضغط ليخلق ما يُعرف بالماء المشتت، وعندما يصل الضغط إلي الضغط الجوي تتكون الفقاعات الهوائية المجهرية التي تلتصق بالجسيمات، وهذا يعطي للجسيمات خاصية الطفو، وبالتالي تتغلب علي قوي الجاذبية و ترتفع لأعلي.

هذه المحطات التي تعمل بنظام التعويم تكون مدمجة أي تشغل حيزًا اصغر من تلك التي تعمل بنظام الترسيب، ويكون التحميل السطحي بالمدمجة في حوض الطفو في المدى من ٥ - ١٠ متر

مكعب/ساعة، ويكون الحمأ المتكون فيها محتويا علي مواد صلبة أكثر من الذي يتكون بأحواض الترسيب.

- **مرحلة الترشيح:** وفي نظام الترشيح السريع يحدث فصل الجسيمات المتبقية التي لم تترسب في مرحلة الترسيب، وفي هذا النوع من الترشيح يتراوح معدل الترشيح ما بين ٥ - ١٠ متر مكعب /ساعة.

وهناك نظام الترشيح المباشر الذي اشرنا إليه من قبل، وفي هذا النظام يضاف المروب الى الماء الخام مباشرة قبل وصولها إلى المرشح، وليس هناك حوض ترسيب أو تعويم بل إن الذي يحدث هو تكوين جسيمات متجمعة داخل طبقة المرشح؛ حيث تفصل، ويتميز هذا النوع بقصر وقت الفصل؛ حيث يبلغ بضع دقائق بينما النوع التقليدي يكون وقت الفصل ما بين ٢٠- ٦٠ دقيقة.

عملية معالجة المياه السطحية بالترويب الكيميائي

تهدف عملية الترويب الكيميائي الى تجميع المواد الدبالية والجسيمات العالقة و جعلها علي هيئة جسيمات أكبر حجما و أكثر كثافة و قابلة للترسيب و الهبوط إلي القاع بفعل الجاذبية الأرضية، و يعتبر اختيار المادة المروبة أو المخثرة المناسبة علي قدر كبير من الأهمية نظرا لما تتطلبه هذه العملية من تحقيق المثالية للترويب والترسيب.

ماذا يحدث عند إضافة المروب إلي المياه؟

عند إضافة مادة حامضية إلي المياه فإنها ترفع تركيز ايون الهيدروجين (H^+)، مما يسبب انخفاض الرقم الهيدروجيني للماء. و إذا احتوى الماء علي ايونات ذات مقدرة علي معادلة هذه الشحنات الموجبة لايونات الهيدروجين في هذه الحالة لا ينخفض الرقم الهيدروجيني كثيرًا، وهذه الايونات المعادلة موجودة بالمياه السطحية وهي ايونات البيكربونات والكربونات والهيدروكسيدات ... الخ وتسبب هذه الايونات حدوث ما يعرف بمقدرة الماء علي تنظيم الرقم الهيدروجيني (Buffering).

تقاس المقدرة التنظيمية للماء بالقلوية ويعبر عنها بالمللي جرام بيكربونات (HCO_3^-) /لتر ماء أو بالمللي مكافئ حامض /لتر ماء، أو بالمللي جرام كربونات كالسيوم /لتر و تعتبر ايونات البيكربونات والكربونات هي الأكثر إسهامًا في قيمة قلوية الماء.

توضح المعادلة الآتية ما يحدث من تفاعل كيميائي عند إضافة مروب كبريتات الالومونيوم:-

$$Al_2(SO_4)_3 + 6HCO_3^- \rightarrow 2Al(OH)_3.3H_2O + 6CO_3^{--} + 3SO_4^{--} \quad (١/١٥)$$

نجد في هذه المعادلة أن كبريتات الالومونيوم تتفاعل مع ايونات البيكربونات مكونة هيدروكسيد الألومونيوم، و هذا التفاعل يؤدي الى خفض قلوية المياه وفي نفس الوقت يزيد تركيز ثاني أكسيد الكربون وهذا يسبب انخفاض الرقم الهيدروجيني و في نفس الوقت يزيد تركيز ايونات الكبريتات. وإذا حدث أن تناقص الرقم الهيدروجيني إلي دون الحد الأدنى المنصوص عليه في المواصفات الصحية للماء فيجب إعادة ضبط الرقم الهيدروجيني برفعه بالجير المطفئ (هيدروكسيد الكالسيوم).

إن التناقص الحادث للرقم الهيدروجيني يعتمد علي قلوية المياه، وانخفاض القلوية يعتمد على جرعة الشَّبَّة المستخدم، فكل ١مجم/لتر من بلورات كبريتات الالومونيوم ذات التركيب الكيمائي $Al_2(SO_4)_3.14H_2O$ مياه تستهلك كمية من القلوية تعادل ٠,٥ مجم /لتر ($CaCO_3$)، ويتكون راسب من هيدروكسيد الالومونيوم.

فمثلا عندما تكون الجرعة المستخدمة من هذا المروب ٣٠ مجم/لتر، فان كمية القلوية المطلوبة أو التي تستهلك للتفاعل تكون ١٥ مجم/لتر. ويمكن أن نقول أن ٠,٥ مول من بلورات كبريتات الالومونيوم تستهلك أو تخفض القلوية (كربونات كالسيوم) بمقدار ١,٥ مول كما توضحه المعادلة (١/١٦).

$$Al_2(SO_4)_3.14\ H_2O + \mathbf{3}Ca(HCO_3)_2 + H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3.3H_2O + \mathbf{6}H_2O + 6CO_2 + \mathbf{3}CaSO_4 + 2\ H_2O \quad (1/16)$$

في حالة استخدام عديد كبريتات الالومونيوم (Polyaluminum sulphate) أو عديد كلوريد الالومونيوم (Polyaluminum chloride) تكون ايونات الالومونيوم في صورة متبلمرة أو تعددية وذات شحنات كهربية أكثر كثافة نسبيًا من الحالة الأحادية لتلك المروبات لذلك يحدث تعادل سريع نسبيًا لشحنات الجسيمات العالقة.

عندما تكون نسبة هيدروكسيد الالومونيوم ١,٥ (أي ١,٥ مول من ايون الهيدروكسيد لكل مول من ايون الالومونيوم)، أو ٥٠% نسبة القاعدية فان التفاعل يسير علي النحو الآتي:-

$$Al(OH)_{1.5}Cl_{1.5} + 1.5HCO_3^- \rightarrow Al(OH)_3 + 1.5CO_2 + 1.5Cl^- \quad (١/١٧)$$

في هذه الحالة لا تنخفض القلوية ويكون ثاني أكسيد الكربون المتكون قليلا، ويوضح الجدول (١/١٤) مقارنة بين ثلاثة مروبات من حيث عدد المولات المطلوبة لإنتاج مول واحد من هيدروكسيد الالومونيوم.

جدول (١/١٤) مقارنة بين عدد المولات من كبريتات الالومونيوم وعديد كبريتات الالومونيوم و عديد كلوريد الالومونيوم المطلوبة لإنتاج ١مول من هيدروكسيد الالومونيوم.

البند / المروب	كبريتات الالومونيوم (٠,٥ مول)	عديد كبريتات الالومونيوم (١ مول)	عديد كلوريد الالومونيوم (١ مول)
كربونات الكالسيوم المطلوبة أو المستهلكة ($CaCO_3$)	١,٥	-	-
كمية البيكربونات المطلوبة أو المستهلكة (HCO_3^-)	٣	١,٥	١,٥
كمية ثاني أكسيد الكربون المنطلقة (CO_2)	٣	١,٥	١,٥
كمية الكبريتات المضافة (SO_4^{2-})	١,٥	١,٥	-
كمية الكلوريد المضافة (Cl^-)	٠,٠	٠,٠	١,٥

في حالة انعدام قلوية المياه أو أن تكون موجودة بكمية غير كافية للتفاعل مع المروب المضاف وتكوين هيدروكسيد الألمونيوم، فان استخدام مثل تلك المروبات ذات القاعدية العالية سوف لا يسبب هبوط للرقم الهيدروجيني و بالتالي ليس هناك حاجة لإعادة ضبطه بالجير أو غيره من القلويات.

الآليات الرئيسية لعملية الترويب Coagulation mechanisms

أولا: آلية معادلة الشحنات Charges neutralization

عادة ما تكون الجسيمات العالقة بالماء ذات شحنات سالبة، وعندما تضاف المادة المروبة مثل أيونات الالومونيوم أو الحديد فإنه تحدث معادلة لتلك الشحنات السالبة. تحدث هذه الآلية بسرعة فائقة فى زمن لا يتعدى الثانية الواحدة (٠,٠٠٠١ – ١ ثانية). ولكي تتحقق الظروف المثالية لذلك فيجب أن يكون الرقم الهيدروجيني للماء في المدى من ٤,٢ – ٥,٢ عند استخدام مروب كبريتات الألومونيوم

وفى حالة استخدام مروبات الحديد فإن هذا المدى من الرقم الهيدروجيني يكون في مدى أوسع من ذلك (٣,٥ – ٧).

ثانيا: آلية الترويب بالكنس Sweep coagulation

في هذه الآلية تتجمع الجسيمات متناهية الصغر و تصبح ذات أحجام أكبر بواسطة هيدروكسيد الفلز (هيدروكسيد الألومونيوم أو هيدروكسيد الحديد). تحدث هذه الآلية في وقت أكبر نسبيًّا من آلية معادلة الشحنات فهي تحدث في فترة زمنية تتراوح ما بين ١- ٧ ثوانٍ، و يجب أن يكون الرقم الهيدروجيني في المدى من ٥,٥ – ٦,٥ في حالة استخدام كبريتات الألمونيوم، و في المدى من ٥,٥ – ٨,٠ في حالة استخدام مروبات الحديد. وغالبا ما تعتمد عملية الترويب في محطات المياه علي هذه الآلية؛ حيث انه من الصعوبة بمكان إجراء الخلط السريع للمروب مع المياه، وهذا مطلوب في آلية معادلة الشحنات كما أن الرقم الهيدروجيني عادة ما يكون في المدى من ٥,٥ – ٧,٥ و هذا يعضد من آلية الترويب بالكنس التي تتم في هذا المدى.

المعالجة الكهروكيميائية للمياه السطحية (الترويب الكهربي):- Electrocoagulation

يعتمد الترويب الكهروكيميائي على تخليق المادة المروبة في المياه المعالجة مباشرة بطريقة كهربية دون الحاجة إلى استخدام مروب كيميائي. يتكون المروب من خلال الأكسدة الناشئة عن التحلل الكهربي للوح من الحديد أو الألومونيوم (الأنود) في خلية تحليل كهربي. وكنتيجة للتحلل الكهربي تتكون الكاتيونات (Fe^{3+} أو Al^{3+})، وهي المسئولة عن معادلة شحنات الشوائب بالماء.

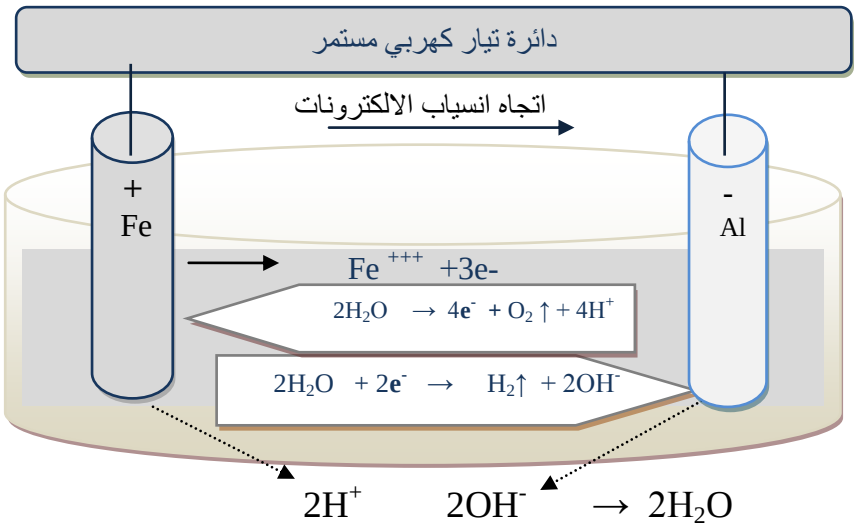
تختلف خصائص ندف الترويب بالتحلل الكهربي اختلافًا دراماتيكيًّا عن خصائص ندف الترويب الكيميائي في أن الراسب المتكون بالتحليل الكهربي سواء أكان هيدروكسيد الالومونيوم أو هيدروكسيد الحديديك يحتوي على نسبة قليلة من الماء المرتبط، وبالتالي يكون لهذا الراسب مقاومة انزلاق (قص) عالية وبالتالي يصبح سهل الانفصال عن السائل.

وقد استخدمت تقنية الترويب الكهربي في أمريكا الجنوبية وأوروبا في معالجة مياه الصرف الصناعي المحتوية على الفلزات.[٢٨] وأيضا في معالجة مياه صرف الصناعات الغذائية، والمياه المحتوية على الزيوت، وفي ازالة الشوائب العالقة، والأصباغ، والمواد العضوية، والعناصر الثقيلة، والفلور من الماء.[٢٩]

١ـ وصف لتقنية الترويب الكهربي

يتكون مفاعل الترويب الكهربي من خلية التحليل الكهربي التي تتكون من أنود وكاثود ومصدر لتيار كهربي مستمر يمكن التحكم فيه (شكل ١/١٨). عندما يتم تشغيل الخلية يحدث تآكل كهروكيميائي لمادة الأنود نتيجة عملية الأكسدة التي يتعرض لها الأنود، بينما يتعرض الكاثود لحالة من الثبات. ويمكن أن تكون مادة الأنود والكاثود متماثلة مثل الحديد أو الالومونيوم أو التيتانيوم أو الجرافيت ويمكن أن يكونا من مادتين مختلفتين، ويعتمد هذا الاختيار على نوعية الماء المعالج ونوعية الشوائب المراد إزالتها.

يخضع الأنود (الجانب الموجب من الخلية) أثناء التحلل الكهربي إلى تفاعلات آنودية، بينما يخضع الكاثود (الجانب السالب من الخلية) لتفاعلات كاثودية.



$$2H^+ \quad 2OH^- \rightarrow 2H_2O$$

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

شكل (١/١٨) خلية تحليل كهربي

٢ـ التفاعلات الآنودية:

أولا: إذا كان الأنود حديد أو الومونيوم

في هذه الحالة يتآكل الحديد والألومونيوم نتيجة الأكسدة التي ينجم عنها تكوّن ايونات الحديديك والألومونيوم التي ترتبط بالهيدروكسيد ويتكون راسب هيدروكسيد الحديديك وهيدروكسيد الالومونيوم على التوالي.

جدير بالذكر؛ انه لكي يحدث التحلل الكهربي ويتكون راسب يقوم بعملية الترويب والمعالجة، فلا بُد من احتواء المياه المعالجة على أملاح ذائبة لكي تسمح بمرور تيار كهربي خلالها.

"الماء المقطر أو الخالي من الأملاح لا يمرر تيارًا وبالتالي لا يحدث فيه تحلل كهربي".

توضح المعادلات الآتية التفاعلات الآنودية للحديد؛ حيث تحدث أكسدة للحديد ويتحول الى أيون الحديديك الذي يتحد مع ايون الهيدروكسيد ويكونا معًا راسب هيدروكسيد الحديديك:

(١/١٨) $$Fe \rightarrow Fe^{3+} + 3e^-$$

(١/١٩) $$2H_2O \rightarrow 4e^- + O_2\uparrow + 4H^+$$

أما التفاعلات الآنودية للالومنيوم في على النحو الآتي:-

(١/٢٠) $$Al \rightarrow Al^{3+} + 3\,e^-$$

(١/٢١) $$2H_2O \rightarrow 4e^- + O_2\uparrow + 4H^+$$

نلاحظ أن الألومونيوم تأكسد وتكوّن راسب هيدروكسيد الألومونيوم أبيض اللون.
يصاحب التفاعلات الآنودية تكوّن فقاعات من غاز الأكسجين عند الأنود.

عندما يكون الأنود حديدًا يتكون راسب اصفر اللون في البداية ثم يتحول إلى اللون أحمر الطوبي ثم يتحول الى اللون البني نتيجة تكوّن هيدروكسيد الحديديك الذي يزداد في القتامة مع الوقت نتيجة زيادة التركيز والأكسدة.

٣- التفاعلات الكاثودية:

سواء كان الكاثود حديد أو الومونيوم (تفاعلات اختزال)

(١/٢٢) $$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2OH^-$$

يصاحب التفاعلات الكاثودية تكوّن فقاعات من غاز الهيدروجين عند الكاثود.

قد تُستغل هذه التجربة العملية استغلالا سلبيًّا للادعاء بتلوث الماء، فيشار إلى اللون والراسب المتكون على أنه الدليل القاطع على التلوث. وإذا عكسنا وضع الأنود والكاثود وأصبح الحديد كاثودا والألومونيوم آنودا، فلا يتكون لون بنيا نظرا إلى أن تفاعلات أنود الالومونيوم تكون راسبًا ابيض اللون لا يبدو واضحا كما يحدث مع الحديد إذا كان آنودًا. وتجدر الإشارة إلى أننا إذا استبدلنا الماء المستخدم بماء مقطر فلا نلاحظ أي تكوّن رواسب سواء أكان الأنود حديد أو الومونيوم، هذا يعطي دلالة إلى أن اللون المتكون مع ماء الصنبور لا يعني تلوثًا للماء. ولابد من استخدام الطرق العلمية المتفق عليها للإشارة إلى نوعية الماء.

إزالة طفيليات كريبتوسبوريديوم والجيارديا المسببتان للاضطرابات المعوية

(Cryptosporidium and Giardia)

انه نظرا لأهمية التخلص طفيليات كريبتوسبوريديوم والجيارديا (بروتوزوا طفيلية)، فقد أعطت الجهات العلمية والصحية اهتمامًا كبيرًا بهذه المسببات المرضية الناشئة عن تلوث المياه، حيث وجد أن كثيرًا من حالات الإصابة بالإسهال كان سببها شرب مياه ملوثه بالبروتوزوا الطفيلية، وهي كائنات دقيقه وحيده الخلية.

في الأحوال العادية تحاط تلك الطفيليات بحويصلات واقيه تحميها من التأثيرات البيئية الضارة بها وخصوصا المطهرات مثل الكلور، وتكون أكثر مقاومة للكلور من الفيروسات ومن أكثر أنواع البكتريا.

وتجدر الإشارة إلى أن حويصلات الجيارديا والكريبتوسبوريديوم تقاوم تأثير الكلور عند الجرعات المستخدمة في محطات المياه، كما أن وقت المكوث داخل المحطة غير كافٍ لإبادتها، وتعتبر حويصلات الكريبتوسبوريديوم هي الأكثر مقاومة لمطهر الكلور من حويصلات الجيارديا. وحويصلات الجيارديا أكثر مقاومة للكلور من بكتريا القولون (كولي فورم).

ويطلق علي حويصلة **كريبتوسبوريديوم " أوأو سيست " oocyst و حويصلة الجيارديا "سيست "** cyst.. تسبب مثل هذه الطفيليات الاضطرابات المعوية والإسهال والإعياء والمغص الحاد والحمَّى. وتنتشر ألعدوي بالتلامس المباشر بين الناس أو التلامس بين الحيوان و الإنسان، و هناك ألعدوي غير المباشرة من خلال شرب المياه الملوثة.

تحدث ألعدوي من خلال جرعات صغيرة؛ حيث تتسبب الجرعة من ١٠ – ١٠٠ حويصلة كريبتوسبوريديوم في الإصابة، بينما تتسبب الجرعة من ٢٥ - ١٠٠ حويصلة جياردیا في الإصابة،[١٧] وهذا يعني انه لا بُد من التخلص الكامل من الحويصلات بمحطات المعالجة نظرًا لصغر الجرعات المسببة لحدوث العدوى.

هناك العديد من أنواع الكريبتوسبوريديوم والجياردیا، ولكن الأنواع المسببة للأمراض هي **كريبتوسبوريديوم بارفوم (Cryptosporidium parvum) وجياردیا انتستاينالي (Giardia intestinalis)**، و تتواجد مثل هذه الأنواع الممرضة بمياه الأنهار والبحيرات الملوثة بمياه الصرف الصحي.[٣٠]

الجدير بالذكر أن حويصلة الكريبتوسبوريديوم متناهية الصغر حيث يتراوح قطرها من ٤- ٦ ميكروميتر، بينما حويصلات الجياردیا يتراوح قطرها ما بين ٨- ١٢ ميكروميتر،[٣٠، ٣١] و يمكن إزالة أكثر من ٩٩,٩% من حويصلات الجياردیا اما بالمعالجة التقليدية أو المعالجة بالترشيح المباشر التي تحقق عكارة ما بين ٠,١ - ٠,٢ وحدة عكارة نفيلومترية،[٣١] ويمكن التخلص منها بالكامل من خلال الترشيح البطيء.[٣٢] وحيث أن مثل هذه الكائنات الدقيقة (البروتوزوا) تسلك سلوك الجسيمات العالقة فيجب الاهتمام بعملية الترويب حتى تتحقق أعلي كفاءة في إزالة هذه المسببات المرضية الخطرة.

المياه المعبأة

تخضع المياه المعبأة للمواصفات القياسية سواء أكانت معدنية طبيعية،[٣٣، ٣٤] أو غير معدنية[٣٥-٣٧]. وهناك مدى واسع من أنواع المياه المعبأة اعتمادًا على النوعية والمصدر.

ويمكن تقسيم المياه المعبأة إلى ثلاثة أنواع: مياه معدنية طبيعية، ومياه سطحية أو أرضية معالجة، ومياه الصنبور، وفيما يلي توضيح لكل نوع:-

أولا: مياه معدنية طبيعية معبأة

- هي مياه نقية مستخرجة من ينابيع أو آبار عميقة ولا يضاف إليها أي نوع من الإضافات.
- تحتوي تلك المياه على أملاح معدنية معينة وبكميات نسبية متميزة، كما تحتوي على عناصر نادرة مفيدة.
- التركيب الكيميائي ثابت، ولا يزيد المحتوي من العناصر الثقيلة عن الحدود المسموح بها في المواصفة القياسية.
- تعبأ بموقع الاستخراج.
- لا بُد من انتظام تدفق المياه من البئر مع ثبات درجة الحرارة.
- لا تخضع للمعالجة إلا إذا كان هناك ضرورة (كوجود بعض المكونات غير الثابتة مثل الحديد والمنجنيز والكبريتيد)، وطبقا لما تحدده المواصفات القياسية مثل:-

- إزالة للحديد أو المنجنيز والكبريت والزرنيخ بالترويق الطبيعي أو الترشيح دون إضافة أي نوع من الإضافات الكيميائية، وقد تستخدم التهوية إذا كان ذلك ضروريا للتعجيل من فصل الحديد والمنجنيز والكبريتيد. وهذه المعالجة المسموح بها لا تؤثر علي التركيب المعدني للمياه.
- غير مسموح نقل هذه المياه في خزانات لكي يتم تعبئتها في مكان أخر.

وهناك نوعيات من المياه المعدنية الطبيعية المختلفة من حيث الاحتواء على ثاني أكسيد الكربون ويمكن تصنيفها على النحو التالي[٣٤]:-

١ـ مياه معدنية طبيعية مكربنة طبيعيا

هي مياه معدنية تحتوي على ثاني أكسيد الكربون من نفس المصدر، وهذا الغاز يخرج تلقائيًّا تحت الظروف الطبيعية من الضغط ودرجة الحرارة.

٢- مياه معدنية طبيعية غير مكربنة

لا تحتوي تلك المياه على ثاني أكسيد الكربون حر سوى التركيز الذي يحافظ على وجود أملاح البيكربونات في صورة ذائبة (الذي يحقق التوازن بين الكالسيوم والكربونات).

٣- مياه معدنية طبيعية منزوعة ثاني أكسيد الكربون

تحتوي تلك المياه على ثاني أكسيد كربون أقل من التركيز الموجود في ماء المصدر، وهذا المحتوى من الغاز لا يتحرر عند الظروف المعتادة من الضغط ودرجة الحرارة.

٤- مياه معدنية طبيعية معززة بثاني أكسيد الكربون

تحتوي تلك المياه على ثاني أكسيد كربون أكثر من الموجود بمياه المصدر.

٥- مياه معدنية طبيعية مكربنة صناعيا

وهي مياه معدنية فوارة مضاف إليها ثاني أكسيد كربون من مصدر خارجي.

ثانيا: مياه سطحية أو أرضية معالجة معبأة

هذه النوعية من المياه تأتي من مصادر مياه سطحية أو غير سطحية، ويتم معالجتها لتصبح مطابقة للمواصفات القياسية المصرية للمياه المعبأة، وقد يضاف إليها ثاني أكسيد الكربون أو بعض الإضافات الأُخرى مثل المُحسنات العطرية أو الأملاح المعدنية المفيدة، لا تحتوي على سُكريات، أو مُحلييات، أو مُكسبات الطعم أو أي مواد غذائية. تستمد من المصدر بدون المرور بشبكات المياه العمومية. قد يُستخدم الأكسجين أو الهواء أو الأوزون في المعالجة، وفي حالة استخدام الأوزون يُشترط ألا تزيد النواتج الثانوية عن الحدود القصوى المسموح بها.

ثالثا: مياه الصنبور المعبأة

في حالة تعبئة مياه البلدية التي تخضع للمواصفات القياسية المصرية رقم ١٩٠- ١ /٢٠٠٧[١٠]، فلا بُد أن تُجرى لها معالجة لإزالة بقايا ونواتج المطهر المستخدم وإزالة أي مواد عضوية أو مواد طيارة أو أي مواد قد يكون لها روائح أو مذاق غير مقبول، ويستخدم في ذلك الكربون المنشط.

تعبأ المياه في عبوات من البلاستيك المناسب أو الزجاج.[٣٨،٣٩] وتخزن في مكان بارد بعيدا عن أشعة وحرارة الشمس.

مراجع الفصل الأول

1- U.S. Environmental Protection Agency. "National Primary and Secondary Drinking Water Regulations, Synthetic Organic and Inorganic Chemicals, Monitoring for Unregulated Contaminants, National Primary Drinking Water Regulations Implementation, National Secondary Drinking Water Regulations. " ***Federal Register***, 56, 1991e: 3526-3599.

2- Toppari, J., Larsen, J. C., Christiansen, P., Giwercman, A., Grandjean, P., Guillette, L. J.Jegou. Jr., B., Jensen, T. K., Jouannet, P., Keiding, N., Leffers, H., McLachlan, J. A., Meyer, O., Muller, J., Rajpert-De Meyts, W., Scheike. T., Sharpe, R., Sumpter, J. and Shakkebaek, N. E., "Male reproductive Health and Environmental Xenoestrogens." Environ. Health Perspectives, 104(Suppl. 4), 1996: 741-803.

3- Soto, A. M., Sonnenschein, C., Chung, K. L., Fernandez, M. F., Olea, N., and Olea Serrano, F., "The E.-SCREEN Assay as a Tool to Identify Estrogens: An Update on Estrogenic Environmental Pollutants." Environ. Health Perspectives, 103(Suppl. 7), 1995: 113-122.

4- السيد أحمد الخطيب. الكيمياء البيئية للأراضي، منشأة المعارف بالإسكندرية، ١٩٩٨.

5- James, M. Montgomery Consulting Engineers, Inc., Water Treatment Principles and Design. John Wiley &Sons, New York, 1985.

6- Jamieson, T. S., Schiff, S. L., Taylor, W. D., "Using stable isotopes of dissolved oxygen for the determination of gas exchange in the Grand River, ***Wat. Res.,*** 47(2), 2013, 781-790.

7- AWWA, APHA and WEF. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. AWWA, Washington, D.C. (18^{th}.ed., 1992).

8- American Water Works Association, "Water Quality and Treatment, 5th ed., Denver, CO, New York: McGraw-Hill, 1999.

9- National Academy of Sciences Committee on Nitrite and Alternative Curing Agents in food the Health Effects of Nitrate, Nitrite and N- Nitroso Compounds, Washington, D.C. National Academy Press, 1981.

10- الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، "المواصفات القياسية المصرية لمياه الشرب"، رقم ١٩٠- ٢٠٠٧/١.

11- World Health Organization, "Guidelines for Drinking Water Quality, 4^{rd} ed., Geneva, WHO, 2011.

12- USEPA. Draft Drinking Water Health Criteria Document for Haloacetonitriles, Chloropicrin, and Cyanogen chloride. Washington, D.C. Criteria and Standard Divisions, Office of Drinking Water, 1991a.

13- Ina, K., Jace, T., C. A. Joll, A. Heitz, Urs von Gunten, Jeffrey, W. A. Charrois, "Formation of N-nitrosamines from chlorination and chloramination of molecular weight fractions of natural organic matter." ***Wat. Res.,*** 47(2), 2013, 535-541

14- El-Zanfaly, H. T., Hassan, E. M., El-Seadawy, L. I. and Hassanean, N. A. "Hospital Water Supply as a Potential Source for Opportunistic Pathogens", Proc. Second International Conference for Sustainable Water Supply & Sanitation, 3-5 Dec. 2012 Cairo, Egypt.
15- American Water Works Association Research Foundation& Lyonnaise des Eaux, Identification and Treatment of Taste and Oders in drinking Water, J. Mallevialle and I. H. Suffet (eds), AWWA, Denver, Colo., 1987.
16- Geney, R.S. "Reservoir Management for Water Quality Improvement, "Sem. Proc.: "Water Quality Management in Reservoirs," Proc. AWWA annual Conf., Orlando, Fla., June 1988.
17- Kemira Kemwater, "About water treatment, Agneta Lindquist, ed., Kemira, Kemwater, Helsingborg, Sweden, 2008.
18- Aiken, G. R., McKnight, D.M., and Wershaw, R.L., eds. "Humic Substance in Soil Sediments and Water". Wiley (Interscience), New York, 1985.
19- Christman, R.F. "Aquatic and Terrestrial Humic Material. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science, 1983.
20- Steelink, C. "Humic Substance in Soil, Sediments and Water." (Aiken, G.R., McKnight, D.M. and Wershaw, R.L., eds), pp. 457-476, Wiley (Interscience, New York), 1985.
21- Chapra, S.C., Canale, R.P., and Amy, G.L. "Empirical Model for Disinfection by-products in Lakes and Reservoir." ***Jour. Environ. Engineering,*** ASCE, 123(7)1997, 714-715.
22- Edzwald, J.K., and Van Benschoten." Aluminum Coagulation of Natural Organic Material." In Chemical Water and Wastewater Treatment, Hahn, H.H. and Klute, R., eds. Berlin, Springer-Verlag, 1990.
23- Edzwald, J. K., Tobiason, J. E., "Enhanced coagulation: US requirements and a broader view", ***Water Science and Technology***, 40(9)1999, 63-70.
24- Xiao, F., Zhang, X. R., Zhai, M. T., Lo, I. M. C., "Effect of enhanced coagulation on polar halogenated disinfectant by-products in drinking water Separation and Purification Technology, 76(1),2010, 26-32.
25- Xiao, F., Simcikb, M. F., Gullivera, J. S., "Mechanism for removal of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctonate (PFOA) from drinking water by conventional and enhanced coagulation" ***Wat. Res***., 47(1), 2013, 49-56.
26- Collins, M. "Algal Toxins." Microbial. Rev., 42, 1978:725-746.
27- Committee Report. "The Status of Direct Filtration." Jour. AWWA, 72(7) July 1980:405.
28- Rodriguez, J., Stopić, S., Krause, G., Friedrich, B. (2007)."Feasibility Assessment of Electrocoagulation Towards a New Sustainable Wastewater Treatment." ***Environmental Science and Pollution Research*** 14 (7), pp. 477–482.

29- Lia, C. L., Lin, S. H. "Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performance and sludge settling characteristics." Chemosphere 54(3), January 2004, pp.235-242.
30- LeChevallier, M. W., Norton, W. D. and Lee, R. G. "Evaluation of a method to detect Giardia and Cryptosporidium in water." In Monitoring Water in the 1990`s: Meeting New Challenges, ASTM STP 1102, J. R. Hall and G. D. Glysson, eds. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1991.
31- Nieminski, E. C., and Ongerth, J. E., "Removing Giardia and Cryptosporidium by Conventional Treatment and Direct Filtration." ***Jour. AWWA***, 87, 1995: 96-106.
32- Logsdon, G. S., Dewalle, F. B. and Hendriccks, D. W. "Filtration as a Barrier to Passage of Cysts in Drinking water." I Giardia and Giardiasis, S. L. Erlandsen and E. A. Meyer. eds. New York: Plenum Press. 1984.
33- Codex Standard for Natural Mineral Waters, Codex Standard 108 – 1981.
34- الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، "المواصفة القياسية المصرية لمياه الشرب الطبيعية المعدنية المعبأة"، رقم ٢٠٠٥/١٥٨٨.
35- General Standard for Botteled/ Packaged Drinking Waters (Other than Natural Mineral Waters), Codex Standard 227 – 2001.
36- الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، "المواصفة القياسية المصرية لمياه الشرب الطبيعية غير المعدنية"، رقم ١٥٨٩/ ٢٠٠٧.
37- United States Environmental Protection Agency, "2011 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisory, office of Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC, winter 2011.
38- الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، "المواصفة القياسية المصرية لعبوات المصنعة من البولي اثيلين تير فثالات الخاصة بتعبئة المواد الغذائية"، رقم ٢٠٠٦/٢٨٥٥.
39- الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، "المواصفة القياسية المصرية للعبوات البلاستيك الخاصة بالمواد الغذائية"، رقم ٢٠٠٧/٦٠٥٠.

الفصل الثاني

عملية الترويب

عملية الترويب Coagulation

تُعرف عملية التخثير أو الترويب بأنها العملية التي تقلل من التنافر الكهربي بين الجسيمات، وذلك بإضافة أملاح بسيطة، وبالتالي تتجمع الجسيمات كنتيجة لقوى التجاذب بينها، ويلي عملية التخثير عملية أخرى وهى عملية التجميع، ويقصد بها تجميع الجسيمات المروبة في تجمعات أكبر حجما وأكثر كثافة وقابلة للترسيب.

وقد تُعرف عملية الترويب بأنها العملية التي يحدث فيها معادلة لشحنات الجسيمات، وكنتيجة لهذا التعادل يحدث التحام بين الجسيمات التي تتعادل شحناتها وتصبح في حالة غير مستقرة وتتجمع في جسيمات ذات أحجام أكبر وذات كثافة أعلى ومن ثم تترسب.

وتعتبر عملية الترويب هي؛ المرحلة الأساسية في أنظمة معالجة المياه بهدف إزالة الجسيمات العالقة (العكارة) والمواد العضوية الذائبة القابلة للترسيب بالمروبات، ويعقب مرحلتي التخثير والتجميع مرحلة الترسيب ثم الترشيح.

أهداف عملية الترويب

الهدف الأول: إزالة الملوثات التي تؤثر سلبًا على صحة الإنسان، مثل جسيمات الكائنات المسببة للأمراض أو جسيمات صلبة ذات صلة بالملوثات التي تشكل خطرًا على صحة الإنسان، مثل بعض الفلزات والمركبات العضوية الصناعية.

الهدف الثاني: إزالة المواد الدبالية من خلال تفاعل المواد الدبالية مع المروبات، وهذا يؤدى في النهاية إلى إزالة اللون من المياه. وهذه المواد الدبالية هي مواد عضوية موجودة في كل أنواع المياه السطحية والأرضية وهى تكّون مركبات معقدة مع الفلزات، وقد تتحد مع بعض المركبات العضوية الصناعية.

ينشأ عن المواد الدبالية تكوُّن مواد عضوية مكلورة (تراي هالوميثان) وذلك عندما يضاف الكلور إلى المياه المحتوية على تلك المركبات أثناء عملية التطهير. وقد تسبب المركبات العضوية حالة من الثبات للجسيمات العالقة بالماء مما يعمل على صعوبة ترسيبها ويحدث هذا نتيجة ادمصاص المواد العضوية على أسطح الجسيمات، لذلك فإن إزالة المواد العضوية من خلال عملية الترويب على قدر كبير من الأهمية.

وقد أوصت وكالة حماية البيئة الأمريكية؛ [١] بإزالة المواد العضوية من أنظمة المعالجة التقليدية المعتمدة على الترويب، وذلك من خلال استخدام الترويب المُعزز (Enhanced coagulation) (قاعدة "١" المتعلقة بالتطهير بالكلور والنواتج الثانوية المكلورة).

تعمل عملية الترويب على رفع مستوى أداء أنظمة الترشيح الدقيق باستخدام الأغشية. وتعمل أيضا فى مرحلة قبل مرحلة الكربون الحبيبي المنشط في أنظمة معالجة المياه بالكربون المنشط لإزالة اللون والرائحة والمواد العضوية الذائبة، وتعمل عملية الترويب على إطالة عمر طبقة الكربون المنشط؛ حيث تقوم بإزالة الجسيمات المعلقة بالماء وبالتالي لا تصل إلى حبيبات الكربون.

ولرفع مستوى الترشيح السريع؛ فإن عملية الترويب تستخدم في مرحلة قبلية يراعى فيها الترسيب الجيد، وبالتالي يرتفع مستوى جودة المياه المرشحة، إذن هي مرحلة حاسمة ومهمة لنجاح أنظمة المعالجة. وهذا يحتم على المهتمين بالمحطات أن ينتهجوا التخطيط المستقبلي الذي يراعى التعامل الجيد مع المروب من ناحية النوعية المختارة وآلية الاستخدام والجرعات المناسبة أخذا في الاعتبار نوعية مياه المصدر التي قد تتغير من فصل إلى آخر أو من شهر إلى آخر.

عملية الترويب هي عملية معقدة تتطلب العديد من التفاعلات ومراحل انتقال الصور المختلفة للكتلة، وكما هو متبع في محطات المعالجة فتلك العملية تتم خلال ثلاث خطوات متتابعة، تتمثل في الآتي:-

١- التحلل المائي للمخثر بعد إضافته.
٢- هدم حالة الثبات للجسيمات العالقة.
٣- إحداث تصادمات بين الجسيمات.

تحدث الخطوة الأولى والثانية بعد إضافة المروب في مرحلة الخلط السريع، ثم تبدأ بعد ذلك مرحلة التصادمات بين الجسيمات والتي تسبب تجميع تلك الجسيمات مع بعضها بعضًا (تكوين الندف) أثناء الخلط البطئ في مرحلة التجميع.

فمثلا: استخدام الشَّبَّة الصلبة ($Al_2(SO_4)_3.14H_2O$) أو السائلة ($Al_2(SO_4)_3.51H_2O$) في الترويب يؤدى إلى تكوين صورا كيميائية يطلق عليها نواتج الانحلال المائي لمروب الألومونيوم (Hydrolysis products) والتي تسبب الترويب. وهذه الصور النشطة تتكون أثناء وبعد خلط الشبة بالماء الذي يعالج (في مرحلة الخلط السريع).

وتحدث تفاعلات بين المادة المروبة والمواد الدبالية والجسيمات الصلبة بصورة سريعة في مرحلة الخلط السريع، ويعمل التصاق الجسيمات مع بعضها على تجميعها ويتأتى هذا من خلال حركة المياه في مرحلة الخلط البطيء.

انه من الضروري جدا أن تجرى عملية الترويب على وجه أمثل؛ حيث أنها تمثل محور المعالجة فى أنظمة الترشيح السريع. فبعد عملية الخلط السريع مع المخثر، تبدأ عملية التخثير يليها تجمع الجسيمات معًا في تجمعات "ندف"، ثم يأتي بعد ذلك الترسيب وتنتهي المعالجة بالترشيح. كل هذا يتم في تسلسل متتابع ومتلاحق.

واصطلاح عملية الترويب يعنى كل التفاعلات والآليات التي تؤدى إلى تجميع الجسيمات، بما في ذلك خطوة تحضير محلول المروب، وعملية هدم حالة الثبات للجسيمات العالقة بالماء وآليات التفاعل بين الجسيمات. أما العملية الفيزيائية التي يحدث فيها التحام الجسيمات الصغيرة مع بعضها بعضًا لتكوين تجمعات كبيرة فيصطلح عليها التجميع " التنديف"، وفى بعض المراجع يكون هناك تفريق بين المخثر أو المروب Coagulant والمجمع Flocculent.

فالمروب هو المادة الكيميائية المستخدمة لإزالة العكارة أو إزالة حالة الثبات للجسيمات العالقة بالماء، وتضاف بصورة نموذجية في مرحلة الخلط السريع. أما المجمع فهو مادة كيميائية أخرى تضاف بعد إضافة المروب والغرض منه التعزيز من عملية التجميع أو التنديف وإعطاء قوة للندف، وفى بعض الأحيان يطلق عليه "مساعد المروب" وتستعمل هذه المجمعات لرفع مستوى الأداء الترشيحى وبالتالي يطلق عليه أيضا "مساعد المرشح"، كما أنه يساعد على زيادة كفاءة عملية انتزاع الماء من الحمأة. وفي المعالجة التقليدية لمياه الشرب ليس هناك حاجة لاستخدام مساعد للمروب ما دام يقوم المروب بدوره في تجميع العوالق وجعلها قابلة للترسيب والانفصال عن السائل.

طبيعة الجسيمات المعدنية العالقة بالمياه السطحية

يطلق على الجسيمات الأقل من ١ ميكروميتر بالغرويات، أما الجسيمات الأكبر من ذلك فيطلق عليها معلقة، وهناك تعريف يعتمد على طرق الفصل، فالشوائب التي يمكن حجزها بالترشيح الغشائي ذي المسام ٠,٤٥ ميكروميتر هي شوائب معلقة أو غروية ،أما الذي ينفذ من هذه المسام ويترشح فهو ذائب.

لا تتأثر الجسيمات الغروية بالجاذبية ولكنها تتأثر بالحركة الانتشارية الناشئة داخل السائل Brownian motion (الحركة البراونية، وهي حركة عشوائية تنشأ من التصادم المستمر بين تلك الجسيمات و جزيئات الماء المحيط بها)، وبالمقارنة بالجسيمات المعلقة فإن الجسيمات الغروية لها مساحة سطح خارجي أكبر لكل وحدة كتلة.

يعتمد الوقت اللازم للترسيب الطبيعي لأي جسيم على كثافته وحجمه، وعندما يضاف مروب إلى المياه فإن كثافة الجسيمات المتجمعة والملتحمة معًا تعتمد على نوع المروب المستخدم، ومن المعروف أن الكثافة تقل مع زيادة حجم الجسيم، وهى عادة تتراوح ما بين ١,٠٢ – ١,١ ٠ جرام/سم٣.

وقد وضعت حسابات تقديرية استرشادية لمعرفة الوقت المطلوب لترسيب الجسيمات ذات الكثافات المختلفة والأقطار المختلفة فى مياه ساكنة لمسافة رأسية قدرها واحد متر(جدول ٢/١)[٢].

جدول (٢/١) تأثير قطر الجسيمات والمساحة الكلية لها والكثافة على الوقت اللازم للترسيب الطبيعي لمسافة رأسية قدرها ١ متر في مياه ساكنة عند درجة حرارة ٢٥°م

المقاس	قطر الجسيم	وقت الترسيب*			المساحة الكلية** (م٢/سم٣)
		كثافة الجسيم ١,٠٥ (جم/سم٣)	كثافة الجسيم ١,١٠ (جم/سم٣)	كثافة الجسيم ٢,٦٥ (جم/سم٣)	
رمل خشن	١ مم	٣٧ ثانية	١٨ ثانية	١ ثانية	٠,٠٠٦
رمل ناعم	٠,١ مم	١ ساعة	٣١ دقيقة	دقيقتين	٠,٠٦
غرين	١٠ ميكروميتر	٤ أيام	يومين	ثلاث ساعات	٠,٦
غرويات خشنة	١ ميكروميتر	سنة	٠,٦ سنة	١٣ يوم	٦
غرويات ناعمة	٠,١ ميكروميتر	١١٧ سنة	٥٨ سنة	٣,٥ سنة	٦٠

* ترسيب الجسيمات يخضع لقانون "ستوك" و كثافات الجسيمات هي: ١،٠٥، ١،١٠، ٢،٦٥، على التوالي.

** المساحة الكلية لسطح جسيم حجمه ١ سم٣.

يوضح الجدول (٢/١) أن الجسيمات ذات الحجم ١مم تترسب بسرعة بينما الغرويات لا يمكن ترسيبها إلا بالطرد المركزي أو بواسطة ترويبها وتجميعها من خلال إضافة مروب إلى المياه حتى يسهل ترسيبها. حينما تتناقص درجة الحرارة فإن الوقت اللازم للترسيب يزيد نتيجة زيادة لزوجة المياه، فنجد أن انخفاض درجة حرارة المياه إلى ٥°م يؤدى إلى زيادة الوقت اللازم للترسيب بنسبة ٥٠% عن الأوقات المذكورة في الجدول (٢/١). وكلما صغر الجسيم كلما كانت المساحة النسبية

للسطح أكبر. وتلعب القوى التي تنشأ بين أسطح الجسيمات دورًا حاسمًا في قدرتها على التجمع والترويب.

تستطيع العين البشرية المجردة الصحيحة أن ترى جسيمًا ذا قطر ٤٠ ميكروميتر[٢]، والجسيمات التي لها هذا القطر تسلك سلوك العكارة، مثل: الجسيمات المعدنية المعلقة كالغرين والطفلة وألياف الاسبستوس وبعض حويصلات الطفيليات وبعض الطحالب وبعض المواد العضوية.

ثباتية الجسيمات المعلقة (نشأة العكارة)

تنشأ عكارة المياه من تواجد الغرويات: وهى جسيمات صغيرة الحجم، بعضها يكون ثابت والبعض الآخر غير ثابت أي قابل للتجميع والفصل من السائل. ومن أمثلة النوع الثابت: جزيئات الصابون والمنظفات الصناعية والبروتين والنشويات والبلمرات الكبيرة وبعض المواد الدبالية.

أما الغرويات غير الثابتة؛ فهي تتروب ومن أمثلتها جسيمات الغرين وأكاسيد الفلزات والكائنات الدقيقة ويمكن القول أنها الجسيمات الصلبة المتواجدة في المياه الطبيعية وهى غير ثابتة من ناحية الحركة الحرارية.

بعض الغرويات غير ثابتة حركيًّا فتتروب بسرعة أما الغرويات الثابتة حركيا فهي تتروب ببطيء شديد جدا. وما يحدث في عملية معالجة المياه هو أن عملية الترويب تعمل على زيادة معدل الحركة للجسيمات، مما يعمل على تجميعها مع بعضها، أي يتحول المعلق الثابت إلى معلق غير ثابت والجسيمات المعلقة التي يمكن أن تأخذ شهورًا أو سنين لكي تترسب، فإنها تتجمع وتترسب في أقل من ساعة.

أن تصميم وتشغيل عملية الترويب يتطلب التحكم في آلية الحركة لعملية تجميع الجسيمات المعلقة فى الماء . وتعتبر عملية الترويب هي عملية كيميائية وفيزيائية في نفس الوقت.

ينشأ من تقارب الجسيمات من بعضها قوى تعمل على تباعدها، وهناك قوى أخرى تعمل على سحب الجسيمات وتقاربها. وقوى التنافر تتولد من التفاعل بين الطبقات الكهربية المزدوجة لأسطح الجسيمات (تسبب ثبات كهروستاتيكي).[٣]

وهناك قوى تجاذب مهمَّة يطلق عليها قوى "لندن فاندرفال" وهذه القوى تنشأ من الاستقطاب الكهربي والمغناطيسي الذي يخلق مجالا كهرومغناطيسيا متذبذبا بين الجسيمات والفراغ المحيط بها.

هذان النوعان من قوى التجاذب وقوى التنافر يشكلان الأساس لنظرية ثباتية الغروي "لدرجاجون ولاندو وفيروى واوفربيك". وهناك قوى أخرى مرتبطة بارتباط الأيونات مع جزيئات الماء على السطح (قوى تنافر). ومع اقتراب جسيم من آخر بسبب التصادم فإن السائل الذي بينهما يتحرك بعيدا وتتكون قوى تنافر يطلق عليها قوى التنافر الهيدروديناميكى.

تعمل المواد العضوية الطبيعية (المواد الدبالية) التي تدمص على الجسيمات الغروية على زيادة حالة الثبات لتلك الجسيمات أي عدم القابلية للترسيب وبالتالي تسبب عكارة المياه الطبيعية.

نشأة حالة الثبات للغرويات

ترجع حالة الثبات للغرويات بالمياه (الثبات الكهروستاتيكي الذي أحدثته الشحنات الكهربية السطحية الساكنة) الى الأسباب التالية:-

أولا: تفاعل الجسيمات الصلبة الموجودة في المياه مع جزيئات المياه

إن أغلب الجسيمات الغروية الموجودة بالمياه تكون سالبة الشحنة، لذلك فهي تتنافر وتصل إلى وضع الثبات أو التعليق في المياه، وترجع هذه الشحنة السالبة إلى تفاعل الجسيمات الصلبة الموجودة في المياه مع جزيئات المياه من خلال مجموعات كيميائية على أسطحها، ويعتبر الرقم الهيدروجيني للماء عاملا مهمًّا في نوع شحنة الجسيمات العالقة، والبروتينات تحتوي على مجموعات وظيفية تتغير شحنتها تبعًا للرقم الهيدروجيني للماء. وحيث أن الفيروسات والعديد من البكتريا لها أسطح بروتينية فهي تكتسب شحنة اعتمادا على الرقم الهيدروجيني للوسط.

تتميز جسيمات السليكا بوجود مجموعة على سطح الجزيء على هيئة سيلانول ذات الرمز SiOH ≡ ، ويتأين السطح من خلال التفاعلات الآتية[٤].

$$\equiv SiOH + H^+ \leftrightarrow \equiv SiOH_2^+ \qquad (٢/١)$$

تعبر قيمة (pka) عن قيمة الرقم الهيدروجيني التي عندها يكون كلا المكونين موجودين بكميات متساوية، وتعتمد القيمة الفعالة لهذا الثابت على نوعية المجموعات المتاخمة للمجموعات الوظيفية.

وهناك مجموعات سطحية للبروتين تحمل شحنة موجبة عندما يكون الرقم الهيدروجيني حامضيا أو متعادلا، وعندما يكون الرقم الهيدروجيني قاعديا تكون ذات شحنة صفر وهذه المجموعات هي:-

مجموعة أمينو (-amino) $pk_a \approx 10.5$, $+ H^+ \leftrightarrow -NH_2$ $-NH_3^+$

مجموعة إميدازول (-imidazole) $pk_a \approx 6$

مجموعة جوانيدين (-guanidine) $pk_a \approx 12.5$ $(NH_2)_2C=NH$

وهناك مجموعات سطحية للبروتين تحمل شحنة سالبة عند المستويات العالية من الرقم الهيدروجيني مثل:-

مجموعة الكربوكسيل (carboxyle) $-COOH \leftrightarrow -COO^- + H^+$ $pka \approx 4$

مجموعة سلفهيدرايل (sulfhydryl) $-SH \leftrightarrow -S^- + H^+$ $pka \approx 8.3$

مجموعة الفينول هيدروكسيد (phenolic hydroxyl) $-OH \leftrightarrow -O^- + H^+$ $pka \approx 10$

ومع زيادة الرقم الهيدروجيني؛ فإن عدد الشحنات السالبة تزيد وعدد الشحنات الموجبة تقل ومع تناقص الرقم الهيدروجيني؛ فإن الشحنات الموجبة تزيد على السطح وعدد الشحنات السالبة تقل، وعند تساوى الشحنات الموجبة مع السالبة على سطح البروتين يطلق على قيمة الرقم الهيدروجيني عند تلك اللحظة أو الحالة بنقطة التساوي الكهربي، وتبعا لنوع البروتين فهناك عديد من البروتينات تتروب تلقائيا عند تساوى الجهد الكهربي.

كلما ارتفع الرقم الهيدروجيني للمياه ارتفع معه تركيز الشحنات السالبة للبروتين، وكلما احتاج ذلك إلى مزيد من الشحنات الموجبة لإحداث التعادل والترويب والترسيب للجسيمات البروتينية، أي أن يصبح هناك احتياج لجرعة أكثر من المروب.

"ويمكن أن نوجز القول في أن البروتين يحتوى على خليط من مجموعات الكربوكسيل والأمينو، وعادة ما تكون جسيمات البروتين سالبة الشحنة عند رقم هيدروجيني > ٤ أما السليكا فتأخذ شحنات سطحية سالبة في المياه عندما يكون الرقم الهيدروجيني > ٢.

ثانيا:- التفاعل بين المجموعات السطحية للجسيمات مع المواد الذائبة في الماء

فمثلا: في حالة السليكا يحدث انحلال مائي لمجموعة الهيدروكسيل ويحدث تفاعل مع أيون الكالسيوم الموجود بالماء على النحو الآتي:-

$$\equiv SiOH + Ca^{2+} \leftrightarrow \equiv SiOCa^{+} + H^{+} \qquad (٢/٢)$$

أدى ذلك التفاعل إلى تكون شحنة موجبة على سطح جسيم السليكا، بينما إذا حدث تفاعل مع أيون فوسفات فتتولد شحنة سالبة على سطح السليكا طبقا للعادلة الآتية:-

$$\equiv SiOH + HPO_4^{2-} \leftrightarrow \equiv SiOPO_3O^{-} + OH \qquad (٢/٣)$$

من هنا نجد أن مجموعات الهيدروكسيد الموجودة على الحواف البلورية يمكن أن تكون مصدرا لشحنات سالبة في غرويات معادن الطين (لكونها معادن سليكاتية)، وخاصة في الوسط القاعدي حيث ينحل أيون الهيدروجين (H^{+}) من مجموعة الهيدروكسيد وبالتالي تصبح الجسيمات الطينية محملة بشحنات سالبة مصدرها الأكسجين لمجموعة الهيدروكسيد، أما في الوسط الحامضي فنجد أن مجموعة الهيدروكسيد تتفاعل كقواعد عن طريق اكتساب بروتونات وبالتالي تكتسب شحنات موجبة، أي أن نوع الشحنة يتوقف على درجة حموضة أو قاعدية الوسط. لذلك يطلق على مثل هذه الشحنات اسم الشحنات المرتبطة بالرقم الهيدروجيني للوسط. يتضح ذلك من التفاعلات الآتية:-

وسط قاعدي $Si\text{-}OH + OH^{-} \leftrightarrow Si - O^{-} + H_2$ (٢/٤)

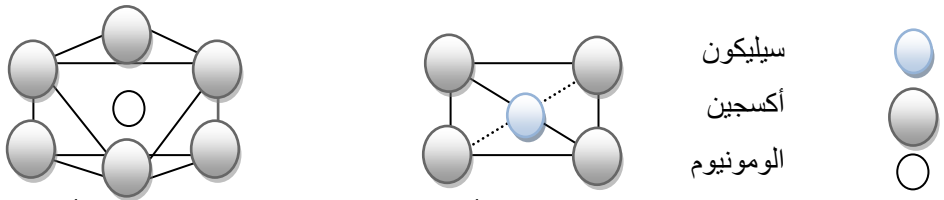
وسط حامض $Si - OH + H^{+} \leftrightarrow Si - OH_2$ (٢/٥)

تعتبر أيونات الهيدروجين والهيدروكسيد المسببة لتولد الشحنات على الأسطح؛ هي أيضا المسئولة عن الجهد الكهربي للأسطح، لذلك يطلق عليها بالأيونات المحددة للجهد الكهربي، وتصبح قيمة الشحنة السطحية صفرًا عند تساوى كثافة الشحنات السطحية الموجبة مع كثافة الشحنات السطحية السالبة. كما يطلق على الرقم الهيدروجيني الذي يحدث عنده تساوى الشحنات السالبة مع الموجبة أسم نقطة التساوي الكهربي أو نقطة الشحنة الصفرية، وتعتبر الروابط المتكسرة على أحرف المعادن هي المصدر الأساسي للسعة التبادلية الكاتيونية لمعادن الطين مثل: الكاولين.[٥]

ثالثا: عدم اكتمال التركيب الداخلي للجسيم

قد تنشأ شحنات سطحية على سطح الجسيمات نتيجة عدم اكتمال التركيب الداخلي لمادة الجسيم، وهذا يسبب ما يطلق عليه الإحلال المتماثل الشكل. والإحلال المتماثل هو إحلال أيون محل آخر في البلورة بمعنى أن يحدث تغيير جوهري في البلورة ويجب أن يكون الايون الذي يقوم بالإحلال مساويا أو مقاربا لحجم الأيون الأصلي، ويتوقف ذلك على الظروف التي يحدث تحتها التبلور مثل درجة الحرارة والضغط وفي جميع الأحوال لا بُد من المحافظة على التوازن الكهربي للبلورة. وهذا هو السبب الأساسي لتواجد شحنات على العديد من معادن الطين، ويمكن توضيح ذلك فى السياق التالي:-

تتواجد معادن الطين في المحتوى الطيني للتربة وهي تتركب من سيليكات الألومونيوم والحديد والماغنسيوم والعديد من العناصر الأخرى بنسب قليلة. تتميز معادن الطين بأنها ذات تركيب ورقي أو صفائحي من وحدات رباعية الأوجه من السليكا (SiO_2)، ووحدات ثمانية الأوجه من الالومينا (Al_2O_3) مرتبة في عدة تشكيلات رقائقية، وهى مرتبطة ببعضها البعض من خلال روابط متقاطعة. ويختلف التشكيل أو الترتيب باختلاف نوع الكاتيونات الداخلة في تركيبها؛ حيث أن حجم الكاتيون هو الذي يحدد عدد ايونات الأكسجين أو الهيدروكسيد المحيطة به.



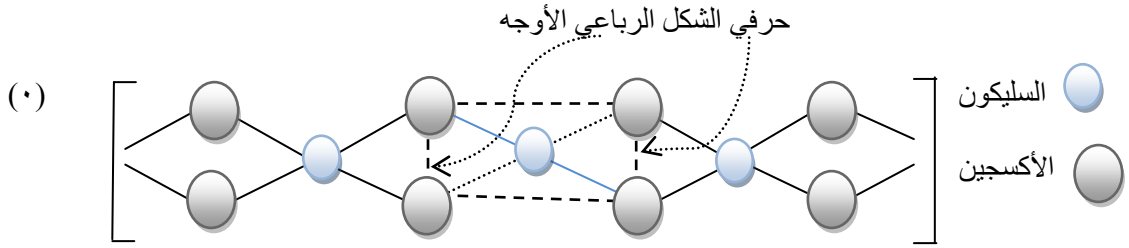
شكل (٢/١) وحدة رباعية الأوجه من السليكا (SiO_2)ووحدة ثمانية الأوجه من الألومينا (AlO_2)

ولكي ينتج ترتيب بلوري ثابت للأيونات يجب أن تكون الأيونات مرتبة ترتيبًا منتظمًا ومتجاورًا. فالأيونات كبيرة الحجم تأخذ مواقعها بحيث تحيط بالأيونات الموجبة صغيرة الحجم إحاطة جيدة، وهذا يعني أن الأيونات الموجبة تختلف في اختيار الشكل الهندسي الذي تفضل الارتباط به بالأيونات السالبة، وبالتالي في العدد الذي ترتبط به من تلك الايونات، ولا يتوقف عدد إحاطة الايون الموجب على شحنته وإنما أساسًا على نصف قطره، الذي يمكنه من اتخاذ الشكل الذي يعطيه أكبر قدر من الثبات والاستقرار.[٥]

ويعتبر عدد الإحاطة أو التناسق دالة لنسبة نصفيّ قطر الكاتيون والأنيون، ويُعرف بأنه عدد الأنيونات المحيطة بالكاتيون في المعدن. وحيث أنه في أي تركيب بلوري ثابت يكون مجموع الروابط التي تصل كل أنيون من الكاتيونات المجاورة له تساوي شحنة هذا الأنيون.

وبناءً على ما تقدم؛ فكاتيون السليكون يكون محاطا بأربعة أيونات أكسجين مكونا شكلا بلوريا رباعي الأوجه، وكاتيون الألومونيوم يكون محاطا بأربعة أيونات أكسجين، كما أن الألومونيوم يمكن أن يحاط بستة أيونات أكسجين، وهذا يتوقف على درجة الحرارة أثناء التبلور للمعدن، فارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى خفض عدد التناسق، وتتوزع الأنيونات حول الكاتيون في شكل رباعي الأوجه.

تتشابك أحرف السليكا رباعية الأوجه ذات الوحدات التركيبية التكرارية $[SiO_2]_n$ على النحو الآتي:-

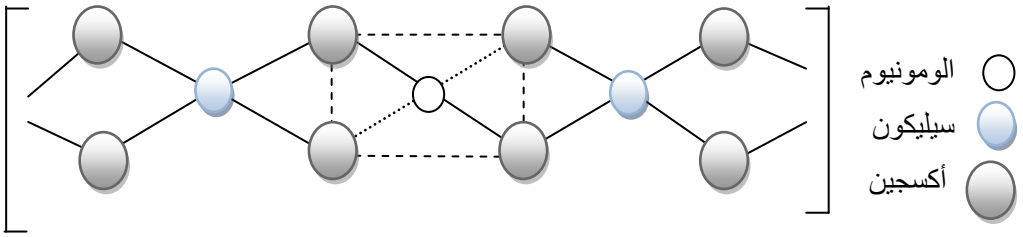


شكل (٢/٢) التركيب البنائي للسليكا: لا توجد شحنه إجمالية[٤]

وطبقا لقواعد الإحلال المتماثل؛ نجد أن نصف قطر الكاتيون هو الذي يحدد نوع الكاتيون الذي يحدث له إحلال في إما الطبقة الرباعية الأوجه أو الثمانية الأوجه. ففي طبقة رباعيات الأوجه يمكن أن يحل أيون الألومونيوم محل السليكون، أما في طبقة ثمانيات الأوجه فيمكن لأيونات الحديدوز، والحديديك، والماغنسيوم، والنيكل، والزنك، والنحاس أن تحل محل الألومونيوم. بمعنى أن أي كاتيون له عدد إحاطة يساوي أربعة يمكن أن يحل محل أيون السيلكون في طبقة الرباعيات. وأي كاتيون له عدد إحاطة "ستة" يمكن أن يحل محل أيون الألومونيوم في طبقة الثمانيات. وكنتيجة لهذا الإحلال المتماثل الشكل تنشأ الشحنة السالبة على معادن الطين.

إذا حدث إحلال لذرة ألومونيوم محل السليكون رباعي الأوجه أثناء التكوين البلوري فينشأ تركيب بنائي يحمل شحنة سالبة كما يلي:-

(١-)



شكل (٢/٣) التركيب البنائي للسليكا: الشحنة الإجمالية -١[٤]

وبنفس هذه الطريقة فإن الكاتيونات ثنائية الشحنة مثل الكالسيوم (Ca^{++}) الماغنسيوم (Mg^{++}) والحديدوز (Fe^{++}) يمكن أن تحل محل ذرة الألومونيوم (في شبكة أكسيد الألومونيوم ثمانية الأوجه) وتنتج أيضا شحنة سالبة. لا يعتمد كم ونوع الشحنة الناتجة من هذا الإحلال (متشابه الشكل) داخل النسيج البلوري على خصائص الحالة المائية بعد أن تكون البلورة قد تكونت.

الطبقة الكهربية المزدوجة

تنجذب الكاتيونات إلى أسطح الجسيمات الغروية في الماء نتيجة الشحنات السالبة المتواجدة على تلك الأسطح، وتتميز هذه الكاتيونات بالتوزيع غير المتجانس في الوسط المحيط بالجسيمات الغروية فنجد أن بعضًا منها يكون على السطح أو قريب منه والبعض الآخر يكون حرًّا طليقا وقادرًا على التبادل مع الكاتيونات الأقرب.

تتعادل الشحنات السالبة المتواجدة على أسطح الجسيمات الغروية بأيونات موجبة. وهذا التركيب المتمثل فى الشحنات السالبة الموزعة على سطح الجسيم الغروي والشحنات الموجبة المقابلة لها تشكل طبقة كهربية مزدوجة تتكون من طبقتين: الأولى سالبة الشحنة على سطح الجسيم والأخرى الموجبة المتواجدة في السائل الملاصق للجسيم، وهذه الايونات الموجبة يمكن أن تنجذب لسطح الجسم الغروي، وفى نفس الوقت يمكن أن تتوزع في السائل والنتيجة النهائية تكون طبقة منتشرة.[٦]

نظرية الطبقة المزدوجة لجوى- شابمان Gouy-Chapman Double-Layer

وضع العالم جوى والعالم شابمان نظرية الطبقة الكهربية المزدوجة[٦، ٧] وفى هذه النظرية نرى أن الشحنات الكهربية السالبة تتوزع توزيعا متساويًا على أسطح الحبيبات الغروية في الماء بينما يكون تركيز الكاتيونات (الشحنات الموجبة) حول أسطح الحبيبات الغروية مرتفعا ثم ينخفض كلما بعُدنا عن

السطح نتيجة ميل الشحنات إلى الانتشار بعيدًا نتيجة الفرق فى التركيز، ولذلك يطلق على هذه النظرية أسم الطبقة المزدوجة المنتشرة ويمكن حساب تركيز الأيونات في المنطقة الكهربائية المزدوجة باستخدام معادلة بولتزمان:-

$$C_x = C°_x \exp(- Z_e \psi/kT) \qquad (٢/٦)$$

حيث C_x تركيز الكاتيونات عند مسافة x من السطح — k ثابت بولتزمان

Ψ (بساي) الجهد الكهربى — Z التكافؤ.

$C°_x$ تركيز الكاتيونات في المحلول. — e شحنة الإلكترون

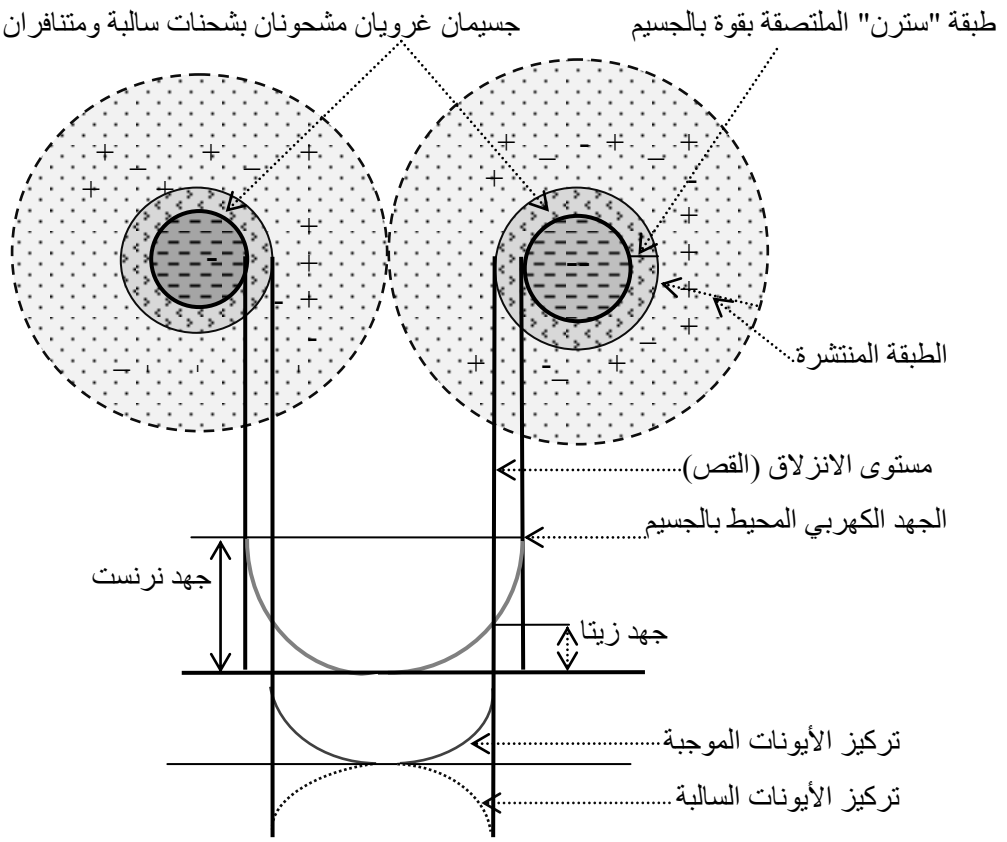
T درجة الحرارة المطلقة

ومع وجود الشحنة الكهربية السالبة فإن الكاتيونات توزع نفسها في الطور السائل الملاصق لسطح الغروي، وتعمل قوى فاندرفال (قوى تجاذب) على منع الكاتيونات من الانتشار بعيدا عن السطح، وذلك لكي يتحقق التعادل الكهربي والتوازن بين الشحنات. وهنا نجد أن الجهد الكهربي يصل إلى أقصاه عند سطح الجسيم الغروي ويتناقص أسيًّا بعيدا عن السطح (شكل ٤) . ويمكن التعبير عن ذلك كما يلي:-

$$\Psi_x = \psi_o \exp(- K)_x \qquad (٢/٧)$$

حيث: Ψ_x : الجهد الكهربي عند مسافة x — ψ_o : الجهد السطحي

K : ثابت يعتمد على التركيز وتكافؤ الأيونات وثابت ثنائي الكهربية ودرجة الحرارة



شكل (٤ /٢) جسيمان مشحونان بشحنات سالبة تحيط بكل منهما طبقة مزدوجة الكهربية يتضح تدرج الجهد المحيط بالجسيم (جهد نرنست وجهد زيتا).

وعند درجة حرارة الغرفة نجد أن:-

$$K = 3 \times 10^{7}\ Z^{\pm}\ \sqrt{C} \qquad (٢/٨)$$

حيث : Z : تكافؤ الأيون C : التركيز في المحلول معبرا عنه بالمول/ لتر

وعادة ما تُستخدم قيمة (١/k) كمقياس لسمك الطبقة المزدوجة. وكما هو واضح من العلامة السابقة فإن سُمك الطبقة المزدوجة يتوقف على كلا من C , Z، فمع زيادة التركيز أربعة أضعاف يؤدى إلى زيادة K بمقدار الضعف وهذا يعنى أن سمك الطبقة المزدوجة (١/k) يقل بمقدار النصف، كما يؤثر تكافؤ الأيون z نفس التأثير السابق على سمك الطبقة المزدوجة .

هناك اعتراضات على نظرية جوى – شابمان نتيجة الافتراضات الآتية:-

أ- سطح الغروي مستوى وممتد إلى ما لانهاية، بمعنى أنه لا تأثير يذكر للأركان.

ب- الشحنات السالبة تتوزع توزيعا منتظما على الأسطح.

ج- الأيونات المصاحبة والمضادة هي عبارة عن نقط شحنات وبالتالي فهي لا تشغل أي حيز، ولذلك يصل تركيزها إلى أقصى ما يمكن عند سطح التلامس بين الطور السائل والطور الصلب.

ونتيجة لهذه الافتراضات وضعت **نظرية الطبقة المزدوجة (نظرية سترن)**.

وضع العالم سترن بعض التعديلات على نظرية الطبقة المزدوجة؛ حيث أخذ في الاعتبار حجم الأيونات المضادة وتشير هذه النظرية إلى أن أقصر مسافة بين سطح الجسيم يمكن أن يتواجد عندها الأيون سوف تتحدد بنصف قطر هذا الأيون، وتأثير حجم الأيون سوف يكون أكبر ما يمكن بالقرب من سطح الجسيم الغروي.

ومن خلال دراسة هذه النظرية نجد أن:-

١- الطبقة الأولى هي نفس الطبقة الموجودة في نظرية جوى – شابمان

٢- الطبقة الثانية قسمت إلى طبقتين

أ- طبقة قريبة من سطح الغروي ويكون تركيز الكاتيونات فيها أقصى ما يمكن وتسمى طبقة "سترن"

ب- طبقة الانتشار.

٣- يتناقص الجهد في طبقة سترن كلما بعدنا عن سطح الجسيم الغروي كما في نظرية هيلمهولتز، أما في طبقة الانتشار فإن تناقص الجهد مع المسافة يتبع نظرية جوى – شابمان.

تأثير تكافؤ الكاتيونات على سُمك طبقة الانتشار المزدوجة

يتأثر سُمك طبقة الانتشار المزدوجة بتكافؤ الكاتيونات فنجد أن الكاتيونات الأحادية فى مواقع التبادل تكون طبقة انتشار مزدوجة أكبر سُمكا من تلك المتكونة من الكاتيونات الثنائية وذلك عند ثبات التركيز (جدول ٢/٢) وتحدث هذه الظاهرة نتيجة ميل الأيونات إلى الانتشار بعيدا عن سطح الغروي بدرجة متناقصة طبقا لهذا الترتيب:

أيونات أحادية التكافؤ > أيونات ثنائية التكافؤ > أيونات ثلاثية التكافؤ

هذا يعنى أن أيونات الصوديوم والبوتاسيوم تكون طبقات انتشار مزدوجة أكبر سُمكا من تلك المتكونة من أيونات الكالسيوم والماغنسيوم بينما تكون أيونات الطبقة المتكونة من أيونات الألومونيوم هي الأقل سمكا.

تأثير تركيز محلول الألكتروليت على سمك طبقة الانتشار المزدوجة

يتوقف سمك طبقة الانتشار المزدوجة على تركيز المحلول الاليكتروليتى (تركيز الأملاح الذائبة) (جدول٢/٢)، فنلاحظ أن سُمك الطبقة يقل مع زيادة تركيز الألكتروليت، وذلك لأن زيادة تركيز المحلول يؤدى إلى زيادة كمية الكاتيونات التي تعمل بدورها على تخفيض فرق التركيز بين سطح الغروي والطور السائل المحيط به وتبعا لذلك يقل ميل الكاتيونات إلى الانتشار بعيدا عن سطح الغروي مما يؤدى إلى تقليل سمك الطبقة المزدوجة.

جدول (٢/٢) تأثير تركيز وتكافؤ الأيونات على سُمك الطبقة المزدوجة[٥]

تركيز الألكتروليت (مول/ لتر)	سمك طبقة الانتشار المزدوجة (1/ k) سم	
	ايونات أحادية	ايونات ثنائية
١×١٠^{-٥}	١×١٠^{-٥}	$٠,٥\times١٠^{-٥}$
١×١٠^{-٣}	١×١٠^{-٦}	$٠,٥\times١٠^{-٦}$
١×١٠^{-١}	١×١٠^{-٧}	$٠,٥\times١٠^{-٧}$

جهد زيتا Zeta Potential (Z)

عند وضع معلق غروي في مجال كهربي؛ فإن الجسيمات الغروية تنجذب ناحية القطب الموجب بينما الأيونات المخالفة في الشحنة تنجذب إلى القطب السالب وينتج عن ذلك جهد كهربائي عند سطح التداخل بين الطور السائل والطور الصلب يطلق عليه أسم جهد زيتا أو الجهد الحركي الكهربائي (الكهروحركى).

ويقع جهد زيتا عند مستوى الانزلاق المتواجد بين الطول السائل وغلاف الماء المحيط بالجسيم الغروي. ولما كان موقع مستوى الانزلاق غير معروف تحديدًا فإن جهد زيتا يمثل الجهد الكهربي عند مسافة غير معلومة من سطح الجسيم الغروي.[٣] (شكل ٢/٤)

هذا الجهد لا يساوى جهد السطح؛ إنما هو في الواقع أقل من الجهد الكهربي للجسيم الغروي وربما يتساوى مع جهد سترن.

تأثير تركيز محلول الألكتروليت على جهد زيتا

تؤدى زيادة تركيز محلول الألكتروليت الى نقص سُمك الطبقة المزدوجة، وبالتالي تتأثر قيمة جهد زيتا. وأيضا يقل سُمك الطبقة المزدوجة بزيادة تكافؤ الأيونات بالمحلول. ولذلك فمن المتوقع أن يقل جهد زيتا بزيادة تركيز الألكتروليت ويصبح قيمة جهد زيتا صفر عند نقطة التعادل الكهربي حيث يصبح سمك الطبقة المزدوجة قليل جدا، وبالتالي تقل قوى التنافر إلى أقل قيمة لها، ويترتب على ذلك أنه عند نقطة التعادل أو أقل منها تصبح قوى التنافر ضعيفة للغاية مما يؤثر بدرجة كبيرة على ترويب وتجميع جسيمات الغروي. أي أن تلاشى جهد زيتا يؤدى إلى ترويب الجسيمات الغروية.

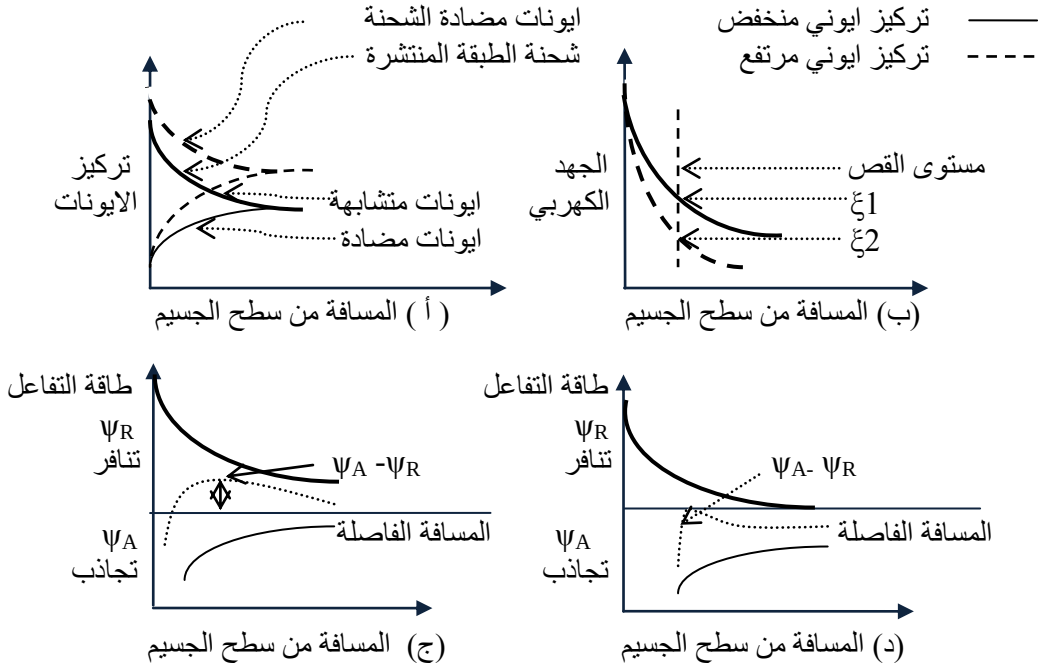
يعتمد جهد زيتا على الجهد السطحي (ψ) للجسيم الغروي، ويمكن حسابه من المعادلة الآتية:-

$$V_e = D\xi E/4\pi\zeta \qquad (٢/٩)$$

حيث: V_e : السرعة الكهروستاتيكية D : ثابت ثنائي الكهربية

E : القوة الدافعة الكهربية المعطاة للنظام ξ (زاي) : لزوجة السائل ζ (زيتا) : جهد زيتا

أي أن جهد زيتا يمكن اعتباره الجهد الكهروحركي عند مستوى القص، وفى الشكل (٢/٥ب)٠ نجد أن الجهد السطحي ψ_0 في التركيزات المنخفضة يصبح قيمة الجهد الكهروحركى هو ξ1 ومع إضافة ملح إلى المحلول يقل سمك الطبقة المزدوجة ويندفع مزيد من الأيونات المضادة إلى السطح الغروي في مستوى القص، علمًا بأن مستوى القص يقع على مسافة ثابتة من سطح الجسيم الغروي ولذلك فالنتيجة النهائية هو توزيع الجهد ممثلا بالمنحنى الأسفل بالشكل السابق وتصبح قيمة الجهد الكهروحركى للمحلول المركز 2 ξ أي أصغر من قيمة ξ1 أي أن قيمة جهد زيتا تقل بزيادة تركيز المحلول.



شكل (٢/٥) تمثيل بياني[٧] أ ـ الطبقة المنتشرة ب- جهد الطبقة المنتشرة
جـ ، د التفاعل بين طاقتي جسيمين في نظام غروي ثابت كهروستاتيكي.

تأثير الطبقة المزدوجة على ثبات الغرين

كما ذكرنا من قبل فإن جسيمات الغروي تحمل شحنات سالبة ويتم تعادل هذه الشحنات بواسطة الكاتيونات. في حالة المحلول المعلق فإن الكاتيونات تميل إلى الانتشار بعيدًا عن سطح جسيمات الغروي، فتتجه نحو السائل، وذلك لكي تعادل فرق التركيز بين الأيونات في المحلول والأيونات على سطح الانفصال، ومع ذلك فلا تستطيع هذه الكاتيونات أن تنتشر مسافة كبيرة بعيدا عن سطح الغروي، وذلك نتيجة قوى التجاذب الكبيرة بين هذه الكاتيونات والشحنات السالبة على أسطح الجسيمات الغروية، ونتيجة لذلك تتجمع الكاتيونات على سطح الانفصال بين الغروي والسائل وتكون طبقة كهربية مزدوجة يتراوح سمكها بين ٥٠ – ٣٠٠ انجستروم، لذلك عند اقتراب جسيمات الغرين من بعضها يحدث تنافر بين هذه الجسيمات وذلك لحدوث تنافر بين الطبقات الخارجية المحيطة بالجسيمات والتي تحمل نفس الشحنة (شحنة موجبة)[٥].

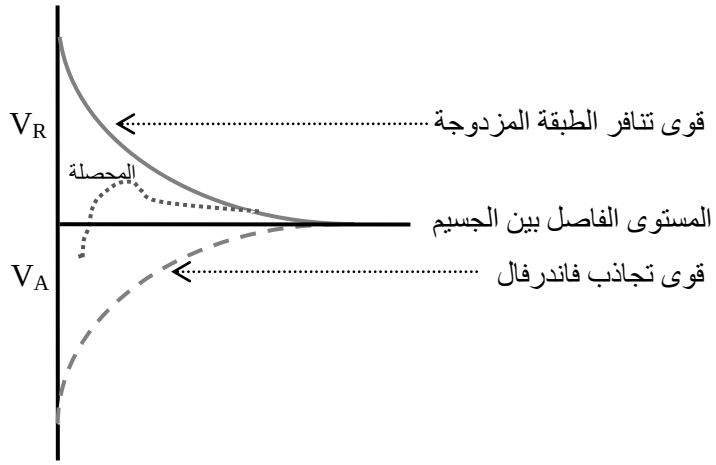
وعلى هذا النحو؛ يعتبر المعلق في حالة ثبات وجسيمات الغروي في حالة تفرق وتشتت، ونتيجة لذلك يحدث تداخل بين الطبقات المنتشرة حول الجسيمات مما يؤدى إلى إعادة توزيع الطبقة المزدوجة

الخاصة بكل جسيم، وينشأ عن ذلك بذل جهد أو شغل وهذا ما يطلق عليه طاقة التنافر أو جهد التنافر ويتوقف مدى فعالية جهد التنافر على سمك الطبقة المزدوجة .

تتناقص قوى التنافر تناقص أُسيا بزيادة المسافة بين الجسيمات شكل (٢/٦)، وتحدث أيضا قوى تجاذب بين جسيمات المعلق يطلق عليها قوى "فاندرفال" وهى قوى تعمل عكس قوى التنافر وتصبح فعالة فى المسافات القريبة جدا من الجسيمات وتقل بدرجة كبيرة بزيادة المسافة.

وعندما تقل المسافة بين الجسيمات وتصل إلى حوالي ٢٠ انجستروم أو أقل تصبح قوى فاندرفال هي السائدة وينتج عن ذلك تخثر لجسيمات المعلق. أما عندما تكون المسافة بين الجسيمات أكبر من ٢٠ انجستروم ، فإن قوى التنافر هي التي تسود؛ وتؤدى إلى ثبات معلق الطين، ويصبح غير قابل للترسيب.(٥)

يمكن تمثيل محصلة قوى التجاذب والتنافر بالخط المتقطع بالشكل (٢/٦)، وعند التركيزات المنخفضة من الألكتروليت؛ فإن التنافر يسود؛ حيث تصبح جسيمات الغروي محاطة بطبقة سميكة مزدوجة مما يقلل من احتمالات تقارب الجسيمات. أما في حالة التركيزات المرتفعة من الالكتروليتات فنجد أن فرص التقارب بين الجسيمات تزيد وذلك نتيجة لانضغاط الطبقة المزدوجة كما سيتم شرحه. وبذلك يمكن لقوة فاندرفال أن تقاوم قوى التنافر، ويحدث تبعا لذلك ترويب وتجميع الجسيمات بدرجة سريعة.



شكل (٢/٦) إزالة حالة ثبات الغرويات بالماء (إزالة العكارة)

آليات إزالة الشوائب العالقة

هناك مروبات كيميائية مختلفة تتمكن من إزالة العكارة بطرق مختلفة يمكن توضيحها من خلال الآليات الآتية:-

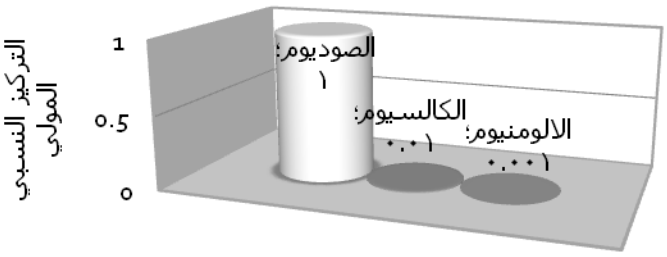
١- انضغاط الطبقة المزدوجة ٢- ادمصاص يؤدى إلى تعادل الشحنات ٣- الاندماج في راسب

أولا : انضغاط الطبقة المزدوجة:

يطلق على الأملاح البسيطة مثل كلوريد الصوديوم؛ بالألكتروليتات الحيادية، بمعنى أن الايونات الناتجة في المحلول (صوديوم Na^+ وكلوريد Cl^-) لها شحنات نقطية ليس لها تعلق بالتحلل المائي أو تفاعلات الإدمصاص في عملية الترويب.[٨]

تحدث إزالة للعكارة الناشئة عن الغرويات باستخدام الالكتروليتات الحيادية عن طريق الاندماج مع الايونات مختلفة الشحنة وتزيد كفاءة الترويب بصورة ملحوظة مع زيادة شحنات الأيونات .

فمثلا: التركيز المطلوب من أيونات الصوديوم Na^+ والكالسيوم Ca^{2+} الألومونيوم Al^{3+} لإزالة العكارة الناشئة عن الجسيمات الغروية سالبة الشحنة تكون تقريبا طبقا للنسب الموضحة بالشكل (٢/٧).



شكل (٢/٧) التركيزات النسبية المتكافئة لايونات الألومونيوم والكالسيوم والصوديوم اللازمة لإزالة العكارة وتعتبر التفاعلات التي تحدث بين المروبات الحيادية والجسيمات الغروية في الماء هي تفاعلات الكهروستاتيكية، فيحدث تنافر بين الأيونات ذات الشحنات المتشابهة والتي تتشابه مع الشحنات الأولية للغرويات بينما تتجاذب مع الأيونات المضادة لها في الشحنة وهذا يتضح في شكل (٢/٥أ).

يعتبر انضغاط الطبقة المنتشرة المحيطة بالجسيمات هو المتسبب في إزالة حالة ثبات الجسيمات الغروية في الماء (إزالة العكارة) وهذا يتم بواسطة الأيونات المخالفة في الشحنة. فعند ارتفاع تركيز

الألكتروليت في الماء (أي ارتفاع تركيز الأيونات أو زيادة المواد الصلبة الذائبة) فهذا يعمل على زيادة تركيز الأيونات المضادة الشحنة في الطبقة المنتشرة الغروية فينخفض تبعا لذلك حجم الطبقة المنتشرة الضرورية للمحافظة على التعادل الكهربي ويقل السُمك الفعال لهذه الطبقة (شكل ٢/٥أ،ب)، ويقل مدى التفاعل التنافري بين الجسيمات الغروية المتماثلة الشحنة (شكل ٢/٥جـ ، د) ، وتسود قوى التجاذب "فاندرفال" مع زيادة المسافات الفاصلة بين الجسيمات (شكل ٢/٥ د) ويختفي حاجز الطاقة، وتُزال حالة الثبات الكهروستاتيكي.

إن أفضل مثال لإزالة حالة الثبات بواسطة انضغاط الطبقة المزدوجة يحدث عندما تكون الجسيمات الموجودة في المياه العذبة للأنهار ذات قوى أيونية منخفضة (تركيز الأملاح الذائبة منخفضة) ثم تخلط مع مياه بحر ذات قوى أيونية عالية فيؤدى هذا إلى حدوث ترسيب أو ترويب للجسيمات العالقة في الماء نتيجة انضغاط الطبقة المزدوجة وبالتالي تتراكم الجسيمات مكونة تجمعات رسوبية ضخمة مثلما يحدث عند تقابل النهر مع البحر وينشأ عن ذلك تكون دلتات الأنهار.

عند ترويب المياه السطحية، تتحدد فعالية المروب عن طريق تجربة "اختبار الجار" حيث يتم تغيير جرعة المروب المضاف ثم تقاس العكارة المتبقية المقابلة لكل جرعة بعد فترات مناسبة من التجميع والترسيب.

يوضح الشكل(٢/٨أ) منحنيات تخطيطية للعكارة المتبقية كدالة للجرعة المضافة من المروب لمياه تعالج باستخدام أملاح الصوديوم وأملاح الكالسيوم وأملاح الالومونيوم، وحيث أن تلك المروبات تقوم بتفاعلات كهروستاتيكية الي جانب تفاعلات عديدة أخرى فلابد من فهم آليات إزالة ثباتية الجسيمات الغروية من المياه.

ثانيا : الإدمصاص ومعادلة الشحنة

لا بُد أن تؤخذ في الاعتبار الطاقة الداخلة في التفاعلات الكهروستاتيكية البسيطة بين الجسيمات الغروية وأيونات المروب. يمكن تمثيل الطاقة الكهروكيميائية بـ $\zeta F\psi_o$ حيث ζ شحنة المروب (+١) للمروب $Al(OH)^{2+}$ و F ثابت فاراداى و ψ_o = فرق الجهد بين سطح الجسيم والطبقة المنتشرة بالمحلول حول الجسيم؛ وحيث أن شحنة الأيون المضاد في الشحنة هو أحادى التكافؤ والجسيم له فرق جهد ١٠٠ مللي فولت، فإن طاقة الجذب الكهروستاتيكي هي ٩,٦ كيلو جول/ مول.

وحيث أن طاقة الترابط للروابط الكيميائية التساهمية تتراوح ما بين ٢٠٠ - ٤٠٠ كيلو جول / مول، وطاقة الرابطة الهيدروجينية ذات القيمة ٢٠ كيلو جول / مول ، فإن العديد من التفاعلات بين المروب والجسيمات الغروية لها تأثيرات كهروستاتيكية في إزالة العكارة الناشئة عن حالة ثبات الجسيمات الغروية في المياه.[٩]

تشير القيم النسبية لهذه الطاقات إلى أهمية التأثيرات الكيميائية بالمقارنة بالتأثيرات الكهروستاتيكية.

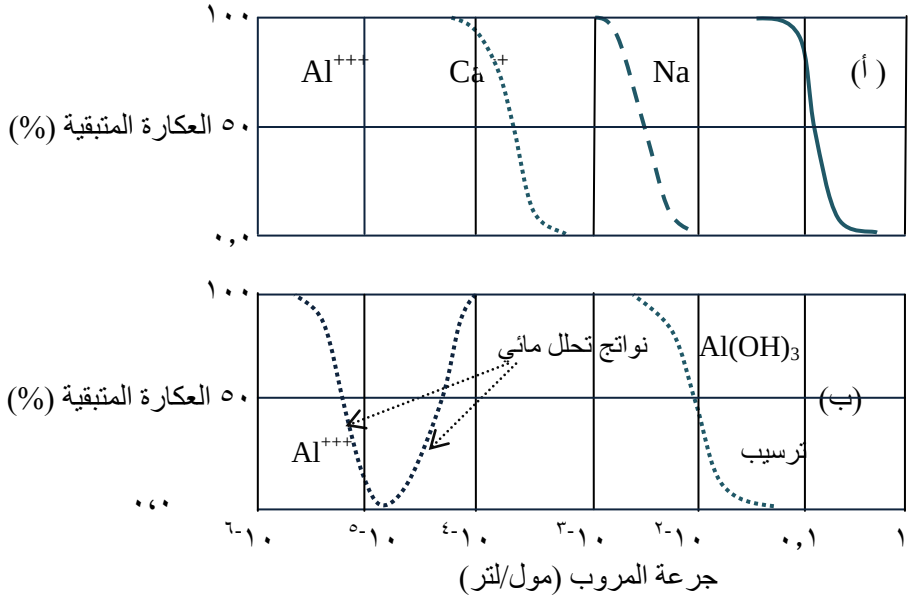
إن قدرة المروب على إزالة العكارة؛ هي محصلة العديد من التفاعلات التي تجري بين المروب والغروي، والمروب والماء، والغروي والماء، فنجد أن أيونات الصوديوم والكالسيوم تتفاعل بقوة مع جزيئات الماء ولكنها ليست لها أسطح نشطة.

تشير نتائج اختبارات الجار (شكل ٢/٨) أن:

- أيونات الصوديوم فعالة كمروبات عندما تكون تركيزاتها أعلى من ٠,١ مول (تركيز مرتفع جدا = ٢٣٠٠ مجم/لتر كصوديوم).
- إعطاء جرعة عالية من الصوديوم ليست ممكنة من الناحية العملية، وحرى بنا أن نذكر أن إعادة التعكير الحادث يكون مصحوبا أيضا بارتجاع للشحنة مرة أخرى؛ حيث أن الشحنة المحصلة على الجسيمات الغروية تنعكس من سالبة إلى موجبة نتيجة حدوث ادمصاص للمزيد من الأيونات المروب المضادة فى الشحنة على الجسيمات الغروية (٢/٨ ب).
- جرعة الكالسيوم التي تحقق اقل متبقي من العكارة تقترب من ٠,٠١مول ككالسيوم (أي حوالي ٤٠٠ مجم/لتر)، وهذه جرعة عالية من الناحية العملية.
- جرعة الألومونيوم التي حققت نفس أداء الصوديوم والكالسيوم هي حوالي ٠,٠٠٠١ مول ألومونيوم (أي حوالي ٢,٧ مجم/لتر).

فى حالة استخدام أيونات الألومونيوم المنحلة في الماء في معالجة الماء؛ فإن الإدمصاص النوعي يكون الأكثر شيوعًا، ولكن في هذه الحالة تنشأ تفاعلات كيميائية بين المروب والجسيمات الغروية؛ وحيث أن الإدمصاص يكون سائدا فانه يمكن التعبير عن نتائج اختبار الجار كما في شكل (٢/٨ ب).

وجدير بالإشارة إلى أن زيادة جرعة مروب الحديد أو الألومونيوم تؤدي إلى حدوث ارتجاع للشحنة مما يسفر عن تنافر بين الجسيمات وعودة التعكير مرة أخرى.



شكل (٢/٨) منحنيات الترويب (نتائج اختبارات جار) لثلاثة مروبات. يلاحظ حدوث انعكاس للشحنة مع الجرعات الزائدة من ملح الألومونيوم.

حيث أ: أملاح صوديوم وكالسيوم وألومونيوم ب: ملح الومونيوم

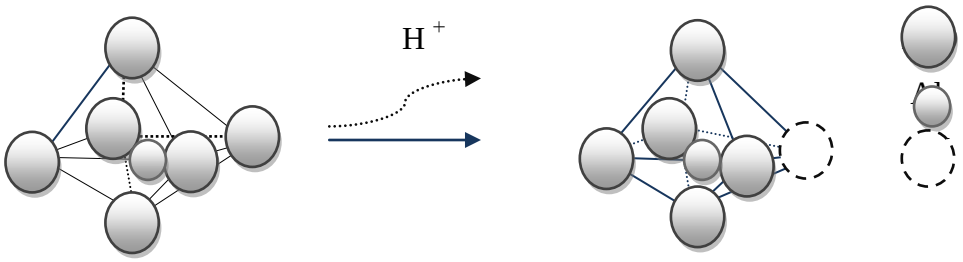
ثالثا : الاندماج في راسب

عند إضافة ملح فلزى مثل كبريتات الألومونيوم أو كلوريد الحديديك إلى الماء بتركيزات عالية فهذا يسبب ترسيب هيدروكسيد الألومونيوم $Al(OH)_3$ وهيدروكسيد الحديديك $Fe(OH)_3$ فيحدث اندماج بين هذه الترسبات والجسيمات الغروية وبالتالي يرسبان معًا. وهذا ما يطلق عليه الترويب بالكنس(Sweep coagulation) (شكل ٢/٨ب). وهذه الآلية هي محصلة إزالة حالة الثبات للجسيمات والترسيب في آن واحد. وهذا ما يحدث بكثافة في محطات معالجة المياه ذات العكارة المتغيرة والكربون العضوي الذائب من خلال مراحل متتابعة من الخلط السريع والتجميع والترسيب والترشيح.

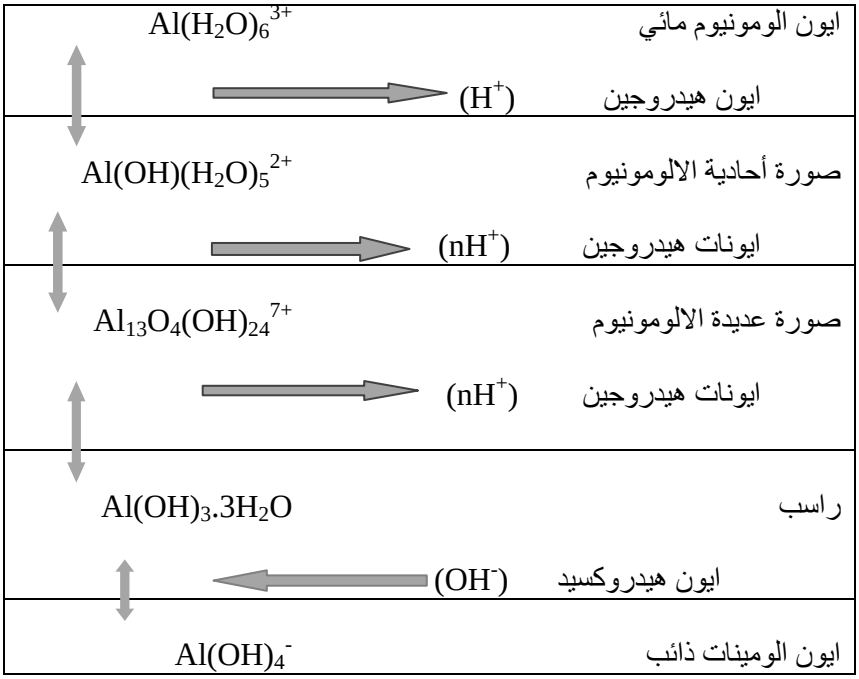
أما فى حالة المياه ذات العكارة المنخفضة واللون المنخفض فيمكن إضافة جسيمات (عكارة) إلى المياه التي تعالج من أجل تحسين الأداء الفيزيائي والحركي للتجميع وبالتالي تنتج "ندف" قابلة للترسيب في أحواض الترسيب.

التحلل المائي للمروبات الفلزية

تعتبر أملاح الكبريتات والكلوريدات المحتوية على أيونات الألومونيوم أو أيونات الحديديك هي الأوسع استخداما في معالجة المياه. فتحمل تلك الأيونات شحنات موجبة عالية في المحاليل المائية المركزة، وتكون روابط قوية مع ذرات الأكسجين لعدد "ستة" جزيئات مياه ويضعف ارتباط ذرات الأكسجين بهيدروجين جزيئات الماء وبالتالي تميل ذرات الهيدروجين إلى التحرر والائتلاف في المحلول (شكل٢/٩)، وهذه العملية تُعرف بالتحلل المائي ويطلق على المركبات الكيميائية مثل هيدروكسيد الألومونيوم وهيدروكسيد الحديديك الناتجة بنواتج التحلل المائي (شكل ٢/١٠).



شكل (٢/٩) انتزاع بروتون من الألومونيوم المائي– الخطوة الأولى في الانحلال المائي لمركب الألومونيوم.[١٠]



شكل (٢/١٠) نواتج التحلل المائي لمروب الألومونيوم

نواتج التحلل المائي لمروب الألومونيوم

تعتبر كيمياء التحلل المائي لمروبات الألومونيوم والحديد معقدة للغاية وتحتاج الكثير من الفهم، فإذا حدث تحلل مائي وكان هناك كمية من الفلز في النظام فالنواتج أحادية النواة البسيطة تكون صور عديدة الأنوية والتي بدورها تكون بلورات دقيقة لهيدروكسيد الفلز قابلة للترسيب (شكل ٢/١٠). وقد تقوم نواتج التحلل المائي بالادمصاص على أسطح الجسيمات العالقة، كما أنها تميل إلى التفاعل مع المواد العضوية الطبيعية ذات الوزن الجزيئي العالي .

ترتبط نواتج التحلل المائي الذائبة للمروب بالمجموعات الوظيفية للمواد العضوية الطبيعية، كما تقوم الجسيمات البلورية الدقيقة لهيدروكسيد الألومونيوم الموجبة الشحنة بادمصاص غلاف من المواد العضوية علي سطحها، مما يجعلها في حالة من الثبات (معلقة بالماء وغير قابلة للترسيب)[١١،١٢]

وينبغي الإشارة إلى أن الصيغة الكيميائية لأيونات الألومونيوم في المحاليل المائية هي $Al(H_2O)_6^{3+}$ ، ويتواجد حول هذه الأيون من ١٠-١٢ جزئ ماء إضافي مرتبطين ارتباط ضعيف مع $Al(H_2O)_6^{3+}$ ويحيط بايونات الألومونيوم أيونات ذات شحنات سالبة، وهى تحتوى على بعض جزيئات الماء ذات الارتباط القوى المحكم،[١٣] وتبعًا لذلك فإن الخصائص الفيزيائية لمحلول المروب مثل درجة الغليان والتجمد تختلف عن المياه العادية.(شكل ٢/٩)

عند إضافة المحلول المركز لملح الألومونيوم أو الحديد إلى الماء فإن أيونات الألومونيوم أو الحديد تتفاعل بقوة مع الماء وتُنتج أيونات الهيدروجين والهيدروكسيد على النحو الآتي:-

$$Al^{3+} + H_2O \rightarrow Al(OH)^{2+} + H^+ \qquad (٢/١٠)$$

هذه الأيونات المذكورة في هذه المعادلة تحتوى على جزيئات ماء مرتبطة كيميائيا ولكنها لم تكتب للتوضيح.

تتفاعل أيونات هيدروكسيد الألومونيوم المتكونة مع الماء على مرحلتين كما يلي:-

$$Al(OH)^{2+} + H_2O \rightarrow Al(OH)_2^{+} + H^+ \qquad (٢/١١)$$

$$Al(OH)^{2+} + H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + H^+ \qquad (٢/١٢)$$

وقد أشار بعض الباحثين[١٤،١٥] إلى أن هذه التفاعلات تحدث بصورة سريعة جدا؛ حيث تستغرق أقل من ثانية، ثم يبدأ تكوين راسب هيدروكسيد الألومونيوم قبل الترويب بالكنس في مدى زمني من١– ٧ ثوانٍ.(شكل ١١، ٢/١٢)

أثناء الثانية الأولى بعد إضافة محلول مروب الألومونيوم إلى الماء؛ فإن أيونات الألومونيوم تتواجد على هيئة Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$، وبكمية أقل على هيئة $Al(OH)_2^{+}$. ويمكن أن نقول انه عند إضافة محلول المروب المركز إلى الماء الذي يعالج، يتفاعل مروب الألومونيوم بآلية سريعة للغاية مع الماء بدرجة تفوق تفاعله مع الشوائب الموجودة بالماء ذاته، ويرجع هذا بطبيعة الحال إلى كبر نسبة الماء مقارنة بنسبة الشوائب، لذلك يجب إحداث إثارة وحركة عنيفة للماء حتى تزيد احتمالية تفاعل نواتج التحلل المائي للمروب (التي تتكون في اقل من ثانية) مع جميع الشوائب، ومن ثم يحدث هدم لحالة الثبات للجسيمات الغروية.

ومع الخلط السريع للمروب مع الماء يتكون راسب هيدروكسيد الألومونيوم في تجمعات صغيرة ضعيفة الترابط مع الماء (ندف دقيقة الحجم)، ومع مرور الوقت وأثناء الخلط البطئ لا تلبث رواسب هيدروكسيد الألومونيوم أن تفقد جزيئات الماء، وتبدأ جزيئاتها في الترابط مع بعضها من خلال تكوين روابط هيدروجينية تعمل على جعل الجسيمات صغيرة الحجم ذات أحجام أكبر وتصبح مرئية وتكون قابلة للترسيب.

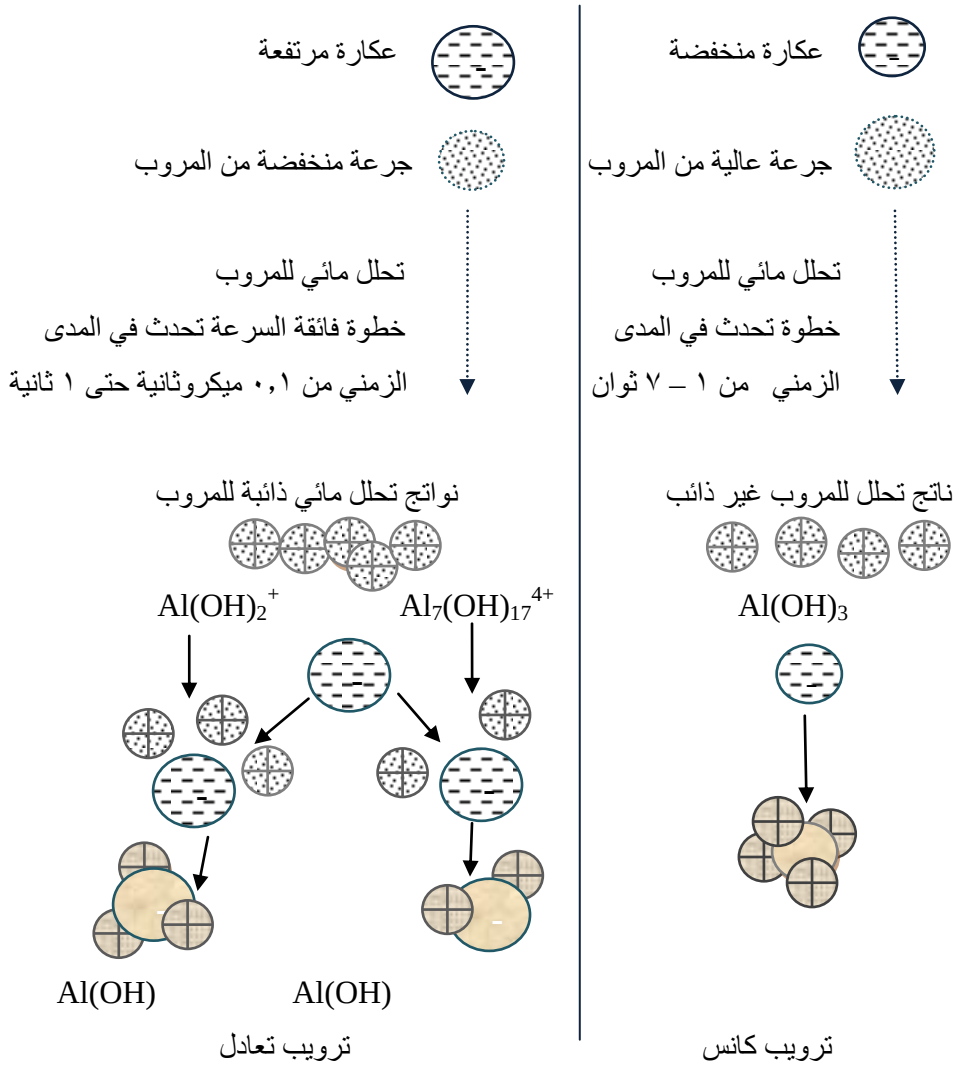
في الحالة الأولي السريعة يطلق علي الترويب بالترويب بالتعادل، أما في الحالة الثانية البطيئة نسبيا يحدث الترويب بالكنس وفيها يتكون راسب ينمو مع الوقت وهذا ما يتم في المحطات التقليدية. (شكل ١١، ٢/١٢)

$$Al_2(SO_4)_3.14.3H_2O + H_2O \rightarrow Al(H_2O)_6^{3+} + SO_4^{2-} + H_2O \longrightarrow$$

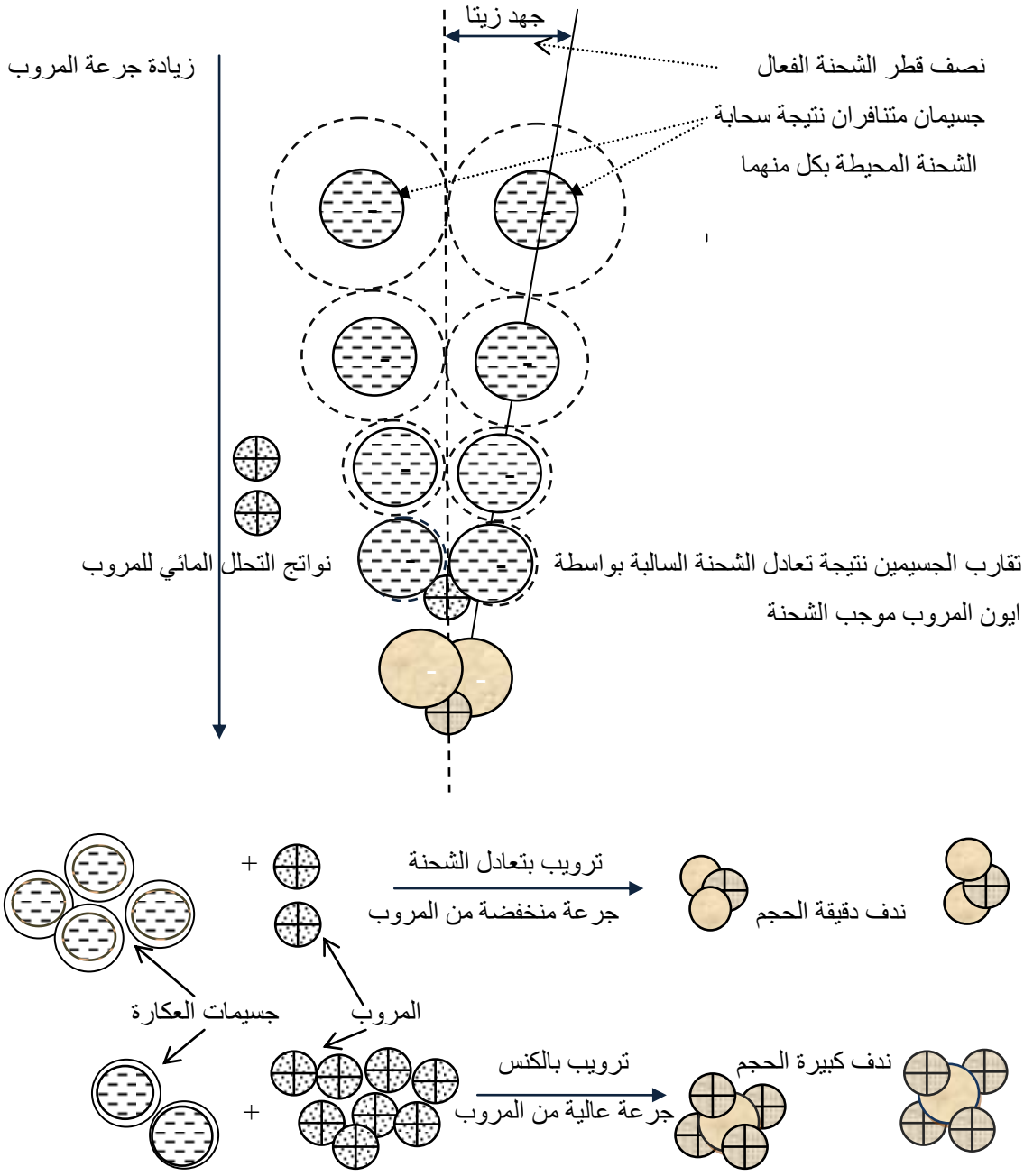
(خطوة فائقة السرعة تحدث في المدى الزمني من ٠,١ ميكروثانية حتى ١ ثانية)

$$Al(OH)_2^{+} + Al(OH)^{2+} + Al_7(OH)_{17}^{4+} \longrightarrow Al(OH)_3\downarrow + \ldots H^{+}$$

(خطوة تحدث في المدى الزمني من ١ – ٧ ثوان)



شكل (٢/١١) مخطط توضيحي للترويب بتعادل الشحنة والكنس[١٥]



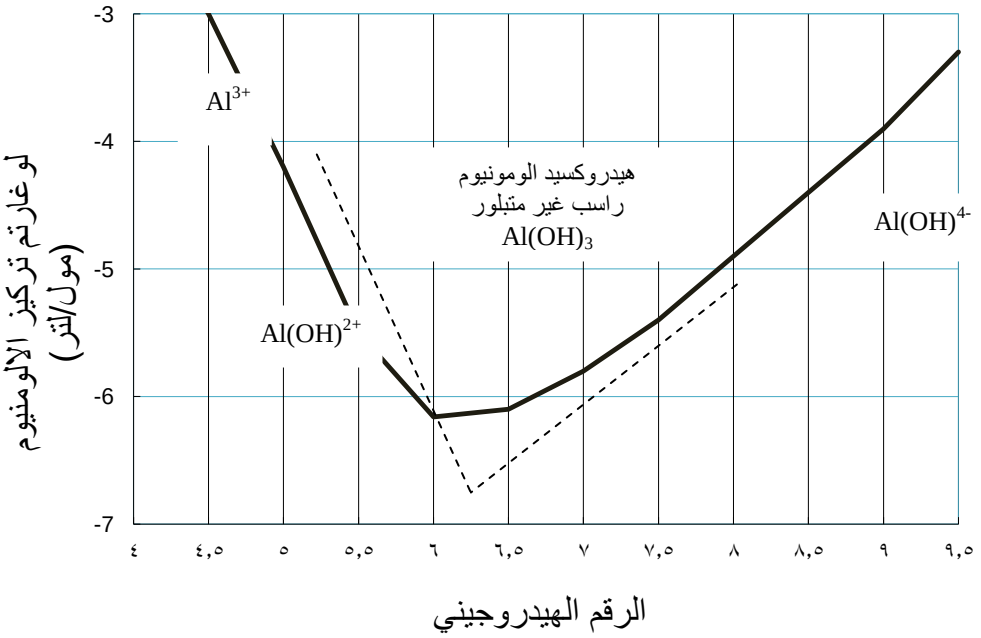
شكل (٢/١٢) تخطيط توضيحي لآلية الترويب لجسيمين متنافرين بالتعادل والكنس

ذوبانية هيدروكسيد الألومونيوم وهيدروكسيد الحديديك في الماء

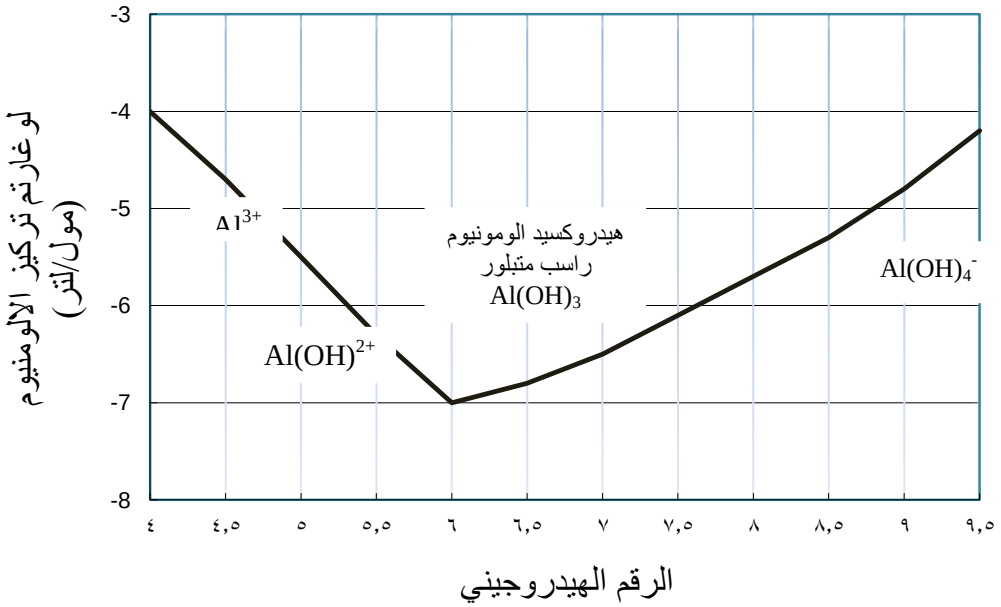
تعتبر ذوبانية هيدروكسيد الألومونيوم أو هيدروكسيد الحديديك عاملا مهمًّا في عملية الترويب. ولا بُد أن يتم تناولها باهتمام شديد حرصًا على تحقيق أعلى أداء للمروب بأقل جرعة ممكنة منه، والوصول إلى أقل تركيز من الألومونيوم المتبقي في المياه بعد المعالجة.

عند الرقم الهيدروجيني المنخفض يتفكك راسب هيدروكسيد الألومونيوم أو هيدروكسيد الحديديك وتتكون نواتج تحلل مائي ذائبة موجبة وأيونات ألومونيوم وحديديك مائية (Al^{3+} , Fe^{3+})

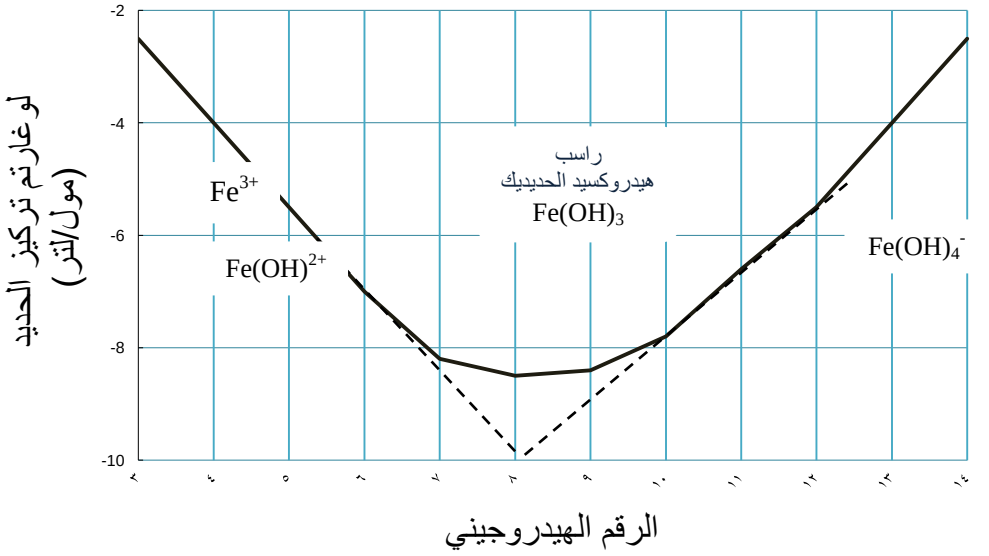
وعند الرقم الهيدروجيني العالي تتكون نواتج تحلل مائي ذائبة سالبة الشحنة $Fe(OH)^-_4$ أو $Al(OH)^-_4$ هذه الصور رباعية الأوجه تتسبب في حدوث مزيد من انتزاع البروتون مقارنة بالأشكال ثمانية الأوجه. (أشكال ٢/١٣ - ٢/١٥)



شكل (٢/١٣) منحنى ذوبانية الالومنيوم في حالة اتزان مع راسب هيدروكسيد الالومنيوم غير المتبلور (٢٥°م)



شكل (٢/١٤) منحنى ذوبانية الالومنيوم في حالة اتزان مع راسب هيدروكسيد الالومنيوم المتبلور (٢٥°م)



شكل (٢/١٥) منحنى ذوبانية الحديد غير المتبلور في حالة اتزان مع راسب هيدروكسيد الحديديك (الملح المستخدم كلوريد الحديديك عند ٢٥°م).

ومن خلال استعراض الشكل (٢/١٣) نجد أن أقل ذوبانية لراسب هيدروكسيد الألومونيوم تحققت عند رقم هيدروجيني ٦,٣ ، وبالنسبة لراسب هيدروكسيد الحديديك تحققت عند رقم هيدروجيني ٨ (شكل ٢/١٥) عند درجة ٢٥°م ، ومع تناقص درجة الحرارة تتحقق أقل ذوبانية لكلا الراسبين عند

رقم هيدروجيني أعلى؛ فعند درجة حرارة ٤°م فإن الرقم الهيدروجيني الذي يحقق أقل ذوبانية لراسب هيدروكسيد الألومونيوم حديث التكوين يكون ٦,٨.[١٦]

رسمت الأشكال البيانية للذوبانية في الشكلين (٢/١٣، ٢/١٥) باستخدام ثوابت التكوين B_{xy} وثوابت الذوبانية K_{sp} (جدول ٢/٣) ، وينبغي الإشارة إلى أن ثوابت التكوين المذكورة في هذا الجدول هى للتفاعلات الآتية:

$$xM^{3+} + yH_2O \leftrightarrow M_x(OH)_y^{(3x-y)+} + yH^+ \quad (٢/١٣)$$

$$B_{x,y} = [M_x(OH)_y^{(3x-y)+}][H^+]^y / [M^{3+}]^x \quad (٢/١٤)$$

ثوابت الذوبانية وعلاقات حاصل الإذابة هي للتفاعل وعلاقات حاصل الإذابة للمعادلة الآتية:

$$M(OH)_3 + 3H^+ \leftrightarrow M^{3+} + 3H_2O \quad (٢/١٥)$$

$$K_{sp} = [M^{3+}]/[H^+]^3 \quad (٢/١٦)$$

جدول (٢/٣) ثوابت التكوين وثوابت الذوبانية المستخدمة في رسم أشكال ذوبانية هيدروكسيد الألومونيوم غير المتبلور[١٧] وراسب هيدروكسيد الحديديك غير المتبلور[١٨] ، عند درجة حرارة ٢٥°م. القيمة المذكورة بين الأقواس هي قيمة تصحيحية للتركيز الأيوني (٠,٠٠١ مول).

ثابت الإذابة	ثابت التكوين $pB_{x,y}$	نواتج التحلل المائي
راسب هيدروكسيد الألومونيوم غير المتبلور [٣٧، ٤٠]		
(٥,٠٧)	٤,٩٩	$Al(OH)^{2+}$
(٢٣,١٢)	٢٣,٠٠	$Al(OH)_4^-$
(١٠,٦٤)	١٠,٥غير متبلور	$Al(OH)_3$
راسب هيدروكسيد الحديديك غير المتبلور		
	٢,٢	$Fe(OH)^{2+}$
	٥,٧	$Fe(OH)_2^+$
	٢١,٦	$Fe(OH)_4^-$
	٣٨,٧	$Fe(OH)_3$

وقد أشار العديد من الباحثين[١٢] الى أهمية نواتج التحلل المائي لمروب الألومونيوم التي تشمل:

$Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_3$, $Al(OH)_4^-$

وآخرون ذكروا أن تأثير الرقم الهيدروجيني على ذوبانية راسب هيدروكسيد الألومونيوم حديث التكوين يمكن أن يُعرف عن طريق استخدام الأشكال الكيميائية لأيون الألومونيوم المائي، مثل: $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_4^-$ (شكل ٢/١٣) .

يعبر الخط المتقطع في الشكل (٢/١٣) عن تركيزات مركبات الألومونيوم عندما تكون في حالة اتزان مع راسب هيدروكسيد الألومونيوم $Al(OH)_3$ ، وقد اشتقت معادلة كل خط باستخدام ثوابت التكوين المناسبة مصححة مع التركيز الأيوني.

فمثلا: عندما يكون التركيز الأيوني= ٠,٠٠١ مول فان:

$$Log\ [Al(OH)^{2+}] = \log B_{1.1} + \log K_{sp} + 2 \log H^{+} = 5.57 - 2\ pH \qquad (٢/١٧)$$

وقيم كل من $\log K_{sp}$, $B_{1.1}$ عند تركيز ٠,٠٠١ مول مذكورة بالجدول (٢/٣).

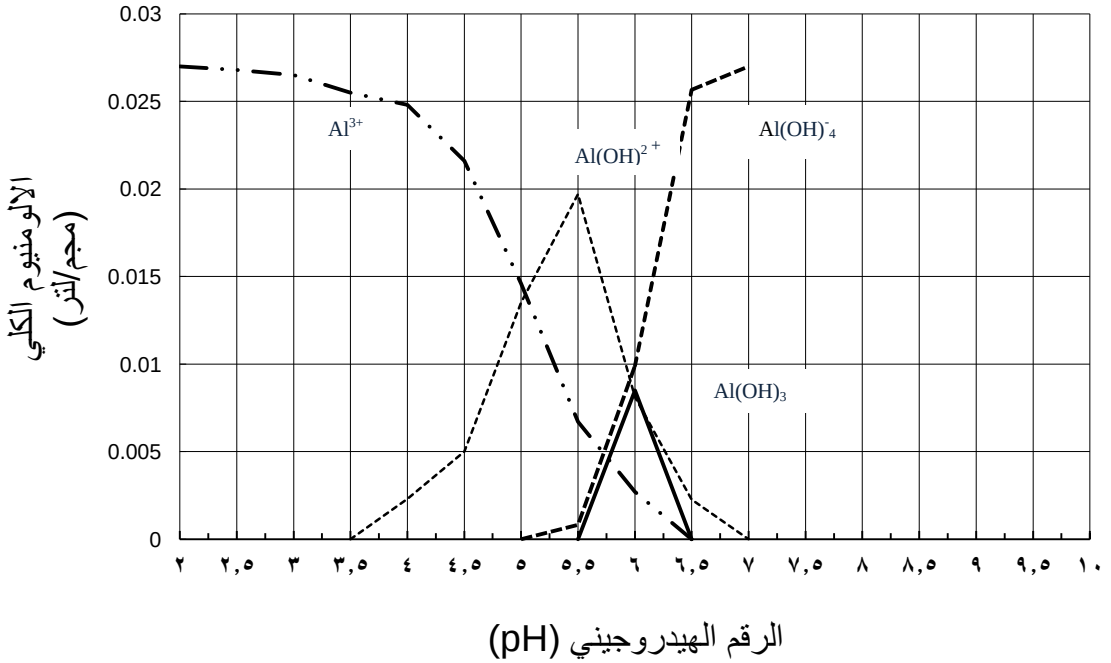
يشير الشكلين (٢/١٣، ٢/١٤) إلى أن تكوُّن هيدروكسيد الألومونيوم غير المتبلور يكون أقل من الصورة المتعددة الأنوية لذرة الألومونيوم، ويتضح أن انخفاض قيمة حاصل الإذابة لهيدروكسيد الألومونيوم غير المتبلور هي الأساس في عملية الترسيب.

تأثير الرقم الهيدروجيني وتركيز الألومونيوم الكلي على نواتج التحلل المائي (أشكال الألومونيوم)

عند معايرة محلول الألومونيوم باستخدام محلول قلوي قوى يزداد انحلال الألومونيوم مكونا نواتج انحلال متغيرة ومختلطة، ويعتمد توزيع مركبات الألومونيوم Al^{3+} التي في حالة اتزان على الرقم الهيدروجيني والتركيز الكلى للألومونيوم. وقد حُسب تأثير الرقم الهيدروجيني على التوزيع الجزيئي لنواتج الانحلال المائي باستخدام المعادلة (٢/١٤ و ٢/١٦)، وسُجلت نواتج انحلال الألومونيوم المائي وثوابت الاتزان (لمحلول تركيزه ٠,٠٠١ مول) بالجدول (٢/٣) وبناء على هذه البيانات رسم الشكل البياني (١٦، ٢/١٧) للتركيزات الكلية للألومونيوم لمحلول تركيزة ١٠$^{-٦}$ مول (٠,٠٢٧ مجم ألومونيوم /لتر أو ٠,٣ مجم كبريتات ألومونيوم ذات التركيب الكيميائي $[Al_2(SO_4)_3.14.3H_2O]$ ومحلول تركيزه ٣×١٠$^{-٤}$ مول (٨,١ مجم ألومونيوم /لتر أو ٩٠ مجم كبريتات ألومونيوم /لتر) على التوالي.

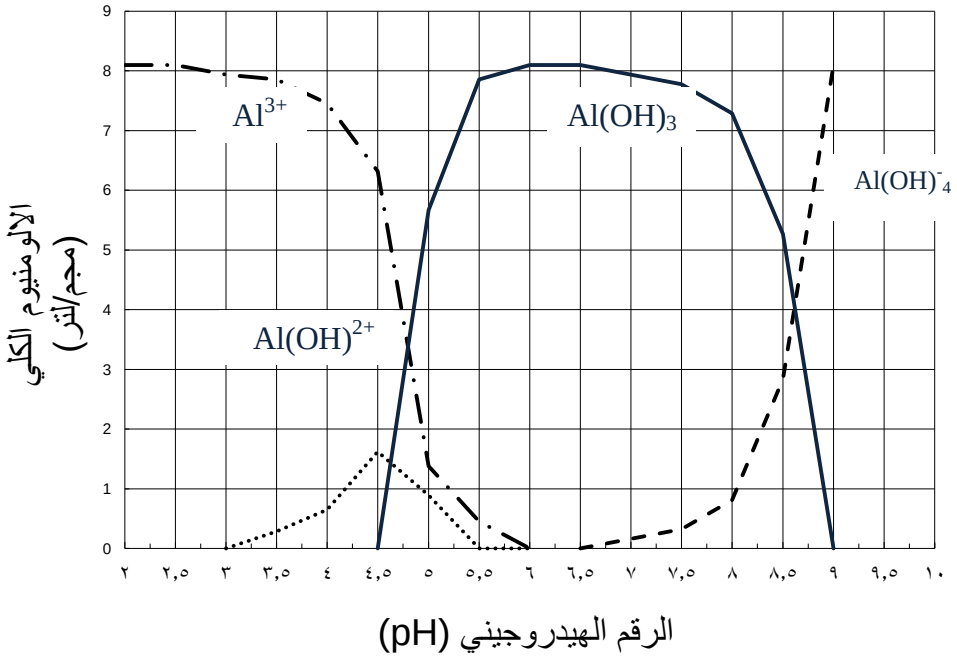
يتضح من خلال دراسة الشكل (٢/١٦)، حيث أن تركيز الألومونيوم الكلى = ١٠$^{-٦}$ مول (٠،٠٢٧ مجم ألومونيوم)، فان كمية صغيرة من هيدروكسيد الألومونيوم $Al(OH)_3$ ترسبت في المدى ٥,٨ – ٦,٥ من الرقم الهيدروجيني.

وعند الرقم الهيدروجيني ٦,١ نجد أن كمية الراسب وصلت إلى أقصاها، والمركبان $Al(OH)_2^+$ ، $Al(OH)_4^-$ هما المركبان الرئيسيان لنواتج الانحلال المائي للمروب ويشكلان أكثر من ٧٠% من الألومونيوم الكلى للمنظومة.



شكل (٢/١٦) تأثير الرقم الهيدروجيني وتركيز الالومنيوم الكلي على توزيع أشكال الالومنيوم (تركيز الالومنيوم الكلي = ٠,٠٢٧ مجم/لتر)[٣]

أما عند استخدام تركيز عالي من الألومونيوم ٣×١٠$^{-٤}$ مول (٨,١ مجم ألومونيوم) (شكل ٢/١٧)؛ فإن راسب هيدروكسيد الألومونيوم يبدأ في التكوين عند رقم هيدروجيني ٤,٧، بينما عند رقم هيدروجيني ٩ جميع الألومونيوم يذوب ويتحول إلى $Al(OH)_4^-$. في حين أنه عند المدى من ٥,٥ حتى ٨,٥ من الرقم، يعتبر راسب هيدروكسيد الألومونيوم هو المنتج السائد لنواتج الانحلال المائي لمروب الألومونيوم.



شكل (٢/١٧) تأثير الرقم الهيدروجيني وتركيز الالومنيوم الكلي على توزيع الاشكال المختلفة للألومونيوم عندما يكون تركيز الالومنيوم الكلي (٨,١ مجم الومنيوم/ لتر)

نلاحظ فى الشكلين (٢/١٦، ٢/١٧) أن عند رقم الهيدروجيني > ٨ فإن الشكل الكيميائي الرئيسي الذائب عند حالة الاتزان هو أنيون $Al(OH)^-_4$ (الأحادي) وعند رقم هيدروجيني أقل من ٦ نجد أن الأشكال الذائبة السائدة في حالة اتزان مع الجبسيت (هيدروكسيد الألومونيوم متبلور) هي كاتيونات $Al(OH)^{2+}$, Al^{3+}.

فحينما يضاف مروب الألومونيوم إلى الماء الذي يعالج يتكون راسب صلب غير متبلور من هيدروكسيد الألومونيوم له حاصل إذابة log K = -31.5 وهذا الراسب يكون أكثر ذوبانية من الجبسيت ذي حاصل الإذابة (log K = -33.5).

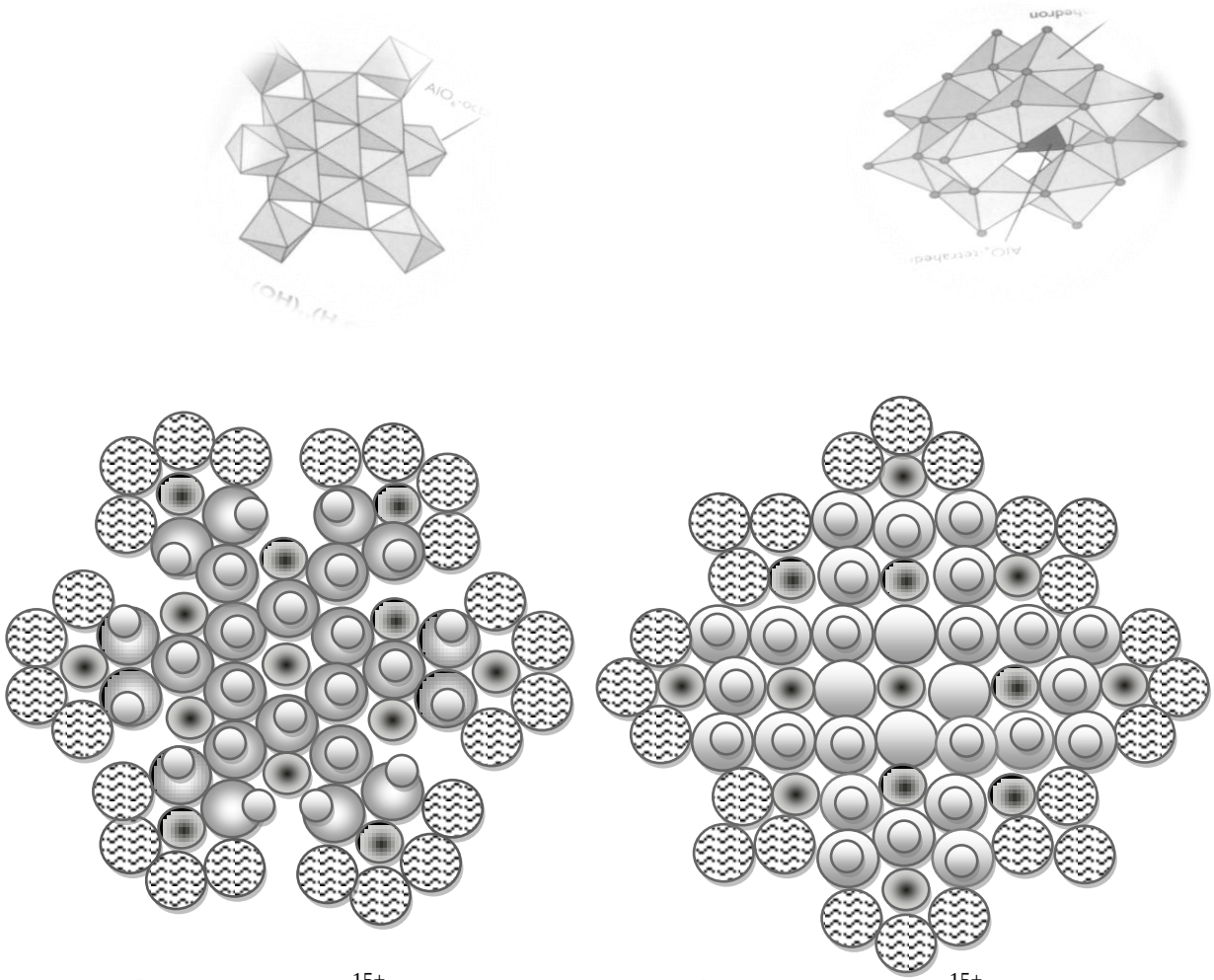
تتكون ثلاثة نواتج تحلل مائي لمروب الألومونيوم في أشكال متبلمرة من هيدروكسيد الألومونيوم (تم التعرف عليها من خلال تقنية ومن خلال القياس الطيفي " رنين مغناطيسي نووي")[١٢،٣] وهي:-

$Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al_3(OH)_4^{5+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$

ومن خمس صور أخرى غير متبلمرة في حالة اتزان مع الراسب حديث التكوين وهى:-

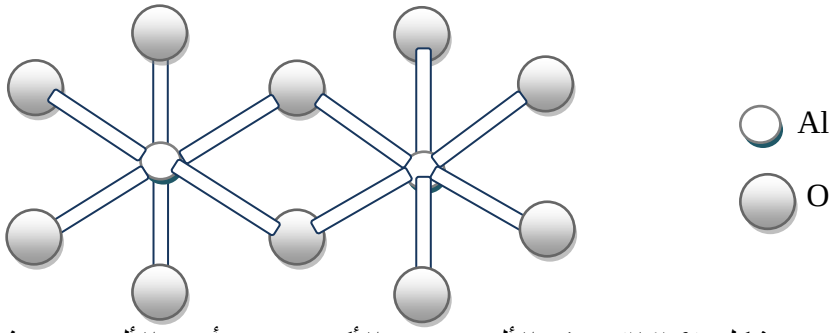
Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^{+}$, $Al(OH)_3$, $Al(OH)_4^-$

عند الرقم الهيدروجيني ٦,٢ نلاحظ أن ذوبانية هيدروكسيد الألومونيوم تكون أقل ما يمكن، فإذا أضيفت جرعة من بلورات كبريتات الألمونيوم ذات التركيب الكيميائي $Al_2(OH)_3.14.3H_2O$ قدرها ٣٠ مجم/لتر أي حوالي 10^{-4} مول يترسب هيدروكسيد الألومونيوم في المدى من ٥,٨ – ٨ من الرقم الهيدروجيني، بينما عند رقم هيدروجيني أقل من ٥,٧ فإن الراسب حديث التكوين غير المتبلور يذوب بسهولة ويسود فى هذه الحالة الصورة المتعددة لذرة الألومونيوم $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ [١٣].



شكل (٢/١٨) التركيب البنائي الجزيئي لايونين للالومونيوم ١٣ (Al_{13})

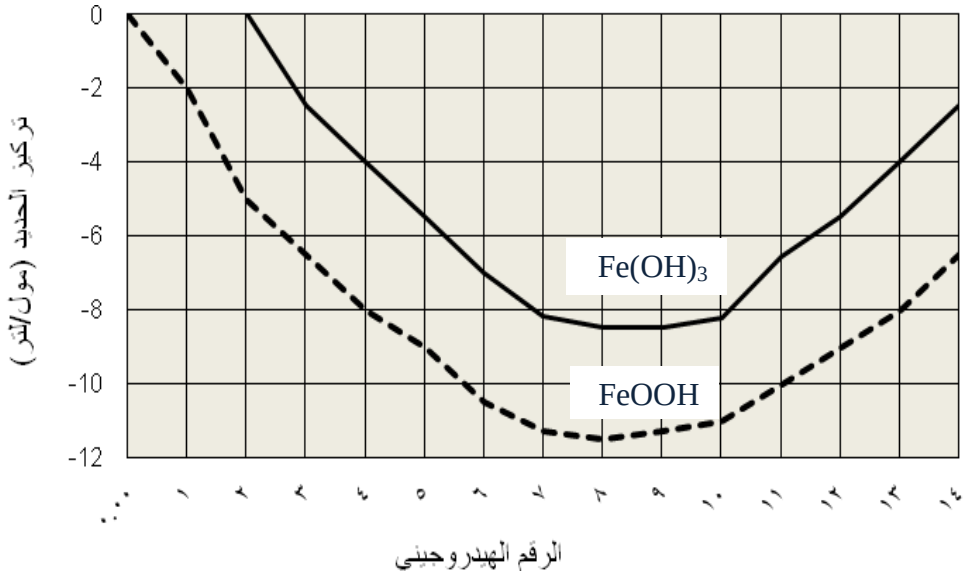
ويعتبر الشكل ثنائي البلمرة هو ابسط شكل يتواجد فيه الألومونيوم:



شكل (٢/١٩) موقع الألومونيوم والأكسجين في أيون الألومونيوم ثنائي البلمرة

الكيمياء المائية للحديد

يوضح الشكل (٢/٢٠) منحنى الذوبانية للحديد (Fe^{3+}) فى الماء اعتمادا على البيانات الديناميكية الحرارية المذكورة في الجدول (٢/٤).[٩]



شكل (٢/٢٠) منحنيا الذوبانية لهيدروكسيد الحديديك غير المتبلور والمتبلور (الملح المستخدم كلوريد الحديديك المائي)

يمثل المنحنى السفلى حالة اتزان بين جسيمات مركب هيدروكسيد الحديديك المتبلور Fe OOH (جيوسايت) ذي حاصل الاذابة log K= -41.7 وبين الصورة الذائبة للحديد. أما المنحنى العلوي فهو يمثل حالة اتزان بين الراسب المتكون حديثا غير المتبلور من هيدروكسيد الحديديك $Fe(OH)_3$ ذي حاصل الإذابة log K = -38.7 وبين الصورة الذائبة منه، فعند الرقم الهيدروجيني ١٠، فإن الصورة الذائبة من الحديد المتواجد في حالة اتزان مع الصورة الصلبة تكون أنيونية $Fe(OH)_4^-$ ، أما

عند الرقم الهيدروجيني المنخفض الأقل من "٦" فان الصورة الذائبة تكون كاتيونية ($Fe(OH)_2^+$, Fe^{3+}) ويكون الحديد ثلاثي التكافؤ وتكون أقل ذوبانية له عند رقم هيدروجيني ٨ (ارجع للشكل ١٥ /٢).

يترسب هيدروكسيد الحديديك غير المتبلور من محلول الحديد ذي التركيز ١٠$^{-٤}$ مول عند رقم هيدروجيني ٣ تقريبا. ومن خلال تفاعلات الاتزان المذكورة في الجدول (٢/٤) والذوبانيات في جدول (٢/٤) فأن الحديديك يكون أكثر حامضية وأقل ذوبانية من الألومونيوم، وكما هو الحال مع الألومونيوم فإن كيمياء الحديد في معالجة المياه تحكمها آليات التفاعل مع الملوثات.

يوضح الجدول (٢/٤) التفاعلات التي تحدث للحديد قبل تكوين الراسب المتبلور من هيدروكسيد الحديديك؛ وحيث أن محاليل أملاح الحديد حامضية فهي تستهلك قلوية أثناء التفاعل مع الماء وترسب هيدروكسيد الحديديك وعادة ما يضاف مروب الحديد على هيئة كلوريد الحديديك أو كبريتات الحديديك وقد يتواجد ملح كبريتات الحديديك تجاريا فى صورة غير مائية متبلورة وهو سريع الذوبان في الماء ويتواجد كلوريد الحديديك فى صورة سائلة أو صلبة متبلورة وكل هذه الصور ذات تأثير عدواني على الفلزات لذلك ينبغي تداولها في خزانات مبطنة بالمطاط أو الزجاج كما أن الصورة غير المائية البلورية يمكن تداولها في حاويات من الصلب مع تجنب الرطوبة.

ومن خلال الشكل (٢/٢٠) نجد أن الحديد ذا التكافؤ الثلاثي هو المذكور لكونه هو الصورة التي يترسب عليها الحديد، وتعتبر الصورة الثنائية هي الأكثر ذوبانية، لذلك فان طرق إزالة الحديد تعتمد على الأكسدة إلى الصورة الأقل ذوبانية. ونلاحظ من الشكل أن الرقم الهيدروجيني يؤثر تأثيرا جوهريا على ترسيب الحديديك؛ حيث يحدث أقصى ترسيب أو أقل ذوبانية في المدى من ٦,٥ – ٩,٥، ومن هنا نقول أن القلوية (كربونات) تحكم ذوبانية الحديد في الماء، وفي أنواع أخرى من المياه الأرضية يؤثر تواجد الهيدروكسيد والكبريتات على ذوبانية الحديد.

وإذا تتبعنا المنحنى الأعلى من الشكل (٢/٢٠) لوجدنا أن أقل تركيز نظري لحديديك هو في المدى ما بين ١٠$^{-٨}$ – ١٠$^{-٩}$ مول/لتر (٥,٥٨ × ١٠$^{-٤}$ – ٥,٥٨ × ١٠$^{-٥}$ مجم/لتر)، وهذا يقع في المدى الرقمي الهيدروجيني ٧- ١٠. وتعتبر أكسدة الحديد الذائب إلى الحديديك الأقل ذوبانية وترسيبه اللاحق على هيئة هيدروكسيد الحديديك هو الأسلوب التقني الأكثر فاعلية في إزالة الحديد من الماء.

جدول (٢/٤) نواتج تفاعلات أملاح الحديد وأملاح الألومونيوم مع الماء[٩]

مسلسل	التفاعل	لوغاريتم حاصل الإذابة عند ٢٥°م
1	$Fe^{3+} + H_2O \rightarrow FeOH^{2+} + H^+$	**2.2**
2	$Fe\ OH^{2+} + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2^+ + H^+$	**3.5**
3	$Fe\ (OH)_2^+ + H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + H^+$	**6**
4	$Fe^{3+} + 2\ H_2O \rightarrow Fe_2(OH)_2^{4+} + 2H^+$	**2.9**
5	$3Fe^{3+} + 4H_2O \rightarrow Fe_3(OH)_4^{5+} + 4H^+$	**6.3**
6	$Fe(OH)_3 \rightarrow Fe^{3+} + 3OH^-$	**38.7**
7	$FeOOH + H_2O \rightarrow Fe^{3+} + 3OH^-$	**41.7**
8	$Fe\ (OH)_3 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_4^- + H^+$	**21.6**
9	$Al^{3+} + H_2O \rightarrow Al(OH)^{2+} + H^+$	**4.97**
10	$AlOH^{2+} + H_2O \rightarrow Al(OH)_2^+ + H^+$	**4.3**
11	$Al(OH)_2^+ + H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + H^+$	**5.7**
12	$Al(OH)_3 + H_2O \rightarrow Al(OH)_4^- + H^+$	**8.0**
13	$2Al^{3+} + 2H_2O \rightarrow Al_2(OH)_2^{4+} + 2H^+$	**7.7**
14	$3Al^{3+} + 4H_2O \rightarrow Al_3(OH)_4^{5+} + 4H^+$	**13.94**
15	$13Al^{3+} + 28H_2O \rightarrow Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+} + 32H^+$	**98.73**
16	$Al(OH)_{3\ cry.} \rightarrow Al^{3+} + 3OH^-$	**31.5**
17	$Al(OH)_{3\ am.} \rightarrow Al^{3+} + 3OH^-$	**33.5**

أنواع المروبات التي تنحل مائياً والمستخدمة فى معالجة المياه

١ـ أملاح فلزية بسيطة

تعتبر كبريتات الالومونيوم وكبريتات الحديديك وكلوريد الحديديك من المروبات البسيطة التي تنحل بالماء، وقد تنتج على هيئة ملح صلب أو محلول مائي مركز. ويعتبر ملح كبريتات الالومنيوم (المعروف بالشَّبَّة) هو من المروبات الأكثر استخدامًا يليه كبريتات الحديديك.

تعتمد حامضية تلك المروبات على ايونات الهيدروجين الناتجة من تحللها المائي والتي تتفاعل مع قلوية الماء طبقا للمعادلتين الآتيتين:-

$$Al_2(SO_4)_3.nH_2O + H_2O \rightarrow 6H^+ + 2Al(OH)_3 + 3SO_4^- \quad (٢/١٨)$$

$$H^+ + HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow (CO_2 + H_2O) \quad (٢/١٩)$$

جدول (٢/٥) الحامضية والقاعدية لبعض المروبات

المروب	القاعدية (%)	تركيز الفلز (%)	الحامضية (%)
كبريتات الألومونيوم	صفر	٤,٣	٠,١١١
عديد كبريتات الألومونيوم	٦٥	٤	٠,٠٣٨
عديد كلوريد الألومونيوم	٧٥	١٢,٣	٠,٠٢٨
كبريتات الحديديك	٧	١٢	٠,٠٥١

تتغير العلاقة بين كمية المروب المستخدم المضاف إلى المياه المراد معالجتها والرقم الهيدروجيني مع الوقت، ويرجع هذا إلى انتقال ثاني أكسيد الكربون من أو إلى المياه، وبناءً على ذلك فإن العلاقة التي يتم الحصول عليها من خلال القياسات المعملية ليست دائماً تكون متفقة مع ما يتم ملاحظته في الموقع.

٢ـ أملاح سابقة الانحلال المائي

عندما تضاف الأملاح الفلزية البسيطة إلي الماء بصورة مخففة، فانه يحدث تحلل مائي لتلك الأملاح وتنطلق ايونات الهيدروجين التي تتفاعل مع قلوية الماء. فإذا حدث أن عادلنا تلك الحامضية الموجودة في تلك الأملاح باستخدام قاعدة أثناء تصنيعها فتتكون نواتج منحلة مائيا يطلق عليها نواتج سابقة الانحلال المائي. كما يطلق على مدي أو درجة معادلة حامضية تلك المروبات بالقاعدية.

تتراوح القاعدية للمروبات التجارية ما بين ١٠ – ٨٠ %. وتجدر الإشارة إلى أن زيادة القاعدية تؤدي إلى حدوث ترسيب لهيدروكسيد الفلز أثناء التخزين الطويل. ومن أمثلة المروبات سابقة التحلل المائي: عديد كبريتات الألومونيوم و عديد كلوريد الألومونيوم وعديد كلوريد الحديديك.

تستخدم هذه النوعية من المروبات لمعالجة المياه منخفضة القلوية (منخفضة الرقم الهيدروجيني) وتعمل بكفاءة في المناطق الباردة.

جدول (٢/٦) القاعدية وخصائص أخرى لبعض مركبات الالومنيوم[٢]

الصيغة الكيميائية للمركب	النسبة المولية (OH / Al)	القاعدية النسبية (%)	عدد الشحنات الموجبة	عدد الشحنات الموجبة لكل ذرة الومنيوم عدد ايونات H^+ التي تتحرر عندما يتكون $Al(OH)_3$	عدد جزيئات الماء
$Al\ (H_2O)_6^{3+}$	٠,٠	٠,٠	٣	٣	٦
$Al_2(OH)_2.\ (H_2O)_8^{4+}$	١	٣٣	٤	٢	٤
$Al_{13}(OH)_{24}.\ (H_2O)_{24}^{15+}$	١,٨٥	٦٢	١٥	١,١٥	١,٨٥
$Al_{13}O_4(OH)_{24}.(\ H_2O)_{12}^{7+}$	٢,٤٦	٧٢	٧	٠,٥٤	٠,٩٢
$Al\ (OH)_3.\ (H_2O)_x$	٣	١٠٠	٠,٠	٠,٠	X

يوضح الجدول (٢/٦) النسبة المولية (OH/Al) والقاعدية النسبية للايونات المختلفة للالومونيوم وعدد الشحنات الموجبة لذرات الالومونيوم وعدد ايونات الهيدروجين (H^+) التي تنطلق عندما يتكون هيدروكسيد الالومونيوم. كلما ارتفعت القاعدية لأملاح الالومونيوم كلما انخفض تناقص القلوية للماء المعالج وتزداد القدرة على ترسيب العكارة. والقاعدية هي خاصية سهلة القياس وهي معيار لتحديد خصائص المروب المطلوب، ولكل ملح من أملاح عديد الالومونيوم قاعدية معينة.

جميع أملاح الألومونيوم حامضية باستثناء أملاح الالومينات التي لها الصيغة الكيميائية $Al(OH)_4^-$، هذا يعني ان ايونات الهيدروجين (H^+) تتحرر عندما تضاف تلك الأملاح الحامضية إلى الماء، وكما هو موضح بالجدول (٢/٦) فان أقصى عدد من ايونات الهيدروجين يتحرر هو ثلاثة لكل ايون الومونيوم:

$$Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$$

جميع أملاح عديد الالومونيوم تحتوي على (OH^-)، أي أنها تحتوي على قاعدية، وتكتب الصيغة العامة لعديد الالومونيوم على النحو التالي:-

$$[Al(OH)_x\ A_{3-x}]_n$$

حيث: x أكبر من صفر وأقل من ٣ و n أكبر من أو تساوي ٢

عند إضافة ملح عديد الالومونيوم إلى الماء يتحرر عدد من ايونات الهيدروجين يساوي (٣- x) أي أقل من عدد ايونات الهيدروجين التي تتحرر من الأملاح الحامضية.

$$Al(OH)_x A_{3-x} + (3-x)H_2 \leftrightarrow Al(OH)_3 + (3-x)H^+ + (3-x)Cl \quad (٢/٢٠)$$

القاعدية النسبية (%): تساوي النسبة المولية (OH/Al) ×١٠٠مقسومة على ٣ (انظر جدول ٢/٦).

٣- الومينات الصوديوم

يعد مركب الومينات الصوديوم من الكيماويات الشائعة المستخدمة في صناعة الورق وأحياناً يستخدم في معالجة المياه منخفضة القلوية. وتحول الخصائص الكيميائية لالومينات الصوديوم من أن يتم تداولها مثل الشَّبَّة والمروبات الأخرى. وعندما تضاف إلى الماء يترسب هيدروكسيد الالومونيوم وتزيد قلوية المياه.

$$AlO_2^- + 2H_2O \leftrightarrow Al(OH)_{3(s)} + OH^- \quad (٢/٢١)$$

يؤدى إضافة ١ مجم الومونيوم / لتر إلى زيادة قلوية المياه بحوالي ٠,٠٣٧ مللي مكافئ (كربونات كالسيوم) / لتر أو ١,٩ مجم (كربونات كالسيوم)/ لتر.

تخضع هذه المروبات لمواصفات قياسية محلية تحدد نسبة المادة الفعالة مثل أكسيد الالومنيوم في مروبات الالومونيوم أو أكسيد الحديد في مروبات الحديد.

عنصر الالومونيوم

عنصر الالومونيوم أكثر العناصر الفلزية شيوعًا في القشرة الأرضية (يمثل ٨,١ % بالوزن)، وهو يشكل العنصر الثالث من حيث الوفرة. ويتواجد فى مركبات السليكات المعقدة، ويرتبط الالومونيوم المتواجد في المياه الطبيعية بمركبات السليكات، وهذا نتيجة الذوبانية القليلة لمعادن الفلسبار. وتعمل عوامل التعرية على تحويل الفلسبارات إلى معدن الكاولين الذي يتفكك ليعطى السليكا وهيدروكسيد الالومونيوم.

يتواجد الالومونيوم في المياه الطبيعية على شكلين : أملاح ذائبة وجسيمات غروية معلقة[١٦،١٩]، وتجدر الإشارة الى أن أغلب الالومونيوم الذي يأتي مع المياه الخام يكون في صورة جسيمية ويمكن فصله بورق الترشيح ذي المقاس ٠,٤٥ ميكرون[٢٠]، ويصل تركيز الالومونيوم في المياه السطحية

إلى ٢,٥٧مجم / لتر[٢١]، وفي المناطق التي تكون فيها الأمطار حامضية فإن المياه السطحية التي لها قدرة تنظيمية منخفضة للرقم الهيدروجيني فتتراوح تركيزات الالومونيوم ما بين ٠,١ – ٠,٨ مجم / لتر.[٣]

وقد يتواجد الالومونيوم في المياه الأرضية بتركيز يصل إلى ٠,٠١٤ مجم / لتر (بدون معالجة بمركبات الالومونيوم).[٢١] ويرتبط تواجد الالومونيوم في المياه الطبيعية أو المعالجة بالخصائص الكيميائية للمياه : فمثلاً نجد أن ذوبانية هيدروكسيد الالومونيوم تكون أقل ما يمكن عند الرقم الهيدروجيني ٥,٧ ولكن نتيجة الخصائص الترددية لهذا العنصر، فإنه يذوب بشدة عند الرقم الهيدروجيني الأكثر من ٩,٠ نتيجة تكون مركبات الالومينات (AlO_2^-) في الوسط القلوي، كما انه يذوب بشدة عند الرقم الهيدروجيني المنخفض (أقل من ٥) انظر الأشكال (٢/١٣، ٢/١٤، ٢/١٦، ٢/١٧).

يتواجد الالومونيوم بصورة طبيعية في كل الأغذية تقريبًا وبعض العقاقير الطبية (جدول ٢/٧). ويبلغ متوسط ما يحصل علية الفرد من هذا العنصر حوالي ٢٠ مجم / يوم . ويشكل ما يتناوله الفرد يومياً من عنصر الالومونيوم من مياه الشرب أقل من ٥ % مما يتناوله من المصادر الأخرى.[٢١]

إن عمليات ذوبان الالومونيوم في المياه الطبيعية معقد للغاية، فالأيونات والمركبات الأخرى مثل الكبريتات والسليكا والمركبات الغروية والعسر يجب أن تؤخذ في الاعتبار لأنها تؤثر علي الحالة التي يتواجد عليها الالومونيوم.

وفى ضوء هذا المفهوم فإن للالومنيوم القدرة على أن يزيد من عدد التناسق وتكون روابط تساهمية وبالتالي تتكون مركبات معقدة مثل رابع كلوريد الالومونيوم وسادس كلوريد الالومونيوم.

جدول (٢/٧) مستويات الالومونيوم الذي تدخل الجسم يومياً

مصدر الألومونيوم	متوسط المتناول
١- المواد الغذائية[٢٢] - الأطعمة الجاهزة[٢٣] - الخبز الأبيض[٢٣] - الإضافات إلى الأغذية[٢٤] • سليكات الصديوم والالومنيوم • الجيلاتين • بودرة الخبز • الكريمة • فوسفات الالومنيوم • المستحلبات • الاغذية الطبيعية غير الجاهزة • الحبوب - المشروبات الغازية[٢٣] - القهوة - الشاي	٢٠ مجم الومنيوم/يوم
٢- العقاقير الطبية	٣٠ ٠٠ مجم الومنيوم/يوم[٢٥]
٣- أوعية الطهي	٣ مجم الومنيوم/يوم[٢٦]
٤- مياه الشرب (متوسط ٢ لتر في اليوم)	٠,١٦ مجم الومنيوم/يوم[٢٧-٢٩]

إن الربط بين تواجد الالومونيوم في الغذاء والاضطراب العصبي (مرض التزهايمر) هو ربط افتراضي.[٣٠] فقد كان الالومونيوم مدرجاً ضمن ٨٣ ملوث من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية (وثيقة مياه شرب آمنة)[٣١]، وقد قامت الوكالة بحذف الالومونيوم من هذه القائمة باعتباره من ضمن سبعة عناصر مسموح بتواجدها لعدم وجود دليل في ذلك الوقت (١٩٨٨)، وقد أدرجت وكالة حماية البيئة الأمريكية الالومونيوم ضمن البنود الثانوية للمواصفات القياسية لمياه الشرب الصادرة في عام ٢٠١١على اعتبار انه ليس للالومنيوم ضرر مؤكد على الصحة العامة[٣٢].

وقد حددت اللجنة المشتركة من منظمة الأغذية والزراعة[٣٣] (FAO) ومنظمة الصحة العالمية (WHO)[٣٤] القيمة الصحية لتركيز الالومونيوم ب ٠,٩ مجم /لتر، ونظرا إلى أن هذا الرقم يتجاوز المستويات العملية المبنية على أساس تحقيق المثالية لعملية الترويب، فقد حددت المنظمة الصحة العالمية القيمة ٠،٢ مجم /لتر للمحطات الصغرى و ٠,١ مجم /لتر للمحطات التقليدية، [٣٣] بينما حددت وكالة حماية البيئة الأمريكية حد أقصى ٠,٢ مجم / لتر. وماتزال الأبحاث مستمرة على تأثير الالومونيوم على صحة الإنسان.

وقد بني الحد الأقصى للألومونيوم المتبقي بالمياه المعالجة على أساس ضرورة تحقيق فعالية وتشغيل أمثل لعملية الترويب بمحطات المعالجة بالإضافة إلى تحقيق الخصائص الجمالية المطلوبة للمياه.

عنصر الحديد

عنصر الحديد من العناصر الأكثر شيوعًا في القشرة الأرضية، يتواجد في المياه العذبة بتركيزات تتراوح ما بين ٠,٠٠ حتى ٥٠ مجم/لتر اعتمادا على عوامل هامة مثل الأكسجين الذائب، وقلوية المياه، والرقم الهيدروجيني. وهذا العنصر من العناصر الهامة في غذاء الإنسان. فيتراوح ما يتناوله الفرد من هذا العنصر ما بين ١٠ الى ٥٠ مجم/يوم. وقد حددت منظمة الصحة العالمية حدا أقصى لما يتناوله الفرد يوميا بما لا يجاوز ٠,٨ مجم/ كيلوجرام من وزن الجسم، فيما عدا الأفراد الذين يحتاجون إلى نسب أكثر من هذا العنصر.

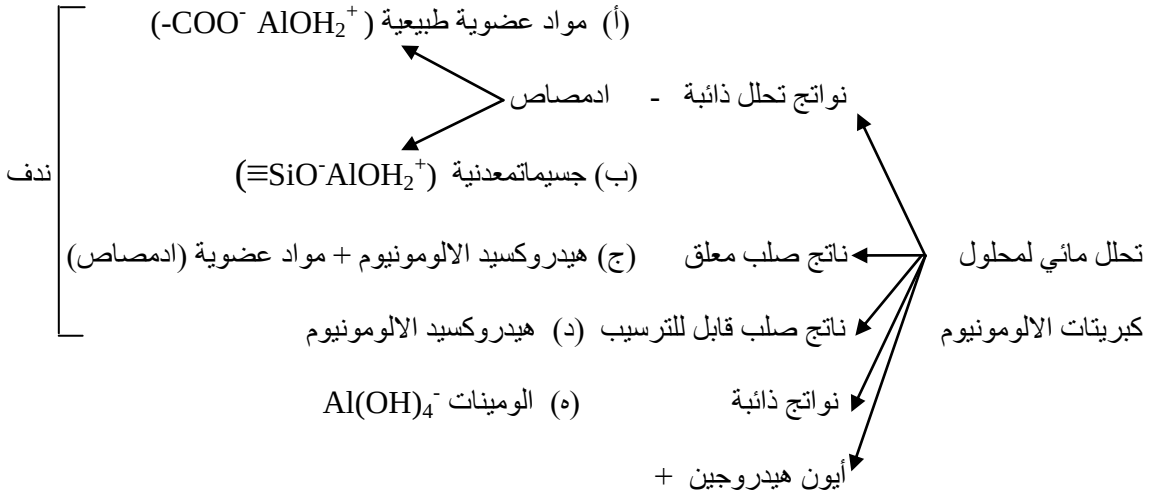
وتجدر الإشارة إلى أن عمليات المعالجة التقليدية لمياه الشرب تتخلص من الحديد عن طريق الأكسدة بفعل الأكسجين الذائب في الماء وبفعل الكلور، ثم الترسيب والترشيح.

تستخدم بعض مركبات الحديد كمروبات لإزالة الشوائب من المياه. ومن أمثلة تلك المركبات:-

كلوريد الحديديك – كبريتات الحديدوز – كبريتات الحديديك

ومن الضروري الاهتمام بعملية الترشيح لتحقيق أقصى إزالة للجسيمات العالقة (العكارة) والحفاظ على الرقم الهيدروجيني المناسب الذي يحقق أقل ذوبانية للالومنيوم. [٣٦،٣٥] وتجدر الإشارة الى أنه تحت ظروف التشغيل الجيد فان تركيز الالومونيوم المتبقي سوف يقل عن ٠,١ مجم/لتر في المحطات التقليدية بينما يقل تركيز الالومونيوم المتبقي عن ٠,٢ مجم/لتر بالمحطات غير التقليدية التي قد لا تتحقق فيها الفترة الزمنية الكافية للترويب والترسيب والترشيح.

آليات التفاعل بين المروب والشوائب



بيكربونات (القلوية)← حامض كربونيك ← ثاني أكسيد الكربون ← تنخفض القلوية وينخفض الرقم الهيدروجيني

$$H^+ + HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H_2O + CO_2\uparrow$$

شكل (٢/٢١) المسارات التي تسلكها نواتج التحلل المائي للمروب المضاف إلى المياه المحتوية على معلق ومواد عضوية.

يوضح الشكل (٢/٢١) المسارات التي قد تسلكها نواتج التحلل المائي للمروب عندما يضاف الى المياه المحتوية على جسيمات أو مواد عضوية طبيعية. وإذا كانت الجرعة المضافة كافية والظروف الكيميائية والفيزيائية مناسبة، فان نواتج التحلل المائي تعمل على تكوين تجمعات للجسيمات (ندف). ويمكن توضيح آليات التفاعل بين المروب والشوائب على النحو الآتي:

أولاً: آلية التحلل المائي للمروب يعقبه الإدمصاص للشوائب

تتفاعل نواتج التحلل المائي للمروب مع مواقع الترابط الموجودة على أسطح جسيمات الملوثات سواء أكانت معدنية أو كائنات دقيقة أو غيرهم، وقد تشتمل هذه المرحلة على نواتج تحلل ذائبة تقوم بالترابط مع مواقع معينة على المركبات العضوية الطبيعية الذائبة[٣٧]، وهذا النوع من الترابط غير مؤثر فى إزالة المواد العضوية بواسطة المروبات الفلزية المنحلة بالماء، بينما تعتبر آلية الإدمصاص للمواد العضوية الطبيعية على أسطح الراسب الناتج من التحلل المائي للمروب هي المتحكمة في تلك الإزالة تحت كل الظروف.[٣٨، ٣٩]

إذا كانت مواقع الترابط على أسطح الشوائب كبيرة نسبياً بالمقارنة بنواتج التحلل المائي للمروب (الجرعة)، وكان هناك ميل للشوائب تجاه تلك النواتج؛ فحينئذ سوف تتفاعل كل نواتج تحلل المروب مع أسطح الشوائب، ويسلك هذا المسلك نواتج التحلل المائي للمروب غير القابلة لتكوين راسب.

في الحالة التي تكون فيها الجسيمات الموجودة سالبة الشحنة؛ مثل الطفلة والغرين والكائنات الدقيقة؛ فإن نواتج التحلل المائي موجبة الشحنة ترتبط بتلك الشوائب من خلال التعادل لتلك الشحنات السطحية للجسيمات، ويحدث للمعلق أو العكارة حالة من عدم الثبات أي تتروب وتصبح متجمعة وقابلة للترسب وهذا ما يطلق عليه الترويب بتعادل الشحنة.

فمثلا: إذا كانت الجسيمات التي تمثل العكارة سالبة الشحنة مثل السليكا ذات الرمز ($\equiv SiO^-$) فيحدث تفاعل ادمصاصي مع المروب على النحو الآتي:-

$$Al^{3+} + \equiv SiO^- \rightarrow [\equiv SiO^- Al(OH)_2^+] + H^+ \qquad (٢/٢٢)$$

يحدث فى هذا التفاعل ادمصاص لجسيمات السليكا على أسطح نواتج التحلل المائي للمروب، وينتج عن ذلك الترابط أن تصبح الشحنة الكلية = +١، ومع المعالجة باستخدام مروب الألومونيوم، ومع حدوث تساوي بين أعداد جسيمات السليكا سالبة الشحنة ($\equiv SiO^-$) والمواقع الجديدة موجبة الشحنة $[Al(OH)_2^+]$ فيحدث تعادل وتكون الشحنة المحصلة السطحية = صفر $[\equiv SiO\ Al(OH)_2]$ ، وتبعًا لمبادئ ثباتية الغرويات التي نوقشت من قبل فإن جسيمات السليكا الموجودة فى المعلق سوف تتروب بميكانزمية تعادل الشحنة السطحية.

فى أنظمة الترشيح المباشر التي لا تتطلب أن يكون فيها ندف كبيرة الحجم قابلة للترسيب؛ فإن الهدف من إضافة المروب هو تحقيق التعادل من خلال جرعة تكافئ بالضبط الشحنات السالبة للشوائب. أي تتناسب كمية الشحنة الموجبة المطلوبة لمعادلة الشحنة السالبة مع كثافة الجسيمات العالقة بالماء والمسببة للعكارة، وهناك عوامل أخرى تؤثر على هذه الآلية؛ مثل الرقم الهيدروجينى للمياه ووجود ايونات كاتيونية أو أنيونية بها؛ حيث تتنافس هذه العوامل مع نواتج التحلل المائي للمروب في معادلة شحنات الشوائب.

عندما يستخدم الترويب لإزالة العكارة أو الملوثات الأخرى عن طريق معادلة الشحنات في حالة وجود معلق مخفف، فيكون معدل التجميع للشوائب أقل من المعدل الذي يتم الحصول عليه عندما يكون هناك راسب حجمي كبير ناتج عن المروب.

يبدأ راسب هيدروكسيد الفلز ونواتج أخرى ذائبة ناتجة عن التحلل المائي للمروب في التكوين بعد استيفاء الجرعة التي حددت المسار أ و ب شكل (٢/٢١)، ويعتمد تحقيق مسار معين للترويب على الميل النسبي لنواتج التحلل المائي تجاه مواقع الارتباط للشوائب الموجودة القادرة على الترابط مع المروب وتركيز تلك الشوائب، فعندما تكون كمية المواقع الموجودة على أسطح الشوائب التي ترتبط بنواتج التحلل المائي للمروب منخفضة نسبيًا؛ فان التفاعل بين مواقع الارتباط وتكوين راسب هيدروكسيد الفلز يحدثان في نفس الوقت[٣٨]. وتؤثر نوعية وكثافة الخلط للمروب مع الماء على مسار عملية الترويب الذي يتحقق. [٤٠،٤١]

ثانياً: آلية التحلل المائي للمروب يعقبه تكوين معلق غير قابل للترسيب

عندما يبدأ راسب هيدروكسيد الألومونيوم أو هيدروكسيد الحديديك الحديديك في التكوين فى وجود مواد عضوية طبيعية، فإن الجزء من المواد العضوية الكاره للماء والذي له وزن جزيئي كبير يميل إلى الإدمصاص على الجسيمات الغروية لهيدروكسيد الفلز دقيقة التبلور ويغلفها (المسار ج) وإذا احتوت الماء على مواد عضوية قابلة للادمصاص؛ ففي هذه الحالة سيكون هناك احتياج لجرعة عالية من المروب، وعندما تكون كثافة المواد العضوية المدمصة عالية نسبيًا؛ فان الجسيمات دقيقة التبلور تصبح سالبة الشحنة السطحية وتبقى في حالة ثبات ومشتتة في الماء ومعلقة وغير قابلة للترسيب بسبب نشؤ حالة ثبات جديدة [٤٢-٤٤].

ومع زيادة تركيز جرعة المروب المضافة؛ فان تركيز مساحة السطح للبلورات دقيقة الحجم تزيد وكمية المواد العضوية المدمصة لوحدة المساحة للجسيم تقل، وفى حقيقة الأمر فعند الجرعات العالية من المروب لا يكون هناك مواد عضوية كافية على الأسطح لمعادلة الشحنة الموجبة الناشئة عن المروب، وتصبح الجسيمات أو العكارة فى حالة من عدم الاستقرار مكونة ندف تتألف من راسب هيدروكسيد الفلز ومعه بعض المواد العضوية التي حدث لها ادمصاص على أسطح هذا الراسب، وللوصول الى هذه النقطة فان جرعة المروب المطلوبة تتناسب مع التركيز الاولي للمواد العضوية بالماء المعالج.

ثالثاً: آلية التحليل المائي للمروب يعقبه الترويب بالكنس

- عند إضافة جرعة من المروب تزيد عن الاحتياج الفعلي فيحدث أن يتكون راسب غير ثابت يؤدى إلى تكوين ندف سريعة النمو، يطلق على هذه الآلية اسم الترويب بالكنس، فى كثير من الأحيان يزيد معدل تجميع الشوائب ليكون متناسباً مع التركيز ألحجمي للراسب في المعلق. يتطلب هذا النوع من التخثير التفاعل بين جسيمات راسب هيدروكسيد الألومونيوم مع بعضها بعضًا لتنمو ويزداد حجمها مع الادمصاص والالتصاق بجسيمات الشوائب، كما يحدث أثناء هذه الآلية ادمصاص للمواد العضوية الطبيعية على أسطح راسب هيدروكسيد الفلز.

- قد يحدث عند الرقم الهيدروجيني المنخفض أقل من ٦,٥ أن يصبح الراسب دقيق التبلور ثابتًا ومشتتًا وغير قابل للترسيب نتيجة شحنته الموجبة العالية. وعندما يحدث انعكاس للشحنة، فإن إزالة الجسيمات الغروية بآليات فصل الندف (مثل: الترسيب، التعويم أو الترشيح) تكون غير ممكنة.
- تؤثر الأيونات عديدة الشحنة مثل الكبريتات والفوسفات والمواد العضوية الطبيعية على آلية عملية التخثير، فهذه المكونات تميل إلى الإدمصاص على أسطح هيدروكسيد الفلز، مما يعمل على الإقلال من الشحنة الإجمالية[٤٥] وتسبب عدم ثبات هذا الراسب المعلق أي يكون قابلاً للترسيب والانفصال عن السائل وتحت هذا التأثير الإيجابي فإنه عندما تعالج المياه المحتوية على أنيونات عديدة الشحنة أو إذا أضيفت إلى الماء الذي يعالج عن طريق المروب المستخدم (مثل: الكبريتات من كبريتات الألومونيوم)، فحينئذ يكون تكوينًا معلقًا غير قابل للترسيب عند رقم هيدروجيني منخفض غير قابل الحدوث.
- عند معالجة مياه ذات رقم هيدروجيني منخفض نسبياً، فيحدث إزالة لحالة ثبات الشوائب المعلقة والترسيب عند جرعة مروب منخفضة نسبيا[٤٦،٤٧] ، وفي حالة زيادة جرعة المروب يستعيد المعلق الغروي حالة الاستقرار والثبات بدلاً من أن يتروب ويترسب بسبب الشحنة الموجبة العالية لنواتج التحلل المائي للمروب التي تدمص على أسطح الراسب المعلق وبالتالي تنعكس شحنة الجسيمات لتصبح موجبة وتكون غير قابلة للترسيب. وكما هو معلوم فإن عملية الترويب تبدأ بمعادلة الشحنة ثم الترسيب الذي يحدث بعد أن يزيد تركيز هيدروكسيد الفلز عن حد حاصل الإذابة.

رابعًا :تكوُّن نواتج تحلل مائي ذائبة للمروب

يعتمد تكوُّن راسب أثناء عملية الترويب على الرقم الهيدروجيني النهائي للمياه التي تعالج بالإضافة إلى زمن التفاعل ودرجة الحرارة ... ألخ.

فإذا كان الرقم الهيدروجيني النهائي يقترب من الرقم الذي يحقق أقل ذوبانية لراسب هيدروكسيد الفلز، ففي هذه الحالة تكون كمية الراسب عند أكبر قيمة لها، وتكون كمية أيون الفلز الذائب المتبقي في الماء أقل ما يمكن.

بالنسبة لعنصر الألومونيوم فإن الرقم الهيدروجيني الذي يحقق أقل ذوبانية لهيدروكسيد هذا الفلز في حدود ٦ تقريبًا، أما بالنسبة لهيدروكسيد الحديديك فهو في حدود ٨ تقريبًا (شكل ١٣- ٢/١٥).

تتحكم الخصائص التالية في الرقم الهيدروجيني النهائي للمياه:

- قلوية المياه الخام.
- الرقم الهيدروجيني للمياه الخام.
- جرعة المروب المستخدم الذي يضيف أيون الهيدروجين يتفاعل مع القلوية.
- الحامضية الفعالة للمروب المستخدم.

تأثير الرقم الهيدروجيني على آلية إزالة لون المياه الناشئ عن المواد الدبالية

تعتمد إزالة اللون على خاصية الادمصاص، ويُعرف الإدمصاص بأنه تراكم المادة العضوية على السطح الفاصل بين حالتين الحالة الصلبة والحالة السائلة أو الحالة الصلبة والحالة الغازية. ويطلق على المادة التي حدث لها ادمصاص أو تراكم على السطح بالمادة المُدمَصة، بينما يطلق على المادة التي تقوم بالادمصاص بالمادة الدامصة. ومن أهم المواد التي تقوم بالادمصاص: الكربون المنشط وراتنجات التبادل الأيوني وأكاسيد الفلزات وهيدروكسيدات الفلزات وكربونات الفلزات والالومينا المنشطة والطفلة والزيوليت.

يلعب الادمصاص دورًا مهمًّا في تحسين نوعية المياه، حيث تستخدم المركبات سالفة الذكر في التخلص من المواد العضوية التي تسبب اللون والطعم والرائحة للمياه. وأثناء عملية المعالجة للمياه بالتخثير بأملاح الألومونيوم أو الحديد يتكون هيدروكسيد الالومونيوم أو هيدروكسيد الحديديك اللذان يقومان بادمصاص الجزيئات المسببة للون والطعم والرائحة، وقد تتفاعل المركبات المسببة للون والطعم مع الكلور المستخدم لتطهير المياه مسببة تكوُّن مركبات جديدة خطرة مثل الهالوميثان الثلاثية.

أولاً: عند التركيزات المنخفضة من اللون (أي ≥ ١٠٠ بلاتين كوبالت) أو ما يعادل ٤ حجم كربون/ لتر) هناك آليتين لإزالة اللون هما:

١- فى المدى من الرقم الهيدروجيني ٦- ٨ تحدث إزالة للأحماض الدبالية عن طريق الادمصاص على راسب هيدروكسيد الالومونيوم.

٢- أما في المدى من ٤- ٥,٥ فإن الأحماض الدبالية تترسب بآلية معادلة الشحنات ويتكون راسب فولفات الالومونيوم.

ثانيا: عند التركيزات العالية من اللون (أي > ٤٥٠ بلاتين- كوبالت) فإن إزالة اللون تخضع للأوزان الجزئية للأحماض الدبالية، فالأوزان الجزئية العالية (الأكبر من ٥٠٠٠٠) يتم التخلص منها بآليات الترويب سالفة الذكر، أما الأوزان الجزئية المنخفضة فلا تتم بنفس كفاءة، الأوزان العالية.

(عادة ما يتم إزالة اللون عند رقم هيدروجيني أقل نسبيًّا من الذي تتم عنده إزالة العكارة)

"يعتبر المدى من الرقم الهيدروجيني ٤,٥ – ٥,٥ هو أفضل مدى لإزالة اللون الناشئ عن المواد الدبالية بواسطة مروب الحديديك".

"ويعتبر المدى من الرقم الهيدروجيني ٥- ٦ أفضل مدى لإزالة اللون الناشئ عن المواد الدبالية بواسطة مروب ألومونيوم".

وكما أوضحنا من قبل؛ فإن الرقم الهيدروجيني عاملاً مهما في إزالة المواد العضوية الدبالية، كما أنه يحكم آلية الإزالة، فعند مدى الرقم الهيدروجيني ٥- ٧ يتم التخلص من تلك المواد بالترسيب والادمصاصً معًا، أما عند الرقم الهيدروجيني > ٧ فتتم الإزالة بالادمصاص على سطح راسب هيدروكسيد الالومونيوم.

بينما عند الرقم الهيدروجيني ≥ ٥ فيحدث ترسيب مباشر للمواد العضوية بواسطة مروب الألومونيوم الذائب.

تتغير جرعة المروب المطلوبة لإزالة المواد العضوية، فتكون أقل ما يمكن عند رقم هيدروجيني ٥، وتزيد الكمية بطبيعة الحال مع زيادة تركيز المواد العضوية. كما تختلف الجرعة أيضاً تبعاً لنوع المروب المستخدم.

وعندما يكون الكربون العضوي الذائب منخفضًا؛ فتكون الجرعة المستخدمة من المروب منخفضة كذلك طبقاً لعلاقة التناسب والاتزان الكيميائي.

عند معالجة مياه تحتوي على نسبة عالية من الكربون العضوي الكلى يتكون راسب حجمي كبير من فولفات الألومونيوم، نتيجة استخدام جرعات عالية من المروب، ومن ثم لا يتلاءم الترشيح المباشر كآلية لفصل الرواسب نتيجة الحمأة الكثيفة المتكونة داخل وحدة الترشيح.

تعمل مروبات الألومونيوم ومروبات الحديد على الأقلال النسبي للمواد العضوية مقدرة ككربون عضوي كلى، وبالتالي يعمل هذا على الإقلال من تكون مركبات تراي هالوميثان التي تنتج من تفاعل الكلور مع المواد العضوية الذائبة أثناء عملية تطهر المياه. (هذا على اعتبار أن عملية الترويب تسبق عملية التطهير)، أما في حالة إجراء التطهير الأولى للتخلص من الكائنات الدقيقة ثم يليها الترويب والترسيب فلا بُد من إتباع استراتيجيات للحد من المركبات العضوية المكلورة.

تفسير نتائج عملية الترويب

أن ما يحدث من تفاعلات ومسارات تسلكها نواتج التحلل المائي للمروب أثناء عملية الترويب، هي التي تحدد أداء وكفاءة المروب المستخدم، وهناك عناصر مفتاحية تحكم أداء المروب هي:-

- قلوية المياه الخام
- نوع المروب المستخدم وجرعته
- الرقم الهيدروجيني للمياه الخام.
- المواد العضوية الطبيعية المتواجدة بالمياه الخام (الكربون العضوي الكلي).
- تركيز المواد الصلبة العالقة بالمياه الخام (العكارة).
- نواتج التحلل الماء للمروب، وخصائص راسب هيدروكسيد الفلز من حيث: الذوبانية والقدرة على الادمصاص.

هذه العوامل المذكورة تجعل من الصعوبة بمكان التنبؤ بدقة بأداء المروب نحو مياه خام معينة، ومع ذلك فإن استخدام المحاكاة العملية لعملية الترويب باستخدام "اختبار الجار" تتيح فهم العملية من الناحية الكيفية والتعرف على الآليات التي تحكم الأداء مما يساعد على تشغيل مناسب لكل نوعية من المياه الخام مع المروب.

تتمثل هذه المحاكاة في استخدام "اختبار الجار" وهذا الاختبار يسمح بمدى واسع من الظروف التى يمكن تحقيقها، ومن خلال الأمثلة التي سوف نسوقها، يتضح أنه يمكن تفسير ظواهر الترويب المختلفة.

اختبار الجار

تؤثر العديد من المتغيرات على عملية الترويب وعلى الخصائص الكيميائية والفيزيائية للجسيمات المروبة الناتجة، ويمكن تحديد الجرعات المثالية من المروبات اللازمة لمعالجة نوعية معينة من المياه بطريقة بسيطة يطلق عليها "اختبار الجار".

هذا الاختبار يحاكى عملية الترويب والترسيب بطريقة معملية ومن خلال هذا الاختبار يمكن تحديد كفاءة عملية الترويب عقب إضافة المادة المروبة والترسيب فى أوعية معملية وذلك من خلال إجراء القياسات الآتية:-

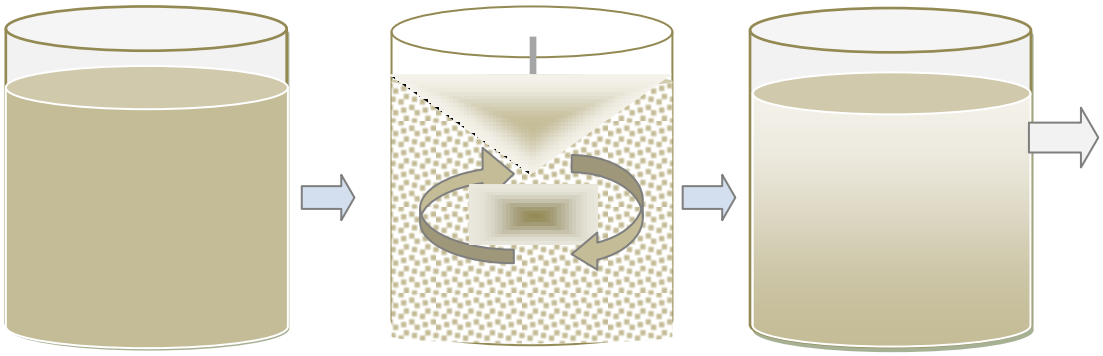
- العكارة المتبقية
- نوعية المياه المنتجة بعد الترسيب.

ويعتبر هذا الاختبار اختبارًا عالميًّا متفقًا عليه[٤٨-٥١]، وهو يستخدم كوسيلة لتقييم عملية الترويب، ويمكن من خلال نتائجه تحقيق الظروف المثالية لتشغيل عمليات معالجة المياه القائمة وفى أعمال التطوير أو وضع المعايير التصميمية للمحطات الجديدة أو في أعمال زيادة الطاقة الإنتاجية للمحطات الحالية. ويمكن إيجاز فوائد هذا الاختبار في النقاط الآتية:-

١- اختيار المروب المناسب للمعالجة.
٢- تقدير الجرعات المثالية اللازمة لإزالة العكارة وأكبر قدر من المواد العضوية.
٣- تحديد الرقم الهيدروجيني المناسب لإجراء الترويب.
٤- تقدير كميات المواد الكيميائية المطلوب إضافتها لضبط الرقم الهيدروجيني وذلك عندما تكون هناك حاجة لضبط الرقم الهيدروجيني بإضافة حامض أو قلوي.
٥- تحقيق المثالية في عملية خلط المروب مع الماء.
٦- تحديد الوقت المثالي للخلط السريع والبطئ.
٧- تحديد التركيز المناسب من محلول المروب.

جهاز اختبار الجار

يتكون هذا الجهاز من ستة أوعية قياسية من البلاستيك أو من الزجاج قد تكون دائرية المقطع أو مربعة، مزود فوق كل وعاء وحدة خلط ذات أزرع تقليب قياسية، قد يكون حجم الوعاء لترًا أو لترين مزود بصنبور يعلو القاع بحوالي ١٠سم أو سيفون لسحب العينة بعد الترسيب.



شكل (٢/٢٢) مراحل اختبار الجار (خلط سريع – خلط بطيء – ترسيب)

يشتمل الاختبار النموذجي على الخطوات الآتية:-

١- تقدير الجرعات من المروب

- نحضر محلول مخفف من مروب الشبة على النحو التالي:-
- نزن ١ جرام من الشبة الصلبة أو ٢ جرام من محلول الشبة السائلة باستخدام ميزان حساس ثم نضع الوزن في قارورة قياسية سعتها ١٠٠ ملليلتر، ونذيبهم في قليل من ماء الصنبور، وبعد تمام الذوبان نكمل بالماء الى العلامة.

١٠٠ ملل (المحلول المحضر) يحتوي على ١٠٠٠ مجم شبة صلبة أو ٢٠٠٠ مجم محلول **الشَّبَّة** السائلة أي أن:

١ ملل من المحلول يحتوي على ١٠ مجم شبة صلبة أو ٢٠ مجم من محلول **الشَّبَّة** السائلة

وتكون الجرعات كما في الجدول التالي:-

جدول (٢/٨) حساب جرعات مروب **الشَّبَّة** الصلبة وما يكافئها من محلول **الشَّبَّة** السائلة

المروب	الجرعة (مجم/لتر)					
	كأس (١)	كأس (٢)	كأس (٣)	كأس (٤)	كأس (٥)	كأس (٦)
	٠,٥ ملل	١,٠ ملل	١,٥ ملل	٢,٠ ملل	٢,٥ ملل	٣,٠ ملل
شبة صلبة	٥	١٠	١٥	٢٠	٢٥	٣٠
شبة سائلة	١٠	٢٠	٣٠	٤٠	٥٠	٦٠

ملحوظة: تركيز **الشَّبَّة** السائلة يعادل ٥٠ % تقريبا من الشبة الصلبة (راجع المواصفة القياسية لكليهما)

٢- الخلط السريع للمياه مع المروب

فى هذه الخطوة يتم إضافة جرعات مختلفة متزايدة من المروب إلى الأوعية الستة المحتوية على المياه الخام الممثلة لنوعية مياه المصدر، وتجري الإضافة لمحلول المروب باستخدام سرنجات في كل وعاء بالقرب من محور التقليب.

يجرى التقليب السريع عقب الإضافة للمروب مباشرة لمدة تتراوح ما بين ٣٠ ثانية إلى ٦٠ ثانية بسرعة تقليب ١٠٠ لفة/ دقيقة.

يعتمد تحديد سرعة التقليب على مدى تحقيق مثل تلك السرعة فى المحطة.

٣- الخلط البطئ

بعد الانتهاء من الخلط السريع يتم ضبط سرعة الخلط لتكون في المدى من ٢٥- ٣٥ لفة/دقيقة لمدة تتراوح من ١٥ إلى ٢٠ دقيقة.

٤- الترسيب

وبعد الانتهاء من مرحلة الخلط البطئ، يتم إيقاف محرك الخلط وتترك الأوعية بدون أي نوع من التحريك لمدة زمنية من ٣٠- ٤٥ دقيقة.

٥- إجراء القياسات

لا بُد من سحب عينات من المياه الرائقة المتواجدة أسفل سطح الماء فى كل وعاء، ويتم هذا من خلال الصنبور أو من خلال السيفون مع مراعاة عدم إحداث أى اضطراب للمياه، ثم تجرى القياسات الآتية:-

- العكارة.
- الرقم الهيدروجيني.
- قلوية المياه.
- العد الطحلبي .
- الكربون العضوي الكلى.

يمكن إجراء العديد من القياسات حسب الهدف من إجراء هذا الاختبار؛ فإذا كان الهدف من الاختبار تقدير الجرعة المثالية لتحقيق مياه صافية عديمة اللون فيكتفى بقياس العكارة واللون والمحتوى من المواد العضوية. وتتحدد الجرعة المثالية بأنها اقل جرعة حققت أقل عكارة منشودة وأقل لون ممكن وأيضاً أقل ألومونيوم متبقي مستهدف.

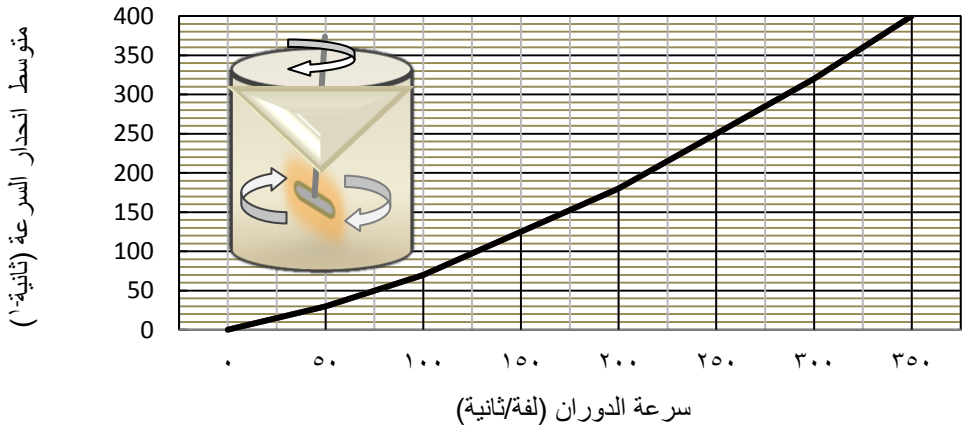
ومن خلال تجربة الجار؛ يمكن تقدير الطاقات المختلفة للتقليب السريع والبطئ بالمحطة لضبط "متوسط انحدار السرعة" Mean velocity gradient (G) للوصول إلى ترويب وتجميع مثالي.

ويمكن حساب متوسط انحدار السرعة من خلال العلاقات (٢/٣٠ - ٢/٣٢)، وهناك علاقة تربط بين سرعة دوران محرك التقليب (لفة/ثانية) ومتوسط تدرج السرعة (ثانية$^{-1}$)، وتختلف قيم انحدار السرعة تبعًا لحجم وشكل وعاء الترويب ودرجة حرارة الماء اثناء اجراء القياسات. يزداد متوسط انحدار السرعة مع العوامل التالية:-

- زيادة سرعة التدوير للماء.
- وجود حواجز أو عوارض التهدئة
- ارتفاع درجة الحرارة الماء ويرجع ذلك الى ارتباط السرعة بلزوجة الماء.

ومن خلال الحسابات والقياسات أمكن رسم علاقة بين متوسط انحدار السرعة وسرعة دوران محرك التقليب كما الشكل (٢/٢٣). هذا الشكل الاسترشادي يمكن رسمه لكل جهاز "جار" ولكل وحدة تقليب سريع وبطيء.[٥٢]

وتجدر الإشارة الى الشكل البياني للعلاقة يوضح أن العلاقة طردية ولكنها ليست علاقة خط مستقيم والواضح أن زيادة سرعة الدوران تؤدي الى زيادة في قيم متوسط انحدار السرعة.



شكل (٢/٢٣) منحنى انحدار السرعة لمياه أثناء اختبار "الجار" عند سرعات دوران مختلفة

بالإضافة إلى القياسات الروتينية السابقة فهناك خصائص أخرى يمكن قياسها مثل: الحركة الكهروفورية وجهد الزيتا.

ويتم تقييم نتائج اختبار الجار للوقوف على الجرعة الاقتصادية التي تحقق الجودة المطلوبة للماء المعالج في مرحلة الترويق (الترويب والترسيب) من حيت: العكارة المتبقية – الألومونيوم المتبقي - والمواد العضوية الكلية.

فإذا كانت الجرعة الاقتصادية المثالية = ٢٥ مجم/لتر كشَّبَّة صلبة أي ٢٥ جرام/متر مكعب

= ٥٠ مجم/لتر كشَّبَّة سائلة أي ٥٠ جرام/متر مكعب

ويمكننا تحويل الكتلة الى حجم كما يلي:-

الجرعة المطلوبة من الشَّبَّة السائلة بالحجم = ٥٠ ÷ ١,٣٢ = ٣٧,٩ ملل/متر مكعب، حيث أن ١,٣٢ جم/ ملل تقريبا هي كثافة الشَّبَّة السائلة.

حساب تصريف طلمبة إضافة محلول الشَّبَّة المخفف

يتم حساب تصريف الطلمبة من خلال المعلومات التالية:

- تركيز محلول الشَّبَّة المخفف = ١٠% كشَّبَّة صلبة أو ٢٠% كشَّبَّة سائلة.
- جرعة الشَّبَّة المستقاة من اختبار الجار ولتكن ٢٥ مجم شَّبَّة صلبة /لتر ماء أو ٥٠ مجم شَّبَّة سائلة /لتر ماء.
- نفترض أن تصرف المحطة = ٢٠٠٠٠ م٣/يوم = ٨٣٣ م٣/ساعة

$$\text{تصريف طلمبة إضافة محلول الشَّبَّة} = \frac{\text{تصريف المحطة (م٣/ساعة)} \times \text{جرعة الشبة (جرام/م٣)}}{\text{تركيز محلول الشبة (جرام/١٠٠ملل)} \times ١٠٠٠}$$

$$\text{تصريف طلمبة إضافة محلول الشَّبَّة (١٠ % شبة صلبة)} = \frac{٨٣٣ \text{ م٣/ساعة} \times ٢٥ \text{ جرام/م٣} \times ١٠٠ \text{ ملل}}{١٠ \text{ جرام} \times ١٠٠٠}$$

= ٢٠٨ لتر/ساعة

$$\text{تصريف طلمبة اضافة محلول الشَّبَّة (٢٠ % شَّبَّة سائلة)} = \frac{٨٣٣ \text{ (م٣/ساعة)} \times (٥٠ \text{ جرام/م٣}) \times ١٠٠ \text{ ملل}}{\text{تركيز محلول الشَّبَّة الشبة (٢٠ جرام} \times ١٠٠٠)}$$

= ٢٠٨ لتر/ساعة

منحنيات توضيحية للترويب باستخدام كبريتات الألومونيوم

مثال لمياه خام ذات قلوية ١٧٥ مجم/لتر، وذات رقم هيدروجيني ٨,٢، وتحتوى على مواد عضوية طبيعية ٥ مجم كربون/لتر، ولها امتصاص نوعى للأشعة فوق البنفسجية عالي.

توضح الأشكال (٢٤-٢/٢٧) تأثير جرعة مروب كبريتات الالومونيوم على تركيز الكربون العضوي، والعكارة، والألومونيوم الذائب والرقم الهيدروجيني للمياه المعالجة.

أولا: تأثير جرعة المروب على الكربون العضوي الكلي والعكارة

١- عند الجرعات المنخفضة أقل من ١٠مجم كبريتات ألومونيوم/لتر (٠,٩ مجم الومونيوم/لتر)، نلاحظ انه ليس هناك تأثير على إزالة الكربون العضوي والعكارة (شكل ٢/٢٤، ٢/٢٥)، كما نلاحظ أنه عند جرعات أقل من ٥ مجم/لتر (٠,٤٥ مجم ألومونيوم/لتر) لا تتكون أي جسيمات قابلة للترسيب (جسيمات هيدروكسيد ألومونيوم) هذا يرجع إلى أن تركيز هيدروكسيد الالومونيوم لم يصل إلى الحد الذي يجعله يترسب (حد حاصل الإذابة). ويترتب على ذلك أن يكون تركيز الالومونيوم الذائب في الرشيح متساويًا لكمية الالومونيوم المضافة (على الرغم من صغر كميته).

٢- عند الجرعات من ٥ – ١٠ مجم/لتر (٠,٤٥ – ٠,٩ مجم ألومونيوم/لتر)، نلاحظ أنه تكونت جسيمات من هيدروكسيد الالومونيوم نتيجة زيادة التركيز الذي تعدى حاصل الإذابة، وهذا الراسب الذي تكون هو عبارة عن معلق غروي يتألف من جسيمات بلورية دقيقة من هيدروكسيد الالومونيوم تتغلف بغلاف من المواد العضوية الطبيعية سالبة الشحنة، ونظرًا إلى أن هذه الجسيمات الغروية غير قابلة للترسيب نتيجة نشوء حالة من الثبات لتلك الجسيمات فى الماء، فنلاحظ أن عكارة المياه قد زادت (شكل ٢/٢٥) ولا تحدث إزالة ملحوظة للكربون العضوي (شكل ٢/٢٤) كما نرى أن تركيز الالومونيوم (ذائب + معلق) يتساوى مع الجرعة المضافة من الالومونيوم، ثم ينخفض بعد ذلك الالومونيوم الذائب (شكل ٢/٢٦).

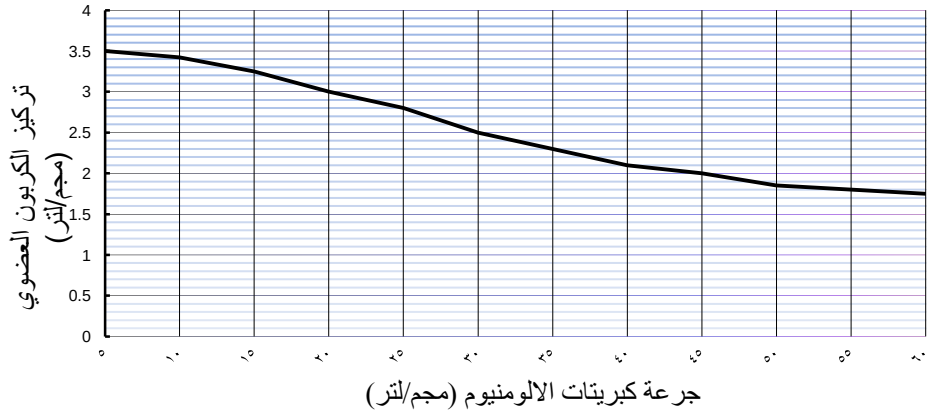
٣- عند جرعات من ١٠ مجم/لتر كبريتات الومونيوم فأكثر (٠,٩ مجم الومونيوم/لتر فأكثر)، يزيد تركيز مساحة الأسطح لبلورات هيدروكسيد الالومونيوم ويحدث ادمصاص أو التصاق للمواد العضوية الموجودة في الماء بهذه البلورات، ونظرًا لكون كمية تلك البلورات عالية مقارنة بالمواد العضوية وبالتالي لا يحدث لها تشتيت أو ثبات في السائل وتبدأ في الترويب والتجميع وتكوِّن ندفًا قابلة للترسيب، وعند حدوث هذه الحالة يقل تركيز الكربون العضوي (شكل ٢/٢٤) وتقل العكارة (شكل ٢/٢٥)، ويقل تركيز الالومونيوم الكلى المتبقي.

إذا كانت المواد العضوية الطبيعية الموجودة في الماء ذات وزن جزيئي عالٍ وكانت من النوعية الكارهة للماء، وذات ميل قوى للالتصاق على جسيمات هيدروكسيد الالومونيوم فيحدث هبوط فجائي وبشكل حاد لتركيز المواد العضوية (الكربون العضوي الكلى). أما إذا كانت تلك المواد العصوية الطبيعية مكونة من مجموعات ذات أوزان جزيئية مختلفة ولها ميول مختلفة نحو الالتصاق أو الإدمصاص على جسيمات هيدروكسيد الالومونيوم؛ فيحدث أن يكون الإدمصاص تدريجيًّا أو متفاوتًا.

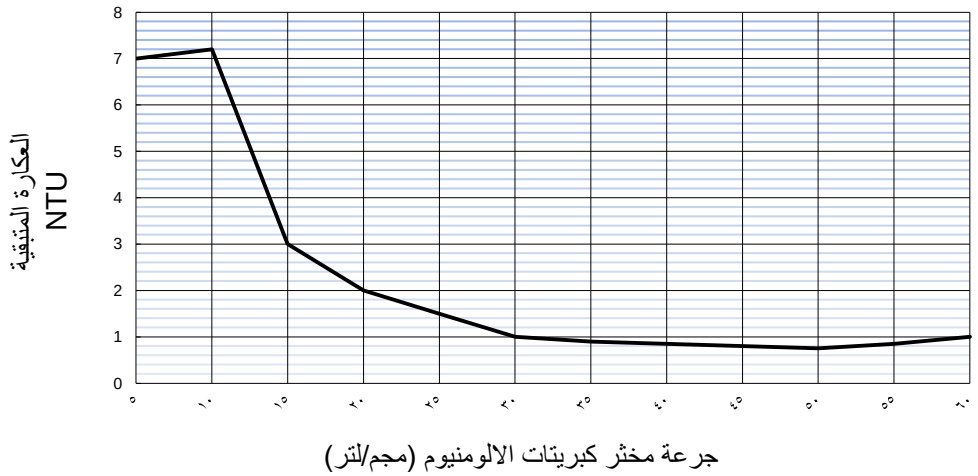
في هذا المثال الذي ذكر؛ نلاحظ أن الجرعة التي حققت إزالة عالية للكربون العضوي تناسبت مع كمية الكربون العضوي بالمياه الخام (الجرعة ١٠مجم كبريتات الومونيوم/لتر = ٠,٩مجم ألومونيوم / لتر).

ثانيا: تأثر الرقم الهيدروجيني للمياه بجرعة المروب وتأثير ذلك على الالومونيوم المتبقي

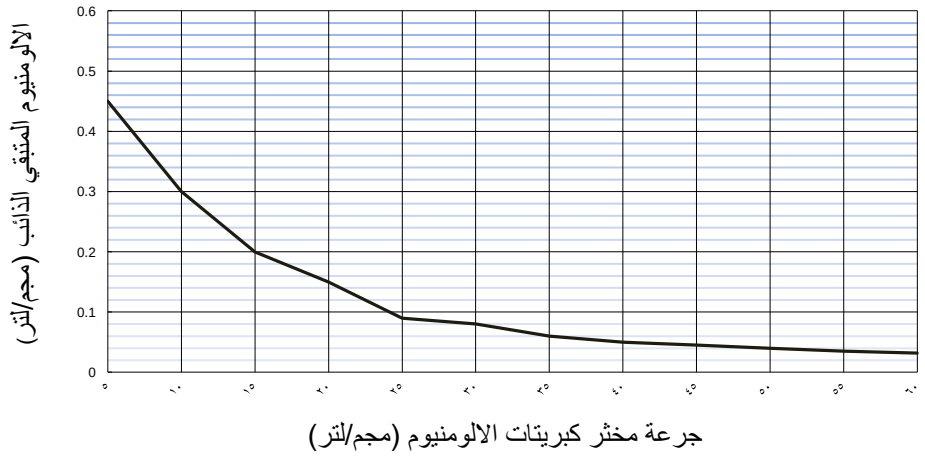
يتأثر الرقم الهيدروجيني بجرعات المروب؛ فعند الجرعات المنخفضة الأقل من ١٠ مجم كبريتات ألومونيوم / لتر كان التأثير طفيفاً، بينما زاد هذا التأثير عند الجرعات الأكبر من ذلك، فنلاحظ أنه في المدى من ١٠ حتى ٦٠ مجم شَبَّة /لتر (شكل ٢/٢٧) اقترب من الرقم الهيدروجيني ٧، وعند هذا الرقم نشاهد أن ذوبانية راسب هيدروكسيد الالومونيوم تكون الأقل، وقد انعكس هذا على تركيز الالومونيوم الذائب الذي أصبح الأقل. (شكل ٢/٢٦)



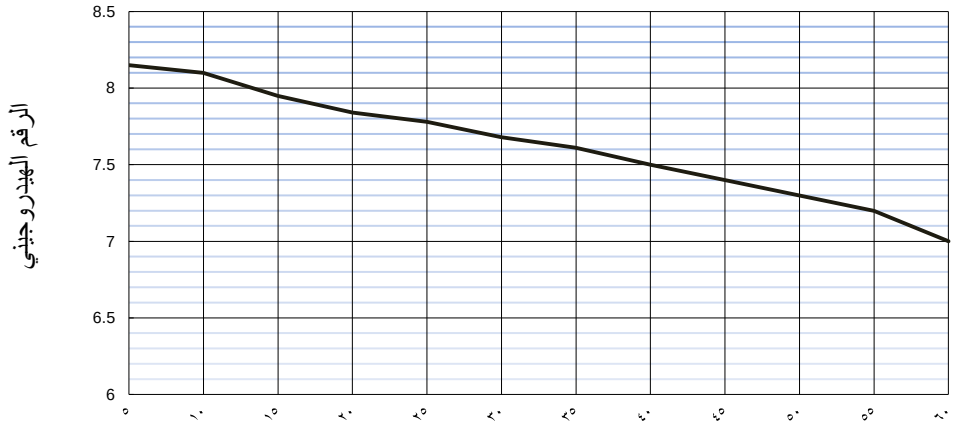
شكل (٢/٢٤) تأثير جرعة كبريتات الالومنيوم على تركيز الكربون العضوي الكلي



شكل (٢/٢٥) تأثير جرعة كبريتات الالومنيوم على عكارة المياه المعالجة



شكل (٢/٢٦) تأثير جرعة كبريتات الالومنيوم على تركيز الالومنيوم المتبقي الذائب



شكل (٢/٢٧) تأثير جرعة كبريتات الالومنيوم على الرقم الهيدروجيني للمياه المعالجة

عند إضافة جرعات عالية من المروب ينخفض الرقم الهيدروجيني حتى يصل الى الرقم الذي يحقق أقل ذوبانية لهيدروكسيد الالومونيوم (أي أقل تركيزًا للالومنيوم الذائب) ثم يبدأ تركيز الالومونيوم الذائب في الزيادة الطردية مع انخفاض الرقم الهيدروجيني، عند مثل هذه الظروف تبدأ العكارة في الزيادة وتصبح جسيمات هيدروكسيد الالومونيوم مشتته في الماء، ولا تحدث إزالة فعالة للمواد العضوية الطبيعية.

يتضح مما سبق الآتي:

١- عندما تكون عكارة المياه منخفضة (اقل من ٢ وحدة عكارة نفيلومترية) فلا بُد من إعطاء الجرعة المناسبة من المروب وقد تكون الجرعة عالية نسبيًّا كما أوضحنا في المثال السابق، وينشأ عن ذلك ارتفاع للعكارة أثناء المعالجة وهذا الارتفاع ينتج عن التنافر الذي يحدث بين جسيمات هيدروكسيد الالومونيوم التي تتشتت في البداية.

٢- يتم خفض تركيز المواد العضوية الطبيعية المتواجدة في المياه في نفس الوقت مع إزالة العكارة ومن هنا فان عملية الترويب تحقق هدفًا غاية في الأهمية وهو التخلص الجزئي من المواد العضوية التي تؤثر سلبًا على نوعية المياه حينما تمكث كثيرًا في الماء المطهر بالكلور, أو تكون إزالتها أمرًا حتميًّا في أنظمة المعالجة التي تستقبل مياه تحتوى على تركيزات عالية من تلك المواد العضوية الطبيعية. وينبغي في هذه الحالة إزالتها أو خفض تركيزاتها قبل

إضافة الكلور (أي أن إضافة المروب تسبق إضافة الكلور)، وهذا النظام غير متبع في محطات المعالجة الحالية.

٣- إذا كانت جرعة الشَّبَّة قليلة، وكان الرقم الهيدروجيني عاليًا (> ٨,٥)، فان تركيز الالومنيوم المتبقي في المياه سوف يرتفع لان جزءًا منه يذوب عند هذا الرقم الهيدروجيني، أما عندما تضاف الجرعة المثالية التي تحقق خفضًا للرقم الهيدروجيني بحيث يقترب من الرقم الذي عنده يكون الالومنيوم في صورة غير ذائبة، فحينئذ ينخفض الالومنيوم المتبقي في الماء المعالج وتحدث إزالة عالية للعكارة والمواد العضوية الطبيعية في ذات الوقت.

٤- يقل تركيز الالومنيوم المتبقي في المياه بعد المعالجة إذا تحقق الآتي:-

أ- الرقم الهيدروجيني الأقرب لتحقيق أقل قدر من الذوبانية الالومنيوم (ويتفق مع المواصفات القياسية لمياه الشرب).

ب- فعالية عملية الترويب التي تؤدى الى التجميع والترسيب الجيد لراسب هيدروكسيد الالومونيوم.

ج- الترشيح الجيد بحيث تقل العكارة عن واحد وحدة عكارة نفيلومترية.

ملحوظة: إذا كانت المياه الخام ذات قلوية منخفضة وكان الرقم الهيدروجيني أقل من ٥,٥ فإن استخدام مروب كبريتات الالومونيوم لا يحقق راسبًا كافيًّا من هيدروكسيد الالومونيوم (أي أن جزءًا كبيرًا من الألومونيوم يظل ذائبًا) اللازم لإزالة المواد العضوية والعكارة وبالتالي لا تتحقق الفعالية العالية للمروب وفى هذه الحالة ينبغي إضافة مادة قلوية قبل المعالجة بالمروب مثل هيدروكسيد الصوديوم أو هيدروكسيد الكالسيوم أو كربونات الصوديوم أو استخدام مروب عديد كبريتات الالومونيوم (سابق التحلل) الذي لا يحتاج إلى قلوية لكي ينحل بالماء ويكوّن راسب هيدروكسيد الالومونيوم، وإذا كان الرقم الهيدروجيني للمياه الخام أكبر من ٨,٥ فلا تتحقق إزالة مثالية للشوائب العالقة والمواد العضوية إلا إذا ضبطت جرعات كبريتات الالومونيوم بالقدر الذي يخفض الرقم الهيدروجيني الى المدى ٦- ٧ ، أو إذا استخدم حامض لخفض الرقم الهيدروجيني قبل إضافة كبريتات الالومونيوم.

لا يعني إضافة حامض لضبط الرقم الهيدروجيني لتحقيق فعالية أفضل لمروب الالومونيوم المستخدم أن يحدث إخلال بالمواصفات القياسية لمياه الشرب؛ كأن تزيد نسبة الكبريتات أو

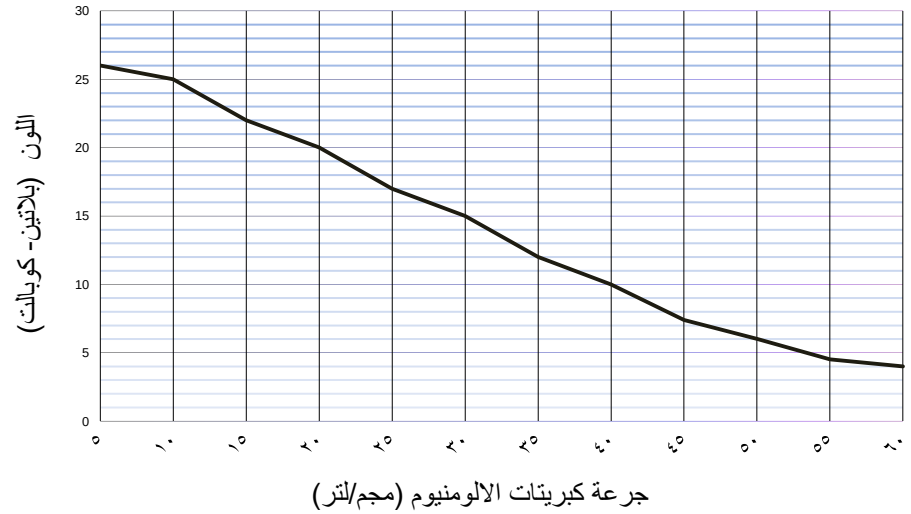
الكلوريدات، فعند الضبط تراعي الخصائص المطلوبة في المياه لتحقيق الهدف من المعالجة وهو نوعية أفضل للمياه.

مثال يوضح إزالة المواد العضوية الطبيعية بواسطة الترويب لمياه ذات المواصفات الآتية:-

الرقم الهيدروجيني : ٧,٦
القلوية : ١٢٠ مجم / لتر (كربونات كالسيوم)
الأملاح الذائبة : ١٩٠ مجم / لتر
العكارة : ١,٥ وحدة عكارة نفيلومترية
لون : ٣٠ وحدة بلاتين – كوبالت
كربون عضوي كلى : ٩ مجم كربون / لتر

ومن خلال إجراء اختبار الجار وإجراء القياسات، فقد رسمت علاقة بين جرعة مروب كبريتات الالومونيوم $Al_2(SO_4)_3.14.3H_2O$ واللون المزال (شكل ٢/٢٨).

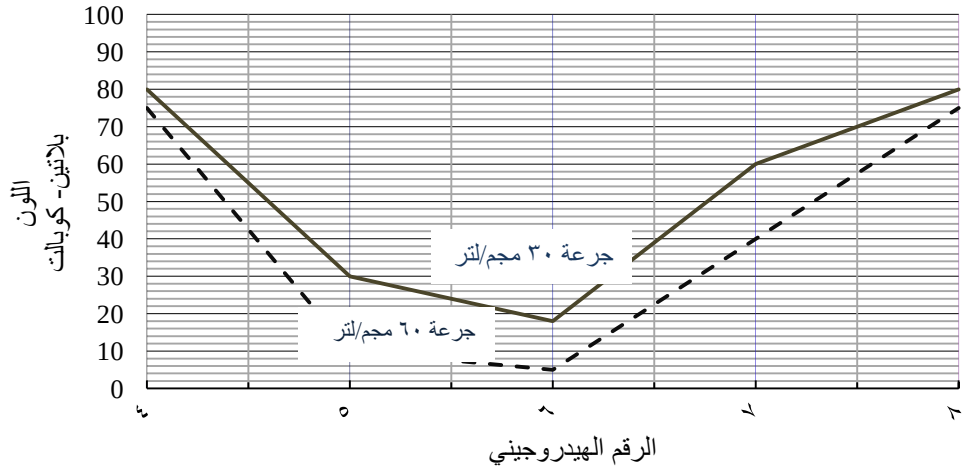
وقد تم قياس تأثير جرعة المروب على إزالة المواد العضوية من خلال أخذ عينات من المياه بعد الترويب والترسيب ثم إجراء الترشيح باستخدام مرشح غشائي مقاس ٠,٤٥ ميكروميتر ، ولم يكن الترسيب فعالاً نظرًا لانخفاض عكارة المياه الخام حيث كانت ١,٥ وحدة عكارة نفيلومترية مما جعل كثافة الندف قليلة.



شكل (٢/٢٨) تأثير جرعة كبريتات الالومنيوم على ازالة اللون

نلاحظ من الشكل (٢/٢٨) أنه حدثت إزالة جوهرية للون عند جرعة ٤٠ مجم/ لتر (كبريتات الومونيوم) ٣,٦مجم الومونيوم / لتر.

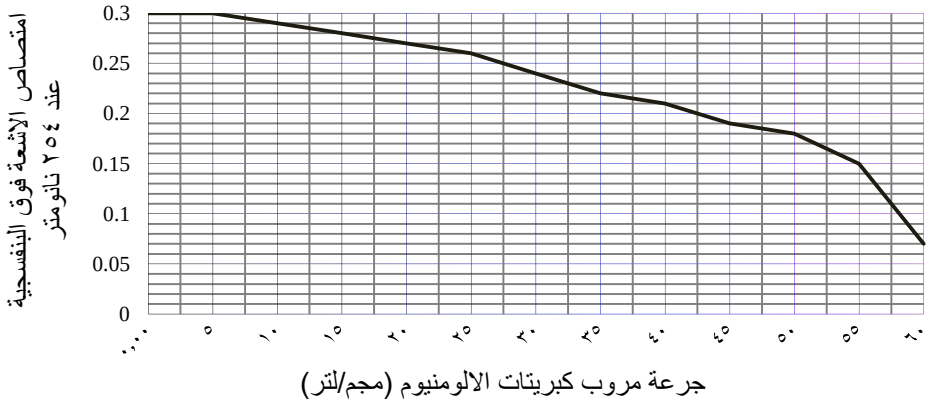
وتجدر الإشارة إلى أن للرقم الهيدروجيني والجرعة تأثيرًا واضحًا على إزالة اللون، فنجد في الشكل (٢/٢٩) أن اللون لعينة مياه انخفض من ٨٠ وحدة بلاتين – كوبالت إلى أقل من ٥ وحدات، وقد استخدمت جرعتان من كبريتات الالومونيوم.



شكل (٢/٢٩) تأثير جرعتين من كبريتات الالومونيوم على إزالة اللون من مياه عند أرقام هيدروجينية مختلفة

وحيث أن الامتصاص النوعي للأشعة فوق البنفسجية (قياس غير مباشر لكمية المواد العضوية التي تمتص الأشعة فوق البنفسجية عند ٢٥٤ نانو متر) يعطي دلالة مفيدة؛ لأنه يوضح نسبة المواد العضوية الطبيعية التي يمكن أن تزال باستخدام المروبات الفلزية التي تنحل بالماء.

يوضح الشكل (٢/٣٠) العلاقة بين امتصاص الأشعة فوق البنفسجية لعينات مياه مرشحة وجرعة كبريتات الالومونيوم المستخدمة. ومن خلال شكل المنحنى نجد أن الإزالة الفعالة للمركبات التي تمتص الأشعة فوق البنفسجية تطلبت جرعة كبريتات ألومونيوم ٣٠ مجم / لتر تقريباً (٢,٧ مجم الومونيوم/ لتر). وقد حدثت أقصى إزالة عند جرعة فاقت ٦٠ مجم / لتر . هناك نسبة منخفضة من المركبات العضوية الممتصة لأشعة فوق البنفسجية لم تنخفض بالتخثير عند أي جرعة من المخثر ولا بالترشيح، وهذه النسبة المنخفضة من المواد العضوية الطبيعية تتوافق مع المياه الخام ذات الامتصاص النوعي للأشعة فوق البنفسجية العالي (٣,٥ لتر/ مجم.سم$^{-1}$).



شكل (٢/٣٠) تأثير جرعة كبريتات الالومنيوم على امتصاص الاشعة فوق البنفسجية عند ٢٥٤ نانومتر

أما منحنى امتصاص الأشعة فوق البنفسجية للمياه المرشحة (شكل ٢/٣٠) يظهر تناقص حاد نسبيًّا في تركيز المواد العضوية الطبيعية عند جرعات كبريتات الالومونيوم العالية، وهذا يميز المركبات العضوية الطبيعية التي لها وزن جزيئي عالٍ ومتجانسة التركيب، أما إذا احتوى هذا النظام على مواد عضوية طبيعية منخفضة الوزن الجزيئي مع وجود مدى واسع من الأوزان الجزيئية المخلوطة معًا (مياه محتوية على تركيز منخفض من المواد العضوية الطبيعية أقل من ٥ مجم كربون / لتر)، فإن تناقص المواد العضوية المتبقية مع زيادة جرعة المروب سيكون تدريجيًّا.
وأقصى إزالة للمواد العضوية الطبيعية عند الجرعات العالية من المروب سوف تكون قليلة.

إزالة العناصر الثقيلة بفعل مروب كبريتات الالومونيوم

تتواجد الفلزات الثقيلة في المياه علي هيئة كاتيونات، والحديد من تلك الفلزات التي تترسب علي هيئة هيدروكسيدات أو كربونات، وهذه المركبات ذات ذوبانية منخفضة في المياه؛ فهي تترسب إذا تكونت في المياه ويساعد على ذلك استخدام المروبات.

يعمل الترويب الجيد على إزالة نسبة كبيرة من العناصر الثقيلة، ويتم ذلك من خلال الترسيب المشترك على هيئة هيدروكسيدات مع راسب هيدروكسيد الالومونيوم الذي ينتج من التحلل المائي للمروب.

آليات إزالة العناصر الثقيلة

أولا: الترسيب المشترك بالاندماج

في هذا النوع تتجمع العناصر الثقيلة حول راسب هيدروكسيد الالومنيوم أثناء الحركة البطيئة للمياه فى عملية الترويب، حيث تسمح تلك الحركة بنمو جسيمات الراسب وبالتالي يحدث الاندماج.

ثانيا: الترسيب المشترك بالادمصاص

يحدث هذا النوع من خلال التصاق العناصر الثقيلة بأسطح راسب هيدروكسيد الالومونيوم، ولا يؤثر تركيز الراسب على آلية الإدمصاص لأنه عندما يتم الترسيب الكامل فان الجسيمات كبيرة الحجم يكون لها مساحات سطح صغيرة جدا مقارنة بالجسيمات صغيرة الحجم، ويعتبر الإدمصاص وسيلة رئيسية لإزالة الملوثات عندما تكون الجسيمات صغيرة الحجم.

ثالثا: الترسيب المشترك بالادمصاص والاحتواء

في هذه الحالة يحدث اندماج للعنصر الثقيل داخل الراسب ويحدث ادمصاص في نفس الوقت على سطح الراسب، ومع عملية الترويب والتجميع يصبح العنصر الثقيل محتجزًا داخل الراسب.

رابعا: الترسيب المباشر

تترسب بعض العناصر الثقيلة في نفس الوقت أثناء الترويب على هيئة هيدروكسيدات مع هيدروكسيد الالومونيوم أو هيدروكسيد الحديديك، وهذا يُعرف بالترسيب المشترك، والذي يحكم هذا الترسيب الرقم الهيدروجيني للمياه؛ حيث تعمل رواسب الترويب على ترسيب الرواسب الأخرى في النظام، وهذه الآلية تلعب دورًا جوهريًّا في ترسيب والكادميوم والنيكل والزنك عند استخدام مروبات أملاح الالومونيوم والحديد. فيلاحظ أن التركيزات المتبقية من تلك العناصر تقل بكثير عن القيم النظرية المتوقعة، ويرجع هذا إلى الترسيب المشترك مع راسب هيدروكسيد الالومونيوم.

يوضح جدول (٢/٩) فعالية الترويب باستخدام كبريتات الالومونيوم وكبريتات الحديديك في إزالة الزرنيخ والكادميوم والكروم الثلاثي والسداسي والرصاص والزئبق والسلينيوم والفضة. نلاحظ أن نسبة الإزالة تراوحت ما بين ٩٠ – ٩٥% لكل من الزرنيخ والكادميوم والكروم الثلاثي والسداسي والرصاص. بينما تحققت إزالة ما بين ٧٠ -٨٠ % لكل من السيلينيوم والفضة. وكما نري فان الرقم الهيدروجيني عامل مهم في تحقيق فعالية الإزالة. ومن خلال ما نشاهده فى محطات المياه، فالرقم

الهيدروجيني يقع في المدى من ٧- ٨ وهذا المدى يدخل في النطاق الذي يحقق أعلى كفاءة لإزالة العناصر الثقيلة بشرط تحقيق ترويب جيد وإزالة عالية للعكارة.

مما سبق؛ يتضح أهمية الخلط الجيد للمروب في مرحلة الخلط السريع والبطيء مما يعمل على ترسيب فعال للعناصر الثقيلة، كما يتضح أهمية الرقم الهيدروجيني الذي يحقق أعلى راسب ممكن من هيدروكسيد الالومونيوم أو الحديديك، وبالتالي أقل نسبة ذائبة منه، ومن الأهمية بمكان أن نذكر أهمية الفصل الجيد للرواسب التي تشبعت بالشوائب والملوثات، وهذا الفصل يحدث بصورة فعالة في أحواض الترسيب وبصورة فائقة في مرحلة الترشيح، ومن ثم فلا بُد من تحقيق أقل عكارة ممكنة للمياه النقية المنتجة.

جدول (٢/٩) فعالية الترويب الكيميائي في إزالة العناصر الثقيلة[٥٣، ٥٤]

العنصر	المروب	الرقم الهيدروجيني	نسبة الإزالة %
الزرنيخ	كبريتات الحديديك	٦- ٨	> ٩٠
الزرنيخ	كبريتات الالومونيوم	٦- ٧	> ٩٠
والكادميوم	كبريتات الحديديك	< ٨	> ٩٠
الكروم الثلاثة	كبريتات الحديديك	٦- ٩	> ٩٥
الكروم الثلاثي	كبريتات الالومونيوم	٧- ٩	> ٩٠
الكروم السداسي	كبريتات الحديدوز	٦،٥- ٩	> ٩٥
الرصاص	كبريتات الحديديك	٦- ٩	> ٩٥
الرصاص	كبريتات الالومونيوم	٦- ٩	> ٩٥
الزئبق (غير عضوي)	كبريتات الحديديك	٦- ٨	٦٠
السيلينيوم	كبريتات الحديديك	٦- ٧	٨٠-٧٠
الفضة	كبريتات الحديديك	٧- ٩	٨٠-٧٠
الفضة	كبريتات الالومونيوم	٦- ٨	٨٠-٧٠

العوامل المؤثرة على إزالة العناصر الثقيلة من المياه:

١- وجود مواد عضوية وغير عضوية

تعمل المواد العضوية وغير العضوية (غير الهيدروكسيد) على تكوين مركبات ذائبة مع ايونات الفلزات مما يعمل علي زيادة التركيز المتبقي من تلك الفلزات ومن أمثلة ذلك:-

- وجود الأمونيا يؤدي الى زيادة المتبقي من الفلزات؛ حيث تقوم بتكوين معقدات غير عضوية ذائبة من الفلزات.

- وجود الكربونات يعمل على تغيير كثير من كيمياء الذوبانية لبعض أنظمة ترسيب الفلزات على هيئة هيدروكسيدات، وكنتيجة لذلك ينشأ انحراف ما بين القيمة النظرية والقيم الفعلية للمتبقي من الفلز، ولا بُد من توقع ذلك لان ترسيب هيدروكسيدات الفلزات لا تحدث إلا في وجود الكربونات.

٢- درجة الحرارة

- لا نغفل تأثير درجة الحرارة على انحراف القيم النظرية عن الواقعية وذلك اذا كانت درجات الحرارة الفعلية مختلفة كثيرًا عن القيم التي عندها تم تقييم وحساب ثوابت الاتزان.

٣- آليات الحركة

- تؤثر آليات الحركة على ترسيب الفلزات؛ لأنه تحت الظروف العملية يكون التفاعل بين المكونات الذائبة والمكونات الصلبة بطيئًا، ولكن يحدث الاتزان أثناء الفترة الزمنية الهيدروليكية المحددة، علاوة على ذلك فان عديد من المواد تترسب في البداية على هيئة غير بلورية مثل ترسيب هيدروكسيد الألومونيوم على هيئة راسب غير متبلور ثم يتحول مع الوقت الى حالة متبلورة (جيبسيت) أكثر ثباتا، وكذلك ترسيب هيدروكسيد الحديديك على هيئة غير متبلورة ثم يتحول بعد فترة زمنية الى الهيئة المتبلورة (جيوسيت).

وتجدر الإشارة الى ان تكوين ترسبات غير هيدروكسيدية للفلزات يكون لها تركيزات متبقية أقل من المتوقعة. فمثلا: ذوبانية كربونات الكادميوم تكون أقل بقيمة مضاعفة من هيدروكسيد الكادميوم، وكما ذكرنا فان الترسيب المشترك المصاحب لعمليات الترسيب والتجميع يعمل على إقلال المتبقي من الكادميوم علي هيئة الكربونات. تعمل مروبات الالومنيوم على ترسيب الزنك والكادميوم والنيكل، وتؤكد القياسات أن المتبقي من تلك الفلزات الثلاثة يكون أقل بكثير من القيم النظرية المتوقعة، ويرجع ذلك الى حدوث الترسيب المشترك مع راسب هيدروكسيد الالومنيوم [٥٥].

تأثير عوامل التطهير على عملية الترويب

الجانب الايجابي:

يعمل الكلور والأوزون على تحسين كفاءة عملية الترويب ويقلل نسبيًّا من جرعة المروب المستخدمة ويرجع هذا للأسباب الآتية:-

- حيث إن هذين المطهرين هما من العوامل المؤكسدة القوية فيقومان بأكسدة المواد العضوية الطبيعية الموجودة بصورة حرة فى الماء أو ملتصقة على أسطح الجسيمات العالقة، ونتيجة هذه الأكسدة تصبح هذه المواد العضوية أكثر استقطابا كهروستاتيكيا، وبالتالي تكون أكثر قابلية للترويب والترسيب.[٥٦، ٥٧]
- يعمل الأوزون على انتزاع المواد العضوية الطبيعية من أسطح الغرويات المعدنية وهذا يساعد على سهولة ترويبها.[٥٦-٦١]

وبذلك فإن الأوزون يعتبر عاملاً مساعدًا في الترويب وأكثر فاعلية من الكلور فى هذا التأثير، وكلاهما يحسن من كفاءة المعالجة عندما يسبقا إضافة المروب مباشرةً.

الجانب السلبي:

إذا احتوت المياه على نسبة مرتفعة من المواد العضوية يحدث الآتي:-

- يتفاعل الكلور مع المواد العضوية المتواجدة بالمياه عن طريق تفاعلات الأكسدة والإحلال. ففي حالة احتواء المياه على الأحماض الامينية تتكون نواتج ثانوية غير هالوجينية مثل الالدهيدات والكيتونات والأحماض العضوية، أما في حالة تواجد فينول فتتكون مركبات فينولية مكلورة مثل اورثو وبارا كلوروفينول، وهذه مركبات تعطى مذاقًا ورائحة غير مقبولين للمياه.

- فى حالة تواجد مركبات عضوية تحتوى على مجموعات إحلال على الحلقة الاروماتية تسهل تفاعلات الإحلال وتفاعلات انشقاق الحلقة الناتج من الأكسدة؛ تتكون مركبات عضوية مكلورة، وهذه المركبات ذات حدود قصوى لا ينبغي تعديها.

- وتعتبر الأحماض الدبالية (مثل: الفولفيك) والكلوروفيل وبعض نواتج الهدم الحيوي للطحالب والبكتريا من المركبات العضوية التي تتواجد في مصادر الإمداد بالمياه والتي تتفاعل مع الكلور مكونة نواتج عضوية مكلورة ثانوية ذات حدود قصوى لا يُسمح بتجاوزها، ومن أمثلتها: حامض داي وتراي كلورواسيتيك – مركبات الهالوميثان ...، وهناك العديد من المركبات التي تتكون بكميات ضئيلة مثل: الكيتون المكلور والمركبات الأليفاتية المكلورة.

تأثير الأيونات المتواجدة فى المياه على فعالية الترويب وتحقيق الرقم الهيدروجيني المثالي لمروب الالومنيوم

أولًا: تأثير أنيونات الكبريتات:

تقوم أنيونات الكبريتات بالاقتراب من هيدروكسيد الالومنيوم المتواجد في صورة معقدة موجبة الشحنة، ويحدث ادمصاص للكبريتات على سطح هذا المركب المعقد ويؤدى إلى إزاحة للرقم الهيدروجيني الذي يحقق أقل ذوبانية لهيدروكسيد الالومونيوم فى الاتجاه الحامضى (أي ناحية الرقم الهيدروجيني الأقل). وتعمل الكبريتات على تعجيل تكوين الندف وتساعد على الإقلال من الالومونيوم المتبقي لذلك حينما تضاف الكبريتات إلى كلوريد الحديد أو كلوريد الالومونيوم تتحقق المثالية في المعالجة عند رقم هيدروجيني مزاح إلى الاتجاه الحامضى.

ويمكن القول أن تواجد الكبريتات يعمل على إيقاف انعكاس الشحنة.

ثانيًا: تأثير السليكات:

تعمل السليكات على تحسين إزالة الجسيمات المعلقة في الماء كما لو كان المروب المستخدم عالي القاعدية؛ وبالتالي تساعد على ترسيب المواد صعبة الترسيب.

ثالثا: تأثير كاتيونات الكالسيوم والماغنسيوم:

إذا حدث لهذه الكاتيونات ادمصاص على أسطح معقد هيدروكسيد الالومونيوم فتحدث إزاحة للرقم الهيدروجيني المثالي للترويب ليكون في الاتجاه القاعدي.

لذلك لا بُد من تحديد الرقم الهيدروجيني المثالي الذي يعطى أقل تركيز ممكن من الالومونيوم والحديد لكل نوع من المياه مع مراعاة أن تؤخذ درجة الحرارة فى الاعتبار لأنها تؤثر على ذوبانية هيدروكسيد الالومونيوم وهيدروكسيد الحديديك.

تؤثر كاتيونات الكالسيوم والماغنسيوم على ترويب الجسيمات الغروية الطبيعية المشتركة مع مواد عضوية دبالية، وهناك ثلاث آليات لتأثير الكاتيونات:-

- تضغط الكاتيونات ثنائية الشحنة الطبقة المزدوجة للغروي السالب. (انظر شكل ٢/٨)
- تقلل من حاجز التنافر بين المروب وجسيمات الطفلة وتدعم ادمصاص المروب على جسيمات الغرين.

تشير التجارب إلى أن الكالسيوم يؤثر يؤثر تأثيرًا ترسيبيًّا للجسيمات الغروية الطبيعية التى تتعلق فى الماء محدثة عكارة بواسطة الأحماض الفولفية، ويعمل الكالسيوم ذو التركيز من ٥×١٠$^{-٣}$ – ٢×١٠$^{-٣}$ مول (٨٠ – ٢٠٠ مجم/لتر) فى مدى واسع من الرقم الهيدروجيني ويساعد على إزالة حامض الفولفيك.

رابعًا: تأثير درجة الحرارة على عملية الترويب

تؤثر درجة الحرارة على عملية الترويب والتجميع المستخدم فيها المروبات الفلزية، حيث تقل إزالة العكارة عند انخفاض درجة الحرارة (هذه التأثيرات منخفضة نسبياً في حالة استخدام كلوريد الحديديك)، ويرجع هذا التأثير إلى الآتي:-

١- زيادة لزوجة المياه مع انخفاض درجة الحرارة وبالتالي يقل معدل الترسيب. يظهر هذا التأثير السلبي لدرجة الحرارة خصوصا في حالة العكارة المنخفضة.
٢- انخفاض معدل التحلل المائي للمروب وتكوين نواتج التحلل المائي، وبالتالي ينخفض تكوين راسب الهيدروكسيد الفلز الفعال.
٣- انخفاض ذوبانية راسب هيدروكسيد الفلز المتكون من المروب المضاف.
٤- زيادة طفيفة لقيمة الرقم الهيدروجيني المقابل لأقل ذوبانية لكلا الهيدروكسيدين (شكل ١٣، ٢/١٥)،

وتتداخل العوامل الكيميائية والفيزيائية أو الهيدروليكية في إحداث التأثيرات التي تكون في الغالب سلبية.

تأثر قلوية المياه بمروب كبريتات الألومونيوم

تنخفض قلوية المياه المعالجة بكبريتات الألومونيوم بقيم تعتمد على التركيب الكيميائي لهذا المروب والجرعة المضافة ، وليس هناك رقم ثابت لهذا الانخفاض للقلوية لأنها مرتبطة بالتركيب الفعلي الراهن للمروب، ولكن يمكننا القول أن هناك مدى معينًا لانخفاض القلوية على اعتبار أن خصائص المروب المستخدم لا تختلف كثيرًا.

مثال: إذا كان المروب المستخدم له التركيب الكيميائي $Al_2(SO_4)_3.14.3H_2O$ ووزنه الجزيئي ٦٠٠ جرام للمول، وكان الحامض الحر = صفر %، وكانت الجرعة المضافة ٣٠جرام/م٣ ، فإذا تحققت هذه الشروط فسوف تتناقص القلوية بمقدار ١٥مجم/لتر تقريبا (ككربونات كالسيوم)، وتتغير هذه القاعدة عند استخدام مروب الشبة بمواصفات أخرى.

المعادلة الآتية توضح تأثير إضافة كبريتات الألومونيوم على القلوية والعسر الكلى والكبريتات للمياه المعالجة:

$$Al_2(SO_4)_3.14.3H_2O+3Ca(HCO_3)_2+H_2O\rightarrow 2Al(OH)_3.3H_2O+3CaSO_4+3H_2CO_3$$

نلاحظ الآتي:-

- ليس هناك تأثير جوهري يذكر على العُسر الكلى.
- يتحول جزء من العسر المؤقت (قلوية بيكربونات كالسيوم) إلى عُسر مستديم (كبريتات كالسيوم) أى ينقص العُسر المؤقت ويزيد العُسر الدائم.
- تتناقص القلوية بقيمة مكافئة للجرعة المضافة، حيث يتحول جزء من القلوية الى حامض كربونيك.
- ينخفض الرقم الهيدروجيني بقيمة تعتمد علي القدرة التنظيمية للمياه المعالجة.

عملية تجميع الشوائب

إن الهدف من عملية الترويب والتجميع هو تنشيط التفاعلات المتبادلة بين الجسيمات وتكوين تجمعات يمكن لها أن تنفصل من السائل بكفاءة في مراحل المعالجة التي تلي الترويب وهي: الترسيب أو التعويم والترشيح. ولكي يتحقق التجميع الفعال لا بُد من إزالة حالة الثبات للجسيمات المعلقة في الماء كما أشرنا فيما سبق بإضافة المادة المروبة أو المخثرة.

ولكي تتحقق فعالية المادة المروبة فلا بُد من إحداث تصادمات بين الجسيمات المسببة للعكارة مع بعضها بعضًا ومع نواتج تحلل المادة المخثرة المضافة، ويتأتى هذا بإضافة المخثر مع الخلط السريع الذي يحقق الانتشار في جميع أرجاء الماء وزيادة الاحتماليات الممكنة للتصادمات والتفاعلات بين شتى الجسيمات ونواتج التحلل المائي للمخثر.

والطريق المؤدي الى زيادة التصادمات بين الجسيمات هو زيادة تدرج السرعة (G) بين الجسيمات بالقدر الاقتصادي المناسب.

عمليات انتقال الجسيمات المعلقة في الماء

هناك عدد من العمليات الفيزيائية التي تسبب الحركة النسبية والتصادمات بين الجسيمات المسببة للعكارة بالمياه والتي تم ترويبها بفعل المروب المضاف إليها، ومن ثم يحدث التلامس والتلاصق. ومع حدوث تلاصق الجسيمات تتكون التجمعات القابلة للانفصال عن الماء بالترسيب.

تشتمل العمليات الفيزيائية على الآتي:[٣، ٩]

١- الانتشار البرونيوني Brwonian diffusion (Peri kinetic flocculation)

٢- قص الماء Fluid shear (Orthokinetic flocculation)

٣- الهبوط التفاضلي Differential settling

٤- الحركة الاضطرابية للماء Turbulence motion

ويمكن شرح العمليات السابقة على النحو التالي:

أولا: الانتشار البرونيوني

ترجع تلك التسمية إلى عالم النبات روبرت براون (١٨٢٧) الذي كان يقوم بفحص ميكروسكوبي لحبوب اللقاح في الماء وكان مندهشًا حينما لاحظ أنها في حالة دائبة من الحركة العنيفة العشوائية، وفي ذلك الوقت لم يكن لدي براون تفسيرا لذلك. وبعد ذلك بسنوات أصبح هناك تفسيرا لهذه الحركة العشوائية بأنها ناشئة عن تصادمات الجسيمات العالقة في الماء مع جزيئات الماء المحيطة بها نتيجة الطاقة الحرارية للماء. ويمكن التحديد الكمي لتلك القوة كما يلي:-

القوة = ثابت بولتزمان × درجة الحرارة المطلقة (٢/٢٣)

وتتعلق الطاقة الحرارية للماء بالجهد الكيميائي للماء، وهذا الجهد هو الطاقة الحرة الجزئية للمادة (طاقة جبس)، والفرق في الجهد الكيميائي هو الذي يسبب انتشار الجسيم من مكان الى آخر.

ويعتبر قانون ستوك Stokes`law هو الذي يحكم حركة جسيم غروي في سائل، حيث يحدد العلاقة بين قوة المقاومة (F) المؤثرة على جسيم في اتجاه عكس اتجاه السرعة، واللزوجة، ونصف قطر الجسيم والسرعة على النحو الموضح بالعلاقة الآتية:-

$$F = -6\pi\mu R\upsilon \qquad (٢/٢٤)$$

حيث: μ = اللزوجة الديناميكية

R = نصف قطر الجسيم υ = السرعة (الانتشار)

فلو اعتبرنا ان هناك سائل يحتوي على جسيم غروي مركزي ثابت في السائل، وكنتيجة للحركة البرونيونية فان الجسيمات المحيطة بهذا الجسيم المركزي تتصادم معه وتتحد معه. ومن هنا فان تركيز الجسيمات حول الجسيم المركزي يقل، ويتسبب الانتشار في إحداث تيار من الجسيمات في اتجاه هذا الجسيم المركزي. وإذا افترضنا أن هناك تدفق من الجسيمات في اتجاه الجسيم المركزي يساوي معدل

الالتصاق معه، فان معدل التصادم (N) يساوي مساحة سطح كرة ذات نصف قطر (r) × تدفق الجسيمات (Jj)، ويصاغ في المعادلة الآتية:-

$$N = -4\pi r^2 Jj \qquad (٢/٢٥)$$

ومن هنا فان معدل التصادمات في الانتشار البرونيوني يعتمد على التركيز العددي للجسيمات. وعندما يكون هناك تلامس والتصاق بين الجسيمات الصغيرة والندف الكبيرة فهذا يعني أن الانتشار البرونيوني يكون فعالا. ويعتمد تجميع الجسيمات الصغيرة مع الندف الكبيرة على الآتي:-

-حجم الندف - كثافة الحركة الاضطرابية للماء - الانتشار البرونيوني

ومن العلاقتين السابقتين فان الانتشار البرونيوني يساوي:-

ثابت بولتزمان × درجة الحرارة المطلقة ÷ ٣ × النسبة التقريبية × قطر الجسيم × اللزوجة (٢/٢٦)

تعمل زيادة درجة الحرارة على زيادة معدل التصادم بين الجسيمات. وفي حالة غياب حاجز الجهد الكهروستاتيكي (نتيجة تعادل الشحنات) بين الجسيمات يحدث ترويب سريع. وحيث أن عامل التصادم في غاية الأهمية في إحداث الترويب فيضاف المروب الى الماء لزيادة تركيز الجسيمات وبالتالي تتعجل آلية الترويب البرونيوني التي تعمل على تجمع وتنامي حجم الندف ومن ثم تصبح قابلة للترسيب.

العوامل المؤثرة على كفاءة التصادم بين الجسيمات

١- الجهد الكهروستاتيكي

تقل كفاءة التصادم بين الجسيمات بقيمة كبيرة كلما زاد حاجز الطاقة (ψ) (شكل ٢/١١ ج) الناشئ عن التنافر الكهروستاتيكي الناتج عن الطبقة المزدوجة المحيطة بالجسيم الغروي.

٢- التباطؤ الهيدروديناميكية (Hydrodynamic retardation)

تشير الدراسات التحليلية إلى أن الجسيمات التي تخضع للانتشار البرونيوني ولقص السائل (الحركة الرقائقية للماء) كلما اقتربت من بعضها البعض، فان هناك قوى هيدروديناميكية (حركة

الماء) تقلل أو تبطئ من تقارب وتلامس الجسيمات. وينبغي صرف الماء المتواجدة بين كل جسيمين حتى يتماسا.

وبناءً علي هذا التحليل فانه من الناحية النظرية فان التصادمات لا تحدث إذا لم تشتمل حسابات عملية التصادم في نفس الوقت على قوى جذب سريعة مثل قوى تجاذب فاندرفال.

وتحت ظروب انضغاط الطبقة المزدوجة نتيجة تعادل الشحنة في حالة **الترويب السريع**، فان الإعاقة الهيدروليكية اللزجة تتلاشى بفعل قوى تجاذب فاندرفال. أما في حالة **الترويب البطيء** ومع وجود حاجز تنافر ناشئ عن الطبقة المزدوجة، فان التأثير الكهروستاتيكي يكون أكبر بكثير من التأثير الهيدروديناميكى. وعلى النقيض ففي حالة الطبقات المزدوجة الرقيقة المحيطة بالجسيمات فالتأثير الهيدروديناميكى يكون أكثر تأثيرًا حيث يقلل من كفاءة التصادم.

ثانيا:- قص الماء (الانزلاق لرقائق الماء) Fluid shear والترويب الارثوكيناتيك

نتيجة الاختلافات في سرعات حركة الجسم المائي أو انحدار السرعة (G) سواء كانت الحركة رقائقية (Laminer) أو اضطرابية (Turbulence)، فان الجسيمات تتبع حركة الماء وينشأ عن ذلك تقاربها وتماسها وتلاصقها. يرتبط متوسط انحدار السرعة (G) ارتباطا مباشرا بالطاقة المستهلكة لكل وحدة كتلة من الماء.

ويُعرف انحدار السرعة بأنه التغير في السرعة مع المسافة في نطاق انسياب الماء (dv/dz).(شكل ٢/٢٥)

يحدث التصادم بين جسيمين متواجدين في ماء متحرك بنمط رقائقي أو نمط اضطرابي، نتيجة اختلاف سرعات أجزاء الماء (انحدار السرعة)، وكنتيجة لهذا التصادم يحدث الالتصاق ويطلق على هذه العملية بالتجمع أو الترويب الحركي المباشر (اورثوكاينتيك)، حيث أن الجسيمات بطبيعة الحال تتبع حركة السائل الموجودة فيه. ويرتبط انحدار السرعة (G) بالطاقة المبددة أو المستهلكة بالماء لكل وحدة كتلة.

مفهوم انحدار السرعة Velocity gradient (G)

انحدار السرعة هو التغير في السرعة مع المسافة للماء المنساب، أو معدل تغير السرعة مع تغير المسافة بين نقطتين في الماء (dv/dz)، وحدة القياس مقلوب الزمن.

وحيث أن أجزاء الماء أو السائل لا تتحرك ككتلة واحدة ولكنها تتحرك حركة إما رقائقية أو اضطرابية؛ وبالتالي فهناك انزلاق أو قص أو تشوه بين الأجزاء المتحركة، وجهد القص (τ) يتناسب طرديًّا مع لزوجة السائل، وعكسيًّا مع الانحدار المطلق في السرعة:-[٣]

$$\tau = \mu \, dv/dz \qquad (٢/٢٧)$$

حيث: dv/dz الانحدار المطلق في السرعة μ = ثابت التناسب (اللزوجة المطلقة)

وحيث أن هناك انحدارات في السرعة لأجزاء السائل، فيتم التعبير عن تدرج السرعة الإجمالي للماء بواسطة ما يُعرف بمتوسط انحدار السرعة أو انحدار السرعة المتوسط سواء أكان هذا لكأس اختبار الجار أو لحوض الترويب وتوضحه العلاقة الآتية:-

$$G = = \sqrt{\frac{W}{\mu}} \qquad (٢/٢٨)$$

حيث: W = الشغل المبذول في الثانية لكل وحدة حجم = P/V

يعتمد هذا الشغل على الشكل الهندسي لحوض ووحدة التقليب، وجود حواجز تهدئة، وسرعة التقليب. ويحسب الشغل بقياس العزم (torque) المعطي للماء عند سرعات مختلفة ولزوجة الماء. وتوضح العلاقة التالية قيمة الشغل بمعلومية كل من السرعة والعزم والحجم:-

$$w = 2\mu ST/V \qquad (٢/٢٩)$$

حيث: S = سرعة التقليب (لفة/ثانية) T = العزم المعطي للماء V = حجم الماء

ويمكن التعبير عن متوسط انحدار السرعة (G) بالعلاقة التالية:-

$$G = \sqrt{P/\mu V} \qquad (٢/٣٠)$$

حيث: P = القوة المعطاة للماء من خلال ريش مروحة التقليب (نيوتن. م .ث$^{-١}$).

V = حجم المياه (م^{٣}) μ = اللزوجة الديناميكية

ومن هذه العلاقة الأخيرة يأتي التعريف لقيمة متوسط انحدار السرعة بأنه الجزر ألتربيعي لمتوسط انحدار السرعة لسائل في حالة تقليب، ويمكن استخدام هذه العلاقة في حساب القوى المعطاة للسائل.

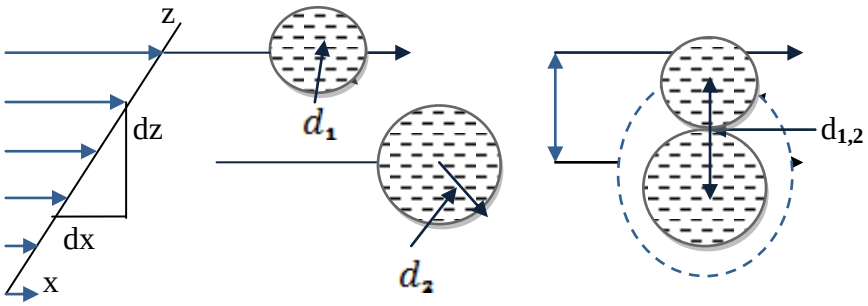
يعتمد معدل التجميع للجسيمات على الآتي:-

- قطر الجسيم - انحدار السرعة المتوسط

ثابت معدل التجميع = ٠,١٧(قطر الجسيم العكارة + قطر الجسيم الناتج من المروب)^{٣} × تدرج السرعة × التركيز العددي للجسيمات

ومع إضافة المروب المناسب بالجرعة المناسبة تأول قوى التنافر الكهروستاتيكي الناشئ عن الطبقة المزدوجة الى الصفر، عندئذ تتحكم قوتان في كفاءة الترويب:-

- قوى تجاذب فاندرفال.
- وقوى تقلل من التصادم بين الجسيمات وهي ناتجة عن الحركة المائية.



شكل (٢/٣١) شكل تخطيطي للترويب الحركي المباشر (نظرية سموليوكوفسكي) يوضح تدرج السرعة وكرة التصادم.

العوامل المؤثرة على كفاءة الترويب الحركي المباشر

(Fluid shear ,Orthokinetic flocculation)

١- قوي خارجية:

- تجاذب فاندرفال - تنافر الطبقات المزدوجة - الجاذبية

٢- قوى التباطؤ الماء حركي (الهيدروديناميكى)

ثالثا:- الهبوط التفاضلي Differential settling

يعمل التفاوت في سرعات هبوط الجسيمات إلى التصادم أو التلاقي والالتصاق. وبطبيعة الحال فان القوة الدافعة للهبوط هي الجاذبية الأرضية، والذي يحكم تلك الآلية هي سرعة الهبوط للجسيم المتحرك.

يحدث هذا النوع من الترويب عندما يكون للجسيمات سرعات هبوط غير متساوية مع تواجدهم على خطوط رأسية واحدة مما يجعلهم يتقاربون ويتماسون ويتصادمون وقد يتداخلون أو ينضغطون.

يعتمد معدل التجميع أو الترويب (R) بهذه الآلية على الآتي:-

- الكثافة النوعية للجسيمات (تناسب طردي، s)
- اللزوجة الحركية للماء (اللزوجة المطلقة للماء /كثافة الماء، $\upsilon = \mu/\rho$)
- قطر الجسيمات (تناسب طردي، d_1, d_2)
- التركيز العددي للجسيمات (تناسب طردي، $n_1 n_2$)
- عجلة الجاذبية الأرضية (ثابت)

وقد صيغت العلاقة التالية لمعدل الترويب (الترويب التفاضلي):-

معدل الترويب التفاضلي = النسبة التقريبية × الجاذبية الأرضية (الوزن النوعي – ١) ×٧٢/١ اللزوجة الحركية × (قطر جسيم + قطر ندفة المروب)^3(قطر جسيم - قطر ندفة المروب)× التركيز العددي

$$R = \frac{\pi \mathbf{g}(s-1)}{72\upsilon}(d_1 + d_2)^3 (d_1 - d_2) n_1 n_2 \qquad (٢/٣١)$$

وقد صيغت هذه العلاقة على اعتبار أن الجسيمات ذات شكل كروي ولها نفس الكثافة، وتصل آلية التجميع التفاضلي الى أقصى مدى لها عندما تكون الجسيمات المتجمعة كبيرة الحجم وكثيفة ويكون الفرق في الأحجام كبير.

رابعا: الحركة الاضطرابية للماء (Turbulence)

في حالة الانسياب المضطرب للماء، تعمل الحركة المتموجة للماء على تكوين دوامات مختلفة الأحجام، تتناسب تلك الأحجام؛ مع حجم الحوض ومروحة التقليب. تنتقل الحركة في الدوامات الكبيرة الى الدوامات الأصغر فالأصغر. يتغير تدرج السرعة مع الوقت في الدوامات الناشئة عن الانسياب المضطرب، وهذا الانحدار في السرعة يسبب الحركة النسبية للجسيمات المتقاطرة، وينشأ عن تلك الحركة تجمع الجسيمات الغروية مع بعضها البعض كما هو الحال في الانسياب الرقائقي.

يعتمد معدل التجمع بهذه الآلية على الآتي:-

١- قطر الجسيمات.
٢- اللزوجة الحركية.
٣- معدل الطاقة المستهلكة لوحدة الكتلة من الماء.

" يتأثر معدل التجميع للجسيمات ليس فقط بكثافة الحركة للماء؛ ولكن أيضا بتوزيع الطاقة الحركية للماء على مدى الدوامات في مجال انسياب الماء"
عند تقليب الماء؛ فان توزيع الطاقة يتحدد من خلال الحجم والشكل الهندسي لمروحة وحوض التقليب.

يتأثر مفهوم قيمة انحدار السرعة (G) بثلاثة اعتبارات:[٦٢-٦٥]

١- يختلف معدل تبديد الطاقة بحوض التقليب اختلافا كبيرا من مكان لآخر. ويترتب على ذلك أن يكون معدل التجميع للجسيمات مختلفا، وبالتالي يتغير شكل وتركيب وحجم الندف وتتكسر أثناء تحركها من مكان لآخر.
٢- يفقد جزء من الطاقة المزودة للتقليب على هيئة طاقة حرارية عند أسطح المروحة والحوائط.
٣- قص السائل ومتوسط وانحدار السرعة (G) هي عوامل متحكمة في آليات التجميع، فقط عندما تكون الجسيمات المتفاعلة اكبر من ١ ميكروميتر ولها نفس الحجم. وعندما يكون هناك جسيم كبير وآخر صغير أقل من ١ ميكروميتر)، فان الانتشار البرونيوني يتحكم في الحركة النسبية بين الجسيمات.

آليات الترويب والانسياب داخل وحدات الترويب

يتضح من الممارسة أن الماء الخام المحتوي على تركيز عالٍ نسبيًّا من العكارة يكون أسهل في معالجته عن الماء المحتوي على عكارة قليلة. لذلك تضاف مواد عالقة للماء قليل العكارة لتحسين الأداء الترسيبي للعوالق. وهناك واحد من الأسباب التي تؤدي الى هذه الحالة؛ وهو أنه عند قيمة معينة لحاصل ضرب متوسط انحدار السرعة في الزمن G×t؛ فانه كلما زاد تركيز الجسيمات المسببة للعكارة في الماء الخام، كلما زاد تركيز حجم الندف ويترتب على ذلك زيادة معدل التماس والتجمع للجسيمات الصغيرة الأولية وتحويلها إلى ندف.[٦٦]

تزداد كفاءة وحدة الترويب مع زيادة حاصل ضرب G×T.[٦٦] فعندما تكون العكارة ٥ وحدات نفيلومترية (٥ مجم/لتر تقريبا)، فلا يحدث الترويب إلا إذا زاد حاصل ضرب G×T إلى ٥٠,٠٠٠، وعندما تزيد الى ٢٠٠,٠٠٠ فان نسبة تركيز الجسيمات الخارجة من وحدات الترويب إلى تركيز الجسيمات في المياه الخام تصبح قليلة للغاية.

وفي حالة ما يكون تركيز العكارة الأولية = ٥ مجم/لتر فتكون النسبة سالفة الذكر = ٠,٥ وهذه يقابلها G×T = ٧٢٠٠٠. وعندما يكون تركيز العكارة الأولية = ١٠٠ وحدة فان الإزالة للجسيمات الأولية تبدأ عند G×T = ٢,٨٠٠.

وعندما تكون نسبة الجسيمات الداخلة والخارجة من وحدة الترويب = ٠,٥ فتقابلها G×T = ٣٦٠٠، وعند التركيز الأولي للعكارة = ٥٠ وحدة ونسبة تركيز الجسيمات الخارجة من وحدة الترويب إلى تركيز الجسيمات الخارجة = ٠,٠٥، فيقابلها G×T = ٧٢٠٠. وفي أنظمة المعالجة الحديثة يكون مدى G×T (٢٤٠٠٠- ٨٤٠٠٠) عند فترة زمنية نموذجية (T) = ٢٠ دقيقة.

هناك علاقة تناسُب طردي بين تركيز العكارة الأولية للمياه الخام وكفاءة إزالتها؛ حيث أن ثابت معدل الترويب لوحدة ترويب معينة يعتمد على التركيز الحجمي للندف المتواجدة فيها.

ترتبط كفاءة عملية الترويب بشكل حوض الخلط السريع البطيء، وزمن الخلط ومتوسط انحدار السرعة، ولا بُد من تحقيق القيم المثالية لزمن الخلط مع المروب ومتوسط انحدار السرعة حتى يتحقق الاتزان التركيبي الضروري لإحداث تجمع فعال للشوائب مما يساعد على الترسيب في المرحلة اللاحقة.

ويُعتبر الشكل المربع المزود بحواجز التهدءة؛ هو أنسب الأشكال التي تعطي أفضل النتائج من الأشكال الأخرى مثل المربع بدون حواجز، والدائري سواء أكان بحواجز أو بدونها.[٦٧]

تفكك الندف وتكسرها

يحدث تكسر للندف في حوض الترويب عند الكثافة العالية للخلط وهذا يحدث عند متوسط انحدار سرعة أكبر من ١٠٠ ث$^{-1}$ ($G > 100\ sec^{-1}$)، وازداد حجم الندف إلى حد معين. ويمكن تفسير هذا السلوك في أن أسطح الندف والجسيمات الدقيقة الأولية تتغير مع الوقت من الناحية الكيميائية والفيزيائية، ويعقب هذا حدوث استعادة لحالة الثبات والتشتت في الماء مرة أخرى. ويمكن القول أيضًا أن هناك حالة من الاتزان الحركي بين تكوين الندف وتكسيرها.

وتشير الدراسات الى أن هناك آليتين رئيسيتين لحدوث التكسير للندف وهما:-

١- تآكل أسطح الجسيمات الأولية من الندف.

٢- تكسر الندف إلى ندف اصغر.

الخلط السريع (Rapid mixing)

تعتبر وحدة الخلط السريع بمثابة المفاعل الذي يُصَمم عادة لإحداث التصادمات بين جزيئات الماء وجسيمات الشوائب الغروية ومادة المروب المستخدم. يتم التحكم في التصادمات من خلال عوامل تتعلق بحركة الماء (هيدروديناميكية) وهي:

- الشكل الهندسي لوحدة الترويب.
- خصائص الماء المعالج
- والآليات الحركية لتفاعلات الترويب التي تحدث في هذه المرحلة.

يجري الخلط السريع للمروب من خلال الحركة الشديدة للماء، وتتوقف فعالية معالجة الماء على التصميم الجيد لهذه المرحلة.

الخلط السريع والية الترويب

كما ذكرنا من قبل، يحدث الترويب للشوائب العالقة بالماء من خلال آليتين:-

١- ادمصاص نواتج عملية التحلل المائي للمروب على الجسيمات الغروية وينتج عن ذلك تعادل شحنات الجسيمات الغروية.

٢- ترويب بالكنس؛ حيث تحدث تفاعلات مع راسب هيدروكسيد الالومنيوم أو هيدروكسيد الحديديك. (شكل ١١، ٢/١٢)

ومن خلال تحليل آليتي الترويب؛ فانه يقتضي لتعادل الشحنة توزيع وتشتيت سريع للمروب (في أقل من ٠,١ ثانية) في الماء الخام حتى يحدث التعادل المنشود لشحنات الجسيمات الغروية. وعلى النقيض من ذلك، نجد ان الترويب بالكنس والذي فيه يتكون راسب حجمي من هيدروكسيد الالومنيوم أو هيدروكسيد الحديديك في فترة زمنية أطول نسبيًا تقع في المدى (١ – ٧ ثانية)، لا يكون فيه الخلط الكثيف حاسما كما في حالة التعادل.

وحدات الخلط السريع

١- الخلط الميكانيكي (Back mix mechanical reactor)

وهذا النوع أكثر شيوعًا في محطات المعالجة.

متوسط انحدار السرعة (G) = (قوة التقليب ÷ لزوجة الماء × حجم حمض الترويب)$^{0.5}$ (٢/٣٢)

وكما أوضحنا من قبل أن التصادمات التي تحدث بين الجسيمات الغروية ونواتج التحلل المائي للمروب ذات أهمية كبيرة في الترويب بمعادلة الشحنة، وأيضا التصادمات بين جسيمات راسب هيدروكسيد الالومنيوم أو هيدروكسيد الحديديك تلعب دورًا رئيسيًا في الترويب بالكنس. ويعتبر متوسط

انحدار السرعة (G) مهمًّا في كونه متحكمًا في عدد مرات التصادمات بين الجسيمات بناءً على "نظرية سموليوكوفسكي".

يختلف توزيع الطاقة المبددة في داخل وحدة التقليب نتيجة عدم تجانس كثافات التقليب، فهناك نطاق تقليب شديد بالقرب من ريش المقلب، ونطاق محيط بريش المقلب ثم نطاق يقع في قلب حوض التقليب. وبالتالي هناك تبديد للطاقة في هذه النطاقات الثلاثة وفي المقابل هناك قيم لمتوسط انحدار السرعة في كل نطاق.

تشير الخطوط الإرشادية لتصميم محطات معالجة مياه الشرب الي أن وقت المكث في وحدة الخلط السريع يتراوح ما بين ١٠ – ٣٠ ثانية بمتوسط انحدار سرعة ما بين ٧٠٠ – ١٠٠٠ ث$^{-1}$ ، وتتراوح الطاقة المبددة لوقت المكث هذا من ٠,٩ – ١,٢ حصان قوى/ ٣٨٠٠ م^{3} /يوم، وقد أشار آخرون[٣] بان وقت المكث في وحدة الخلط السريع الذي يتراوح ما بين ١ – ٢ دقيقة مع نفس انحدار السرعة سالف الذكر يحقق مثالية في عملية الترويب، ويعتبر هذا تكلفة كبيرة للخلط السريع والذي يستلزم زيادة حجم البناء وزيادة طاقة التقليب.

يساعد الخلط طويل الزمن في الترويب بآلية الكنس. والتصميم الأقل تكلفة يكون مناسبًا لكلتا آليتي الترويب اللتين تتمان أثناء الخلط عبر الخط متبوعًا بوحدة الترويب. وهذا النوع من الخلط لا يحقق مرونة في التشغيل، بينما الخلط الميكانيكي يسمح بالتحكم في سرعة التقليب ومن ثم انحدار السرعة.

٢- الخلط عبر الخط (In-line blender)

استخدمت هذه الطريقة اعتمادًا على مفهوم التحلل المائي للمروب الذي يسبب ترويبًا للجسيمات الغروية بتعادل الشحنة في غضون فترة زمنية تتراوح ما بين ٠,٠١ – ١ ثانية، وتتراوح قيم تدرج السرعة ما بين ٣٠٠٠ – ٥٠٠٠ ث$^{-1}$ ، ووقت المكث يتراوح ما بين ٠,٥ – ١,٠ ثانية. الطاقة النموذجية لهذا النظام ٠,٥ حصان /٣٨٠٠ م^{3}. يتميز هذا النظام بخلط لحظي فائق وتكلفته النسبية أقل من السابق.

٣- الخلط بالحقن المباشر (Diffusers and injection device)

يجري هذا الحقن من خلال وحدات حقن تتيح الخلط الفائق ولكن هناك بعض العيوب تتمثل في انسدادات لفتحات الحقن، وعدم المرونة في إجراء الصيانة لعدم القدرة على التحكم في التقليب. يتراوح تدرج السرعة ما بين ٧٠٠ – ١٠٠٠ ث$^{-1}$ ، ووقت الخلط ما بين ٠,٥ – ١ ثانية.

خلاصة فصل الترويب

١- إن الهدف من عملية الترويب لا يقف عند التخلص من العكارة فقط؛ إنما هناك شوائب أخرى يتم التخلص منها أثناء هذه العملية، مثل: المواد العضوية (التي تعطي لونًا ورائحة للمياه)، وأيضا العناصر الثقيلة إذا تواجدت.

٢- تحقيق الجرعة المثالية في غاية الأهمية في المحطات التقليدية التي تعمل بآلية الترويب بالكنس، وهو الترويب الذي يعتمد علي تكوين راسب كثيف من هيدروكسيد الالومونيوم الذي يقوم بعملية تجميع للشوائب وإزالتها.

٣- لا بُد من تحقيق القيم المناسبة للخلط السريع والبطيء من حيث زمن الخلط (زمن المكث)، ومتوسط انحدار السرعة (من خلال سرعة التقليب)، ومعدل التحميل السطحي. وإذا لم تتحقق تلك القيم فسوف يحدث الآتي:-

- تدهور عملية تكوين ندف ناضجة قابلة للانفصال عن الماء والترسيب، وبالتالي تتدهور المعالجة.
- تتكون ندف ضعيفة تعوم في الماء أو تطفو على سطحها، وبالتالي يفقد المروق وظيفته في الترسيب.
- زيادة جرعات المروب المستخدم بدون طائل.
- زيادة الالومونيوم المتبقي بالمياه المعالجة نظرًا لتواجد الالومونيوم على هيئة ندف دقيقة الحجم

  جدا قد تنفذ من الوسط ألترشيحي.
- انسداد الوسط ألترشيحي وزيادة معدلات الغسيل العكسي له مما يعمل على استهلاك المزيد من الكهرباء واستهلاك المعدات وزيادة الفاقد من الماء المعالج.

٤- حينما يتحقق ترويب فعال فسوف يتحقق ترسيب فعال أيضًا، وبالتالي تقوم وحدات الترشيح بإنجاز دورها، بينما إذا فشلت عملية الترويب أو لم تكن بالفعالية المطلوبة فسينعكس ذلك سلبا علي دور المروقات مما يستتبعه تحميل علي المرشحات، وبالتالي لا تتمكن من تحقيق فصل العكارة والتخلص من الشوائب الأخرى وفق برنامجها الزمني.

٥- قد تحتاج المحطات التقليدية إلى ترويب معزز أو مُحسن بغية الإقلال من المواد العضوية لتفادي تكوين المركبات العضوية المكلورة وهذه إستراتيجية لا بُد لمرفق المياه من إتباعها لتحقيق الجودة المطلوبة لمياه الشرب.

٦- إن تحقيق اقل قدر من العكارة مؤشرا هاما للعديد من بنود نوعية المياه؛ حيث يعني انخفاض الالومونيوم المتبقي الذي يتواجد في صورة معلقة، ويعنى أيضًا التخلص من حويصلات طفيل كريبتوسبوريديوم وجيارديا التي قد لا تتأثر بجرعات الكلور المعتادة والفترات الزمنية القصيرة بالمعالجة التقليدية.

٧- ارتفاع الالومونيوم المتبقي بالمياه المعالجة يعطى دلالة علي عدم فعالية عملية الترويب والترسيب والترشيح. ولا يعتبر ارتفاع الالومونيوم المتبقي مؤشرا للجرعة العالية من المروب إلا في حالتين:

أ – انخفاض الرقم الهيدروجيني الى أقل من "٦" نتيجة ارتفاع الجرعة. مما يؤدي إلى ذوبان جزء من الالومونيوم.

ب- إذا كان الترويب غير فعال مما يجعل جسيمات هيدروكسيد الالومونيوم صغيرة الحجم جدًّا وغير قابلة للترسيب وقد تمر من خلال الوسط الترشيحى غير الفعال.

٨- الاستخدام الجيد للمروب يحقق أعلى أداء ويقلل من تكون الترسبات بأحواض التخفيف وبالتالي الاقتصاد في النفقات.

٩- تجدر الإشارة إلي أن حويصلات الكريبتوسبوريديوم متناهية الصغر (يتراوح قطرها ما بين ٣- ٥ ميكروميتر)، بينما حويصلات الجيارديا (يتراوح قطرها ما بين ١١- ١٤ ميكروميتر)، وتلك الحويصلات تسلك سلوك الجسيمات العالقة في الماء مثل الغرين، وبالتالي يمكن إزالتها من خلال عمليات الترويب والترسيب والترشيح التي تدار بكفاءة عالية.

١٠- عند الرغبة في زيادة الطاقة الإنتاجية للمحطة بقدر يفوق الطاقة التصميمية؛ لا بُد فلابد من عمل الإجراءات التالية:-

- دراسة نوعية المياه المعالجة من حيث:
  - المواد العضوية (TOC) للتأكد من قدرة النظام على الإزالة المطلوبة لتلك الشوائب.
  - الالومونيوم الكلي المتبقي.
  - العكارة المتبقية.
  - تواجد الكائنات الدقيقة التي تسلك سلوك الجسيمات العالقة.
- دراسة الجرعات المطلوبة من المروب المستخدم للوفاء بالنوعية المأمولة للمياه.
- دراسة معدلات الغسيل العكسي للمرشحات وتأثير ذلك على استهلاك الكهرباء والمعدات.

وإذا تحققت الجدوى الفنية والاقتصادية فلا بأس من زيادة الطاقة الانتاجية للمحطة.

مراجع الفصل الثاني

1- USEPA, Guidance Manual for Enhanced Coagulation and Enhanced Precipitative Softening. Preliminary Draft prepared by Malcolm Pirnie, Inc., White Plains, NJ, for the USEPA, Regulation Management Branch, Washington, D.C., 1994.

2- Kemira Kemwater, "About water treatment, Agneta Lindquist, ed., Kemira, Kemwater, Helsingborg, Sweden, 2008.

3- American Water Works Association, "Water Quality and Treatment, 5th ed., Denver, CO, New York: McGraw-Hill, 1999.

4- Hunter, K.A., Liss, P.S. "The Surface Charge of Suspended particles in Estuarine and Coastal Waters." Nature, 282, 1979:823.

٥- السيد أحمد الخطيب. الكيمياء البيئية للأراضي، منشأة المعارف بالإسكندرية، ١٩٩٨.

6- Lyklema, J. "Surface Chemistry of Colloid in Connection with Stability.' In Ives, K.J. (ed.), The Scientific Bases of Flocculation, Sijthoff and Noordhoff, The Netherlands, 1978.

7- Verwey, E.J. and Overbeek, J. The, G., "Theory of the Stability Of Lyophobic Colloid, Elsevier, Amsterdam, 1948.

8- O'Melia, C.R. "polymeric Inorganic Flocculants." In Flocculation, Sedimentation and Consolidation, Moudgil, M. and Semasundaran, P.,eds. New York: Engineering Foundation, 1985.

9- American Water Works Association, "Water Quality and Treatment, 4th ed., Denver, CO, New York: McGraw-Hill, 1991.

10- Letterman, R.D. "Filtration Strategies to meet the Surface Water Treatment Rule.", Denver, CO: American Water Works Association, 1991.

11- Kodama, H. and Schnitzer, M. "Effect of Fulvic acid on the Crystallization of Aluminum Hydroxide.", ***Geoderma***, 24, 1980:195.

12- Bertsch, P.M., and Parker, D.R. "Aqueous Polynuclear Aluminum Species." In The Environmental Chemistry of Aluminum 2nd ed., ch.4, p.117, Sposito, 1996.

13- Karrlsson, M. "Structure Studies of Aluminum Complex in Solids in Solution and at the Solid/water Inter face, doctoral thesis, 1998, Umea University, Sweden.

14- O'Melia, C.R., "Coagulation and Flocculation." In Weber, W.J., Jr (ed.), Physiochemical Processes for Water Quality Control, Wiley-Interscience, New York, 1972.

15- Amirtharajah, A. and Mills, K.H. "Rapid-mix Design for Mechanism of Alum Coagulation.", ***Jour. AWWA,*** 74:4:210 (Apr. 1982).

16- VanBenschoten, J.E. and Edzwald, J.K., " Measuring of Aluminum during Water Treatment: Methodology and Application. ***Jour. A WWA***, 82:5:71, May, 1990.

17- Ball, J.W., Nordstrom, D.K. and Jenne, E.A. "Additional and Revised Thermochemical Data for WATEQ-2 Computerized Model for Trace and Major Elements Speciation and Mineral Equilibrium of Natural Water, U.S. Geological Survey Water Resource Investigation. Menlo Park, CA, 1980.

18- Stumm, W. and Morgan, J.J. "Aquatic Chemistry, 2nd ed., New York: Jojn Wiley and Sons, 1981**.**

19- Driscol, C.T. "A Procedure for the Fractionation of Aqueous Aluminum in Dilute Acidic Waters Jour. ***Environ. Anal. Chem.***, 16. 267, 1984.

20- Gardner, M.J., and Gunn, A.M. "Bioavailability of Aluminum from Food and Drinking Water. ***Proc. Royal Soc***. Med. Round table Series: Alzheimer's Disease and Environment, London, 1991.

21- Federal register, title 50 part 219, November 13, 1985, p.46936.

22- Lione, A. "The Prophylylactic Reduction of Aluminum Intake, ***Food C hem. & Toxicol***., 21:103(1983).

23- Schenk, R.U., Bjorksten, J. and Yeager, L. "Composition and consequence of Aluminum in water, Beverages and other Ingestibles. Environmental Chemistry and Toxicology of Aluminum. Lewis Publishers, Chelsea, Mich. 1989.

24- Sharlock, J.C. "Aluminum in Food and the Diet," Aluminum in Food and the Environment, ***Royal Soc. Of chem***., Thomas Graham House, Cambridge, UK, 1989.

25- Doll, R. "Review, Alzheimer's Disease and Environmental Aluminum, Age and Aging, 22:138(1993).

26- Baxter, M.J. "Aluminum in Infant Formula and tea and Leaching during Cooking." Aluminum in Food and the Environment Massey, R.C. ed., ***Royal Soc. of Chem***., Cambridge, UK, 1989.

27- Letterman, R.D. and Driscoll, C.T. "Survey of Residual Aluminum in Filtered Water, ***Jour. AWWA***, 80:4:154, (April, 1988).

28- Miller, R.G. "The Occurrence of Aluminum in Drinking Water, ***Jour. AWWA***, 76:1:84, (Jan. 1984).

29- Rusch, G.M. "A Review of Toxicity of Aluminum and its Salts. Dept. Toxicol. Allied Corp., Morristown, NJ. 1984.

30- World Health Organization, "Aluminum in Drinking Water. Background Document for Preparation of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality, Geneva, WHO) WHO/SDE/WSH/03.04/53).

31- U.S. Environmental Protection Agency. Draft Drinking Water Health Criteria Document for Haloacetonitriles, Chloropicrin, and Cyanogen chloride. Washington, D.C. Criteria and Standard Divisions, Office of Drinking Water, 1991a.

32- U.S. Environmental Protection Agency. Drinking Water Standards and Health Advisories, **EPA** 820-R-11-002, Office of Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC, January, 2011.

33- FAO/WHO (2007) Aluminum (from all sources, including food additives). In: Evaluation of certain food additives and contaminants. Sixty-seventh report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Geneva, World Health Organization, pp. 33–44 (WHO Technical Report Series, No. 940).

34- World Health Organization, "Guidelines for Drinking Water Quality, 4rd ed. , 2011.

35- Abdullah, N.A. "Improvement of Drinking water Quality through Coagulation Process, Doctoral thesis, Ain Shams University, Egypt, 2005.

36- World Health Organization, "Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd ed., vol.1 Recommendation, Geneva, WHO, 2008.

37- VanBenschoten, J.E., and Edzwald, J.K. "Chemical Aspects of Coagulation Using Aluminum Salts-I. Hydrolytic Reactions of Alum and Polyaluminum chloride*." Wat. Res*., 24(12), 1990, 1519-1526.

38- Bottero, J.Y., and Bersillon, J.L. "Aluminum and iron III Chemistry. Some implications for Organic Substance Removal." In Aquatic Humic Substances: Influence on Fate and Treatment of Pollutants, ch.26, pp.425-442, I Suffet and P. McCarthy, eds. Washington, D.C.: ***An. Chem. Soc***., 1989.

39- Dempsey, B.A. "Reaction between Fulvic Acids and Aluminum: Effects on the Coagulation Process." In Aquatic Humic Substances: Influence on Fate and Treatment of Pollutants, ch.25, pp.409-424, i. Suffet and McCarthy, eds. Washington, D.C.: Am. Chem. Soc., 1989.

40- Clark, M.M. and Srivastava. "Mixing and Aluminum Precipitation." ***Environ. Sci.Technol***. 27(10), 1993:2181-2189.

41- David, D., and Clark, M.M. "Micromixing Models and Application to Aluminum Neutralization Precipitation reactions." In Mixing and Coagulation and Flocculation, ch.5, A.Amirtharajah, M.M. Clark, and R.R. Trussell, eds., Denver, CO: AWWA Research Foundation, 1991.

42- Narkis, N. and Rebhn. "Stoichiometric Relationship between Humic and Fulvic Acids and Flocculants." ***Jour. AWWA***, 69(6), 1977:325.

43- Dempsey, B.A. "Chemistry of Coagulants." In AWWA Seminar Proceedings, Influence of Coagulation on the Selection of Operation and Performance of Water Treatment Facilities. AWWA Annual Conference, Kansas City, MO, June 14, 1987.
44- Edzwald, J.K. "Coagulation in Drinking Water Treatment: Particles, Organics and Coagulants ***Wat. Sci. Tech***., 27(11), 1993:21-35.
45- Letterman, R.D., and Vanderbrook, S.G. "Effect of Solution Chemistry on Coagulation with Hydrolyzed Al III." ***Water Research,*** 17(1), 1983:195-204.
46- Dental, S.K. "Application of the Precipitation-Charge Neutralization Model of Coagulation***." Environ. Sci. Technol***., 22(7), 1988,825.
47- Dentel, S.K. "Coagulant Control in Water Treatment." ***Critical Reviews in Environmental Control***, 21(1), 1991:41-53.
48- Singley, J.E., "Coagulation Control Using Jar Test," Sem. Proc.: Coagulation and Filtration: Back to the Basics, Proc. AWWA Annual Conf., St Louis, Mo., 1981.
49- Black, A.P. et al., "Review of the Jar Test", ***Jour. AWWA***, vol. 49, no.11, 1959.
50- Hudson, H.E. Jr., and Wagner, E.G., "Control and Uses of Jar Tests," ***Jour.AWWA,*** vol. 73, no, 4, 1981, p.218.
51- Hudson, H.E. Jr., "Water Clarification Processes Design and Evaluation, Van Nostrand Reinhold, New York, 1981.
52- Reiber, S.H., and Kukull, W.A. "Aluminum, Drinking Water and Alzheimer's Disease Denver, CO: AWWA Research Foundation, 1996.
53- Sorg, T.H., Love, O.T.,Jr., and Logsdon, G. "Manual of Treatment Techniques for Meeting the Interim Primary Drinking Water Regulation, USEPA Report 600/8.77.0050 MERL, Cincinnati, Ohio, 1977.
54- Patterson, J.W. and Minear, R.A. "Physical- Chemical Methods of Heavy Metals Removal," in P.A. Kenkol (ed.), Heavy Metals in the Aquatic Environment, Pergamon Press, Oxford, 1975.
55- Nilsson, R. "Removal of Metals by Chemical Treatment of Municipal Wastewater." ***Wat. Res.*** 5(51), 1971.
56- Langlais, B., Reckhow, D.A. and Brick, D.R. "Ozone IN Water Treatment." AWWA Research Foundation, Chelsea, MI: Lewis Publisher, 1991.
57- Reckhow, D.A., Singer, P.C. and Trrussell, R.R. "Ozone as a coagulant aid" In Ozonation: Recent Advances and Research Needs, pp.17-46, Denver CO:AWWA, 1986.
58- Prendiville, "Ozonation at 900 cfs Los Angeles Water Purification Plant." ***Ozone:Sci. Eng***., vol.8, 1986, p.77.
59- Edwards, M. and Benjamin, M.M. "Effect of Preozonation on Coagulant- NOM Interaction." ***Jour. AWWA***, 84(8), 1992:63-72.
60- Chandrakanth, M.S. and Amy, G.L., "Effect of Ozone on Colloidal Stability and Aggregation of Particles Coated with Natural Organic Matter." ***Environ.Sci. Technol***., 30(2), 1996.
61- Parakar, A., and Edzwald, J.K., "Effect of Ozone on EOM and Coagulation." ***Jour. AWWA***, 88(4), 1996: 143-154.
62- Schwartzberg. H. G. and Treybal, R. E., "Fluid and particle motion in turbulent stirred tanks." Ind. Eng. Chem. Fundamentals, 7, 1968: 1-12.
63- McConnachie, G. L., "Turbulence intensity of mixing in relation to flocculation." jour. of Environ. Eng., ASCE, 117(6), 1991: 731-750.

64- Clark, M.M., Flora, J.R.V., "Floc restructuring in varied turbulent mixing." ***Jour. of Colloid and Interface Sci***., 147(2), 1991:407-421.
65- Letterman, R.D., Amirtharajah. A., O`Melia, C.R., "Coagulation and Flocculation.", Water Quality and Treatment, AWWA, McGraw-Hill, 1999, pp 6.48.
66- American Water Works Association, "Water Treatment Plant Design, 3th ed., Denver, CO, New York: McGraw-Hill, 1998.
67- Mhaisalkar, V. A., Paramasivam, R. and Bhole, A. G., "Optimizing Physical Parameters of Rapid Mix Design for Coagulation-Flocculation of Turbid Waters", ***Wat. Res.*** 1(43-52), 1991.
68- Camp, T. R. and Conklin, G. F., "Towards a Rational Jar Test for Coagulation. ***Jour. New England Water Works Association***, **84**, 325.

الفصل الثالث

تطهير مياه الشرب
(الأكسدة الكيميائية)

تطهير مياه الشرب

(الأكسدة الكيميائية في معالجة مياه الشرب)

تلعب الأكسدة الكيميائية أدوارًا عديدة مهمة في معالجة مياه الشرب، فتستخدم العوامل المؤكسدة في أكسدة المركبات غير العضوية مثل كبريتات الحديدوز ومركبات المنجنيز ومركبات الكبريتيد والمركبات العضوية المخلقة الخطرة مثل ثلاثي كلوروإثيلين وإترازين. تعمل العوامل المؤكسدة علي التخلص من المركبات المسببة للمذاق والرائحة واللون، كما تقوم بتحسين أداء المواد المروبة مثل كبريتات الألومونيوم (الشَّبَّه) وكلوريد الحديديك.....الخ

وحيث أن للعوامل المؤكسدة قدرات اهلاكية للكائنات الدقيقة، لذلك استخدمت للحد من أو القضاء علي الكائنات المائية مثل الطحالب وذلك أثناء مراحل المعالجة الأولية بمحطات المياه وتقوم أيضًا بتثبيط نشاط الميكروبات الأخرى، كالبكتريا والفيروسات، ومن ثم فالأكسدة تؤدي إلى التطهير، ويمكننا القول أن عملية التطهير هي نتيجة الأكسدة الكيميائية التي تقوم بها المؤكسدات.

تضاف العوامل المؤكسدة (المطهرة) في المرحلة الأولي من المعالجة قبل مرحلة الخلط السريع (تطهير أولي)، وفي حالة تواجد تركيزات عالية من المواد العضوية في المياه، فيمكن إضافة المطهرات بعد مرحلة الترويق وقبل المرشحات حتى يكون قد تم إزالة المواد العضوية بصفة جزئية أو كلية لتجنب تكوين مركبات عضوية كلورية خطرة، كما تضاف عوامل التطهير أو الأكسدة في المرحلة النهائية من المعالجة (تطهير نهائي) بهدف تحقيق تطهير متبقي في شبكات التطهير. (شكل ٣/١)

إن مفهوم التطهير سبق اكتشاف البكتريا المسببة للأمراض، وقد استخدم التطهير بالكلور للمخلفات البشرية كوقاية من الأمراض المتوطنة عام ١٨٣٢، وأصبح التطهير بإضافة مادة كيميائية إلى المياه أثناء المعالجة مقبولا بعد أن ثبتت فعاليته في التخلص من مسببات الأمراض مثل: التيفؤيد والكوليرا المنقولتين عن طريق المياه.[١]

تعتمد الكثير من الدول علي استخدام الكلور والهيبوكلوريت كمطهرات، وهناك دول تستخدم ثاني أكسيد الكلور أو الأوزون. ومع زيادة الوعي بأهمية إزالة وتثبيط نشاط المسببات المرضية الأكثر مقاومة للمطهرات مثل: **الجيارديا والكريبتوسبوريديوم** أصبح هناك حرصا شديدا علي أن تتحقق

الفاعلية لعمليات المعالجة بداية من مرحلة الترويب باستخدام المروبات، مرورًا بمرحلة الترسيب ثم الترشيح وانتهاءًا بالتطهير الذي يجعل المياه خالية من أي مسببات مرضية.

ومع ظهور نواتج ثانوية لعملية التطهير باستخدام الكلور تتجاوز الحدود القصوى والتي تنتج من تفاعل الكلور مع المواد العضوية الطبيعية المتواجدة في المياه، أصبح هناك اهتماما شديدا بتحقيق الفعالية العالية لعملية المعالجة للتخلص من المواد العضوية، بالاضافة الى استخدام بدائل أخري يمكن أن تستخدم مع الكلور.

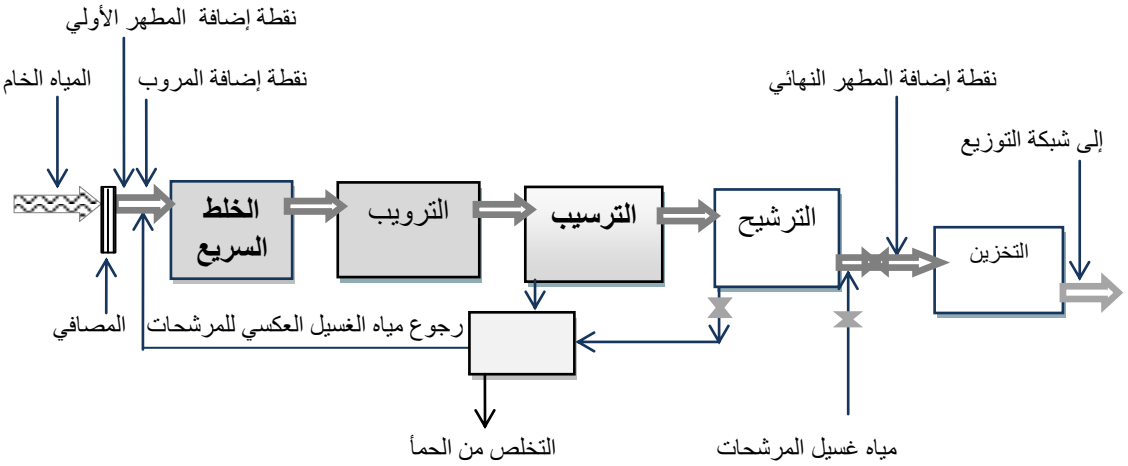
ومن أمثلة المؤكسدات الكيميائية أو المطهرات المستخدمة في معالجة مياه الشرب:-

الكلور- الأوزون- ثاني أكسيد الكلور - البرمنجنات.

وقد يستخدم الأوزون مع فوق أكسيد الهيدروجين أو مع الأشعة فوق بنفسجية لإنتاج شقوق حرة ذات خصائص أكسدة قوية وقد يستخدم أكثر من عامل مؤكسد في المحطة الواحدة.

يستخدم الكلور الحر كعامل مؤكسد ومطهر في نفس الوقت في بلدان كثيرة مثل الولايات المتحدة الأمريكية، وتتخذ كافة الاحتياطيات للتحكم في النواتج الثانوية لتفاعلات الكلور مع المركبات العضوية الطبيعية المتواجدة في المياه، وفي حالة زيادة المركبات العضوية في المياه المعالجة ، يتم علي الفور استخدام بدائل أخرى مناسبة.

وتجدد الإشارة إلي أن العوامل المؤكسدة الأخرى والمطهرة في ذات الوقت تتفاعل مع المواد العضوية الطبيعية والبروميد بدرجات مختلفة اعتمادا علي خصائص كل عامل مؤكسد في تكوين نواتج ثانوية عضوية.



شكل (٣/١) نقاط إضافة المطهر في المعالجة التقليدية للمياه السطحية

يُعتبر الأوزون هو المنافس الأقوى للكلور وخصوصا في أوروبا الغربية، نظرا لما قد ينجم عن الكلور من تكون مركبات عضوية ثانوية يجب ألا تتجاوز حدودًا معينة مثل مركبات تراي هالوميثان (الكلوروفورم، وبروموكلوروميثان، وكلورورداي بروموميثان، البروموفورم)[٢]. ومثلما كان لكل مطهر مزايا فله أيضا عيوب، فمثلا: فوق أكسيد الهيدروجين ليس بالقوى التطهيرية للكلور، أما الأوزون وثاني أكسيد الكلور فتكلفتهما عالية بالمقارنة بالكلور، وهناك خصائص معيبة للأوزون تتمثل في عدم ثباته وبالتالي ليس له متبقي بشبكات التوزيع.

عندما ترتفع تركيزات مركبات "تراي هالو ميثان" نتيجة ارتفاع تركيزات المواد العضوية الطبيعية بالمياه، فلا بُد من انتقاء الإستراتيجية التي تهدف إلي التخلص من تلك المواد الثانوية غير المرغوب فيها أو منع تكونها، فدرء تلك النواتج الخطرة خير من معالجتها، امتثالا للقاعدة "الوقاية خير من العلاج".

ويجري ذلك من خلال نقل نقطة حقن الكلور لتكون بعد مرحلة الترويب والترسيب، حتى يكون قد تم التخلص من نسبة من المواد العضوية، وبالتالي تنخفض النواتج الثانوية أو قد تنعدم. والبديل الآخر أن يستخدم الأوزون في التطهير الأولي ثم يستخدم الكلور في مرحلة التطهير النهائي.

الأسس الكيميائية للأكسدة:

غالبًا ما يُنظر إلى تفاعلات الأكسدة علي أنها تفاعلات يصاحبها تبادل للالكترونات، فالمؤكسدات مستقبلات للالكترونات والمختزلات هي معطيات للالكترونات، والحقيقة ليست بهذه البساطة، فالعديد من عوامل الأكسدة هي في الحقيقة معطيات الكترونات للعناصر أو المجموعات الفقيرة في الالكترونات، وعلي الرغم من هذا الطرح؛ فان اعتبار تفاعلات الأكسدة علي أنها انتقال بسيط للالكترونات ما هو إلا لضبط اتزان المعادلات.

تستخدم مبادئ الديناميكا الحرارية لتحديد ما إذا كانت تفاعلات أكسدة معينة ممكنة الحدوث أم لا، وهذا يتطلب حساب جهود التفاعل لتلك التفاعلات.

تفسير تفاعلات الأكسدة والاختزال في ضوء انتقال الالكترونات:

لتوضيح كيف أن الأكسدة يصاحبها فقد أو اكتساب الكترونات فلنأخذ أكسدة ايون الحديدوز (Fe^{++}) بواسطة حامض الهيبوكلوراس، وهذا الحامض يمثل شكل من أشكال الكلور، ولكنه في حالة مائية. فعند إضافة حامض الهيبوكلوراس إلى المياه المحتوية علي ايون الحديدوز يحدث تفاعل كيميائي سريع علي النحو الآتي:-

$$2Fe^{2+} + HOCl + 5H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + Cl^- + 5H^+ \qquad (٣/١)$$

في هذه المعادلة تأكسد ايون الحديدوز أي زاد في عدد الأكسدة من +٢ إلى +٣، بينما حدث اختزال للكلور أي نقص في عدد الأكسدة من+١الي -١،هذا يعني أن كل ذرة حديد فقدت الإلكترون بينما كل ذرة كلور اكتسبت إلكترونين. ولكي يكون عدد الإلكترونات التي اكتسبت مساوي لعدد الإلكترونات التي فقدت، فإن ذرتين من الحديد يجب أن يتم أكسدتهما بواسطة ذرة كلور كما هو موضح بالمعادلة السابقة.

ويمكن أن تصاغ المعادلة السابقة بحساب الأوزان الجزيئية كما يلي:

$$2Fe^{2+} + HOCl + 5H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + Cl^- + 5H^+ \qquad (٣/٢)$$

١١١,٧ ٥٢,٥ ٩٠ ٢١٣,٧ ٣٥,٤٥ ٥

وحيث أن ٥٢,٥ مجم من حامض هيبوكلوراس (HOCl) تكافئ ٧١ مجم من الكلور العنصري (Cl_2) فان ٧٠,٩ مجم من الكلور تؤكسد ١١١,٧مجم من أيون الحديدوز، ويمكن كتابة معادلة الأكسدة والاختزال علي مرحلتين (نصفي تفاعل) هكذا:

(٣/٣) $HOCl + \cancel{H^+} + \cancel{2e^-} \rightarrow Cl^- + \cancel{H_2O}$

(٣/٤) $2Fe^{2+} + \cancel{6H_2O} \rightarrow 2Fe(OH)_3 + \cancel{2e^-} + \cancel{6H^+}$

$$2Fe^{2+} + HOCl + 5H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + Cl^- + 5H^+$$

ولكي تتزن المعادلة فلا بُد أن يكون عدد الذرات لكل عنصر والشحنة الإجمالية متساويًا على جانبي المعادلة، ولابد أولاً من التعرف على الأشكال الكيميائية المؤكسدة و الأخرى المختزلة، ثم الاستعانة بجداول أنصاف التفاعلات والجهود القياسية (E°_{ox} , E°_{red}) (جدول ٣/١ و٣/٢) وبجمع هذين الثابتين نحصل على الجهد القياسي الإجمالي (E°_{net}) علي النحو التالي:-

(٣/٥) $$E^\circ_{net} = E^\circ_{ox} + E^\circ_{red}$$

وحيث أن الثابت (pka) يصف ميل الحامض لإعطاء أيونات هيدروجين، و الثابت (E) يمثل الجهد الكهروكيميائي ويصف ميل العامل المؤكسد لأخذ إلكترون، فنجد أن الطاقة الحرة للتفاعل ΔG° (طاقة جبس) تتعلق بكل من الجهد الكهروكيميائي القياسي (E°_{net}) وثابت فاراداي (F) وعدد الإلكترونات المنتقلة (n) كما في العلاقة الآتية:

(٣/٦) $$\Delta G^\circ = -nFE^\circ_{net} = -RTlnK$$

وفي حالة انتقال إلكترون واحد، فان ΔG° تصبح علي النحو التالي:

(٣/٧) $$\Delta G^\circ = -23\ E^\circ_{net} \quad kcal/\ volts.$$

تشير الديناميكا الحرارية التقليدية إلى أن التفاعلات التي يصاحبها انطلاق طاقة (يطلق عليها طاقة "جبس السالبة") أو التي يكون لها جهدا موجبا، يسير فيها التفاعل تلقائيًا من اليسار إلى اليمين والتفاعلات ذات الطاقة الموجبة أو ذات الجهد السالب تسير في الاتجاه العكسي.

ولنأخذ تفاعل الأكسدة الآتي:-

(٣/٨) $$a\ A_{ox} + b\ B_{red} \rightarrow a\ A_{red} + b\ B_{ox}$$

حيث A تأخذ إلكترون من المادة B، ولكي يتحدد أي المادتين حدث لها اختزال وأيهما حدث لها أكسده، فيجب علينا حساب ومقارنة حالات الأكسدة للذرات الناتجة.

يتحدد ثابت الاتزان (K) لهذا التفاعل من خارج قسمة تركيز كل من النواتج والمتفاعلات عند حالة الاتزان كما يلي:

$$K = [A_{red}]^a [B_{ox}]^b / [A_{ox}]^a [B_{red}]^b \qquad (٣/٩)$$

يتعلق الجهد الإجمالي لهذا التفاعل مباشرة بثابت الاتزان ويصاغ علي النحو التالي:

$$E^\circ_{net} = RT/nF \times \ln K \qquad (٣/١٠)$$

حيث n عدد مولات الالكترونات المنقولة في التفاعل

F: ثابت فاراداي = ٩٦٤٨٧ كولوم. مول$^{-}$ أو = ٢٣ كيلو سعر/فولت.مول

R: ثابت الغاز = ١,٩٨ سعر/مول. درجة أو = ٨,٣١٤ جول/درجة.مول

T: درجة الحرارة المطلقة= ٢٥ + ٢٧٣ = ٢٩٨ كلفن ، K : ثابت الاتزان

ولكي يحدث انتقال لإلكترون واحد عند درجة حرارة ٢٥°م نجد أن العلاقة السابقة أصبحت كما يلي:

$$E^\circ_{net} = (1.987\times 10^{-3}\ kcal/deg)\ (298\ deg/1000\times 96.5)\ \ln K \qquad (٣/١١)$$

$$= 0.0614 \ln K$$

$$\log k = E^\circ_{net} / 0.059 \qquad (٣/١٢)$$

جهـــود الإلكتـــرود:-

لكي تحدث أكسدة واختزال فيجب أن يكون هناك عامل مؤكسد أو مختزل قوى، وتقاس قوى الأكسدة والاختزال بما يعرف بجهد الإلكترود للمادة ولتوضيح ذلك نكتب جهود الإلكترود لأنصاف معادلات التفاعلات (جدول ٣/١، ٣/٢) ثم نجمع المعادلتين معا لنحصل على معادلة واحدة كاملة.

يقاس جهد الإلكترود تحت الظروف القياسية، أي عندما تكون النشاطات الديناميكية الحرارية لكل المواد مساوية للوحدة (والنشاطات هي التركيزات المولية للمادة الكيميائية في المحاليل المخففة جدّا)، وتحت الظروف القياسية فإن جهد الإلكترود يُعرف بجهد الإلكترود القياسي (E°).

وتُعرف الحالة القياسية بأنها الحالة التي تتحقق عند ضغط جوى =١ ، ودرجة حرارة = ٢٥°م، ونشاطات كل الصور الكيميائية = صفر.

ومن خلال جمع قيم جهود الأكسدة و الاختزال لأنصاف التفاعل على التوالي لحساب الجهد الديناميكي الحراري لمعادلة الأكسدة والاختزال، فإننا نحصل على الجهد القياسي الإجمالي، ويحسب التغير فى الطاقة الحرة القياسية ΔG° من خلال المعادلة الآتية:-

$$\Delta G^\circ = - nF E^\circ_{net} = - RT \ln K \qquad (٣/١٣)$$

وكلما كانت القيمة الموجبة للجهد كبيرة لتفاعل الأكسدة؛ فإنه تكون القيمة السالبة كبيرة أيضا للتغير في الطاقة الحرة و كلما كان ثابت الاتزان كبيرًا للتفاعل.

جدول (٣/١) جهود نصف الخلية القياسية لعوامل الأكسدة المستخدمة في معالجة المياه[٢، ٣]

العامل المؤكسِد	نصف تفاعل الاختزال	الجهد $E^\circ_{red.}$ (Volts)
Chlorine	$Cl_{2\,(gas)} + 2e^- \rightarrow 2Cl^-$	١,٣٦
Hypochlorous acid	$HOCl + H^+ + 2\,e^- \rightarrow Cl^- + H_2O$	١,٤٩
Hypochlorite ion	$OCl^- + 2H^+ + 2e^- \rightarrow Cl^- + H_2O$	٠,٩٥
Ozone	$O_{3(aq)} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow O_2 + H_2O$	٢,٠٨
Hydroxyl radical	$OH + H^+ + e^- \rightarrow H_2O$	٢,٨٥
Hydrogen peroxide	$H_2O_2 + 2H^+\,2e^- \rightarrow 2H_2O$	١,٧٨
Permanganate	$MnO_4^- + 4H^+ + 3\,e^- \rightarrow MnO_2(s) + 2H_2O$	١,٦٨
Manganese dioxide	$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	١,٢١
Chlorine dioxide	$ClO_2 + e^- \rightarrow ClO_2^-$	٠,٩٥
Chlorine dioxide	$ClO_2 + 2H_2O + 5e^- \rightarrow Cl^- + 4OH^-$	١,٧١
Hypobromous acid	$HOBr + H^+ + 2\,e^- \rightarrow Br^-\ H_2O$	١,٣٣
Monochloramine	$NH_2Cl + 2H^+ + 2e^- \rightarrow Cl^- + NH_4^+$	١,٤٠
Dichloramine	$NHCl_2 + 3H^+ + 4e^- \rightarrow 2Cl^- + NH_4^+$	١,٣٤
Oxygen	$O_{2\,(aq)} + 4H^+ + 4e\text{-} \rightarrow 2H_2O$	١,٢٣
Nitrate	$NO_3^- + H_2O + e\text{-} \rightarrow NO_2^- + 2HO^-$	٠,٠١

جدول (٣/٢) جهود نصف الخلية القياسية للتفاعلات محل الاهتمام في معالجة المياه[٣، ٤]

العامل المُختزِل	نصف تفاعل الأكسدة	الجهد $E^{\circ}_{ox.}$ (Volts)
Bromide ion	$Br^- + H_2O \rightarrow HOBr + H^+ + 2\ e^-$	١,٣٣-
Manganous	$Mn^{+2} + 2H_2O \rightarrow MnO_2\ (s) + 4H^+ + 2\ e^-$	١,٢١-
Ferrous	$Fe^{+2} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3(s) + 3H^+ + e^-$	١,٠١-
Ammonium ion	$NH_4^+ + 3H_2O \rightarrow NO_3^- + 10H^+ + e^-$	٠,٨٨-
Nitrite	$NO_2^- + 2HO \rightarrow NO_3^- + H_2O + e^-$	٠,٨٤-
Hydrogen sulphide	$H_2S + 4H_2O \rightarrow SO_4^{-2} + 10H^+ + e^-$	٠,٣٠-
Hydrogen sulphide	$H_2S \rightarrow S(s) + 2H^+ + 2e^-$	٠,١٤-
Formic ion	$HCOO^- \rightarrow CO_2(g) + H^+ + 2e^-$	٠,٢٩

تفاعـــلات الأكســـــدة و الاختزال:

توصف حالة الأكسدة بعدد الأكسدة، وهو عبارة عن الشحنة التي تحملها الذرة إذا تفككت من الجزئ المحيط أو الأيون (تحدد مساهمة الإلكترونات إلى الذرة الأكثر سالبية كهربية)، وقد يكون عدد الأكسدة رقمًا موجبًا أو رقم سالبًا، وعادة يكون صحيحًا بين -٧، +٧ وقد يكون صفرًا كما في حالة الكبريت العنصري أو الأكسجين على سبيل المثال لا الحصر. لذلك فمفهوم عدد الأكسدة مرتبطا باتزان المعادلة الكيميائية.

المعادلات المتزنة:

هناك خطوتان للتعامل مع تفاعلات الأكسدة:

الخطوة الأولي: وفيها يتم التعرف على دور الأشكال الكيميائية الداخلة في التفاعل، فقد يكون متفاعل واحد عاملاً مؤكسدًا (أي المحتوى على ذرة أو أكثر يحدث لهم اختزال)، و متفاعل آخر يكون هو العامل المختزل (أي المحتوى على ذرة أو أكثر يقع عليهم الأكسدة).

الخطوة الثانية: وفيها يتم وزن المعادلة من حيث عدد الالكترونات المكتسبة من العامل المؤكسد وعدد الإلكترونات المفقودة من العامل المختزل، وبعد ذلك توزن ذرات الأكسجين بإضافة جزيئات ماء الى جانب معين و تضاف ايونات الهيدروجين لاستكمال اتزان المعادلة [٥، ٦].

أكسدة الحديدوز بفعل حامض الهيبوكلوراس:-

(٣/١٤) $2Fe^{2+} + HOCl + 5H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + Cl^- + 5H^+$

نصف التفاعل علي هذا النحو:-

(٣/١٥) $HOCl + H^+ + 2e^- \rightarrow Cl^- + H_2O \qquad E^\circ = 1.49V$

نصف التفاعل الثاني علي هذا النحو:-

(٣/١٦) $2Fe^{2+} + 6H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 2e^- + 3H^+ \quad E^\circ = -1.01V$

جهد الإلكترود للمعادلة الكاملة = حاصل جمع القيمتين ١،٤٩ ، -١،٠١ = ٠،٤٨ فولت.

وحيث أن جهد التفاعل موجب القيمة، فان المعادلة الكاملة يجب أن تحدث تحت الظروف القياسية مع التغيير في الطاقة الحرة وتساوي - ٢٢ كيلو سعر، وتحسب الطاقة علي هذا النحو:-

$$\Delta G^\circ = - nF E^\circ_{net} = - RT \ln K$$

$$= - 2\times 23 \times 0.48 = - 22 \text{ k cal}$$

ويمكن حساب ثابت الاتزان كما يلي:-

$$\ln K = \Delta G^\circ / RT = - nF E^\circ_{net} / RT$$

$$\frac{-22 \text{ kcal}}{(1.98 \times 10^{-3} \text{ kcal/deg})(298 \text{ deg})}$$

$$=37.286 \qquad \log K = \ln K/2.3$$

$$\log K = 37.286/2.3 = 16.2$$

$$k = 1.6 \times 10^{16}$$

هذا يعنى أن التفاعل يسير في الاتجاه الأيمن، وفي الظروف غير القياسية، فإن جهد التفاعل يمكن أن يُحسب من معادلة "نرنست" كما يلي:-

(٣/١٧) $E = E^\circ - 2.303/nF \times RT \log [Product]^n / [Reactants]^m$

لوغاريتم النواتج و المتفاعلات هو لوغاريتم النشاطية (التركيز) مرفوعة للأس المعبر عن معاملات الاتزان (n, m). ويصبح الجهد لمعادلة أكسدة الحديدوز باستخدام الكلور كما يلي:-

$$E = E^{\circ} - 0.0591/2 \times \log [Fe(OH)_3]^2 [H^+]^5 [Cl^-] / [Fe^{2+}]^2 [HOCl][H_2O]^5 \quad (٣/١٨)$$

فإذا افترضنها أن تركيز ايون الهيدروجين (H^+) = ١٠$^{-٦}$ مول وتركيز حامض الهيبوكلوراس = ١٠$^{-٤}$ مول، وتركيز ايون الحديدوز = ١٠$^{-٥}$ مول ، وتركيز الكلوريد = ١٠$^{-٣}$ مول، فحينئذ يكون جهد التفاعل (E) كما يلي:-

$$= 0.48 - 0.0591/2 \times \log [10^{-6}]^5 [10^{-3}] / [10^{-5}]^2 [10^{-4}] \quad (٣/١٩)$$

وحيث أن هيدروكسيد الحديديك راسب و الماء مذيب في المعادلة (٣/١٨) فقد اعتُبرتْ قيمة تركيزهما واحدًا صحيحًا.

وبالتالي يكون جهد التفاعل = ٠,٤٨ – (- ٠,٥٦) = ١,٠٤ فولت ، هذا يعني انه تحت الظروف الطبيعية الفعلية يكون التفاعل أكثر ملائمة من الظروف القياسية النظرية نظرًا لان جهد التفاعل أكبر من الجهد القياسي للتفاعل (٠,٤٨ فولت).

أنواع التفاعلات التي تحدث أثناء معالجة الماء بالكلور

سوف نناقش هنا حدوث تفاعلات أكسدة معينة، هل هناك تفاعلات معينة للأكسدة يمكن أن تحدث ؟ أم لا وكيف تكون سرعاتها إن كانت تحدث؟ و بأي آلية أو مسار تسير مثل هذه التفاعلات لكي تعطى نواتج؟.

تتكون نواتج ثانوية لعملية لتطهير بالكلور نتيجة حدوث نوعين من التفاعلات:-

- **تفاعلات إضافة**
- **تفاعلات إحلال**

ويمكن تقسيم تفاعلات الأكسدة بوجه عام إلى الآتي : -

- تفاعلات تتطلب انتقال الإلكترون.
- تفاعلات تتطلب انتقال ذرة أو مجموعة ذرات.

كما يمكن تقسيم تفاعلات الأكسدة كالآتي:

- تفاعلات تتطلب أشكالاً كيميائية ذات الكترونات مزدوجة (أيونية).

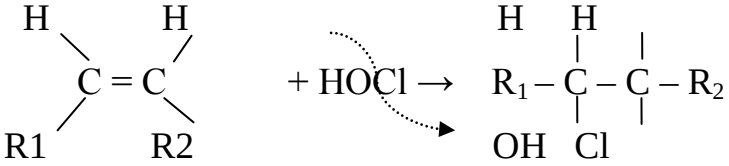
- تفاعلات تتطلب أشكالاً كيميائية ذات الكترونات غير مزدوجة (شقوق).

وتعتبر تفاعلات الكلور المائي هي سلسلة واسعة من التفاعلات الأيونية، [٢] وسوف تكون محل المناقشة كما يلي:

أولاً : تفاعل إضافة إلى رابطة أوليفينية

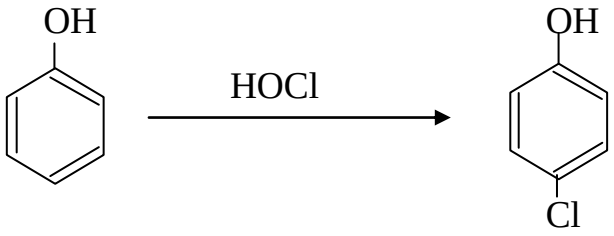
يضاف حامض الهيبوكلوراس إلى الرابطة الأوليفينية (الرابطة المزدوجة) مكونًاً هالوهيدرين، وهذا التفاعل محب للإلكترونات؛ حيث تتم المهاجمة الأولية بذرة الهالوجين من الحامض (HOX) لكي تضاف تلك الذرة على الكربون ويتكون أيون كربون أكثر ثباتًاً (قاعدة ماركونى كوف) وتصبح ذرة الأيون الأخرى أيون كربون لا تلبث أن تتفاعل لاحقاً مع الهيدروكسيد أو مع الماء.

(٣/٢٠)



ثانياً: تفاعل احلال " أروماتي" منشط

يحدث الإحلال الأيوني النشط مع المركبات الأروماتية كما هو الحال مع تفاعلات الإضافة، ويؤدى هذا النوع من التفاعل إلى تكون مركبات الهاليدات العضوية، وتحدث هذه التفاعلات الإحلالية و الأروماتية بسهولة عندما يرتبط عامل الإحلال المانح للإلكترونات مع حلقة البنزين، وتقوم المجموعة الوظيفة الموجودة على تلك الحلقة (مثل:OH, NH_2) بخلق شحنة سالبة جزئية على موقعي الأورثو والبارا (ذرة الكربون الأقرب والأبعد عن المجموعة الوظيفية على التوالي)، يقوم الهالوجين بمهاجمة واحدة من ذرتي الكربون وفيما بعد يحدث فقد لمجموعة الهيدروكسيد من الجزيء (HOX)وإزاحة لذرة الهيدروجين من ذرة الكربون التي وقع عليها الهجوم.



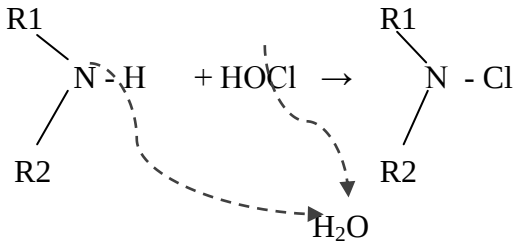
ماء + كلوروفينول → حامض هيبوكلوراس + فينول (٣/٢١)

ثالثاً: تفاعل إحلال "الأليفاتي" على نيتروجين:

يتم الإحلال للأشكال الأليفاتية من خلال تفاعل متعدد الخطوات (تفاعل هالوفورم) شكل (٣/٢). عندما يحدث إحلال أو انتقال الهالوجين على ذرة نيتروجين ينتج مركب نيتروجين هالو عضوي نشط نسبيًّاً. يحتفظ هذا المركب ببعض القدرات على الأكسدة مثل حامض الهيبوكلوراس وبالتالي فهذا التفاعل يستهلك المزيد من عامل الأكسدة و التطهير.

وهنا يجدر التنويه إلى أن تفاعلات الإحلال مع المركبات العضوية النيتروجينية تزداد كلما زادت قاعدية ذرة الهيدروجين.

(٣/٢٢)



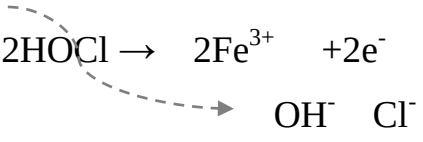
يصاحب تفاعلات الأكسدة بالكلور تكوّن كلوريدات غير عضوية وأشكال أخرى مؤكسدة غير كلورية، وعندما تحدث الأكسدة لمركبات عضوية تضاف ذرة أكسجين مثلما يحدث في حالة أكسدة الألدهايد الى حامض كربوكسيلي، كما في المعادلة التالية:

(٣/٢٣)

تعمل تفاعلات الأكسدة على تحويل الهيدروكربونات غير المشبعة الى كحولات ثم إلى الدهيدات وكيتونات وفي النهاية إلى أحماض كربوكسيلية .

وفى بعض ظروف الأكسدة (الرقم الهيدروجيني والقلوية)، لا يحدث انتقال لذرات، و تكون الأكسدة مصحوبة فقط بانتقال الكترونات كما في حالة أكسدة أيون الحديدوز إلى حديديك كما في المعادلة الآتية:

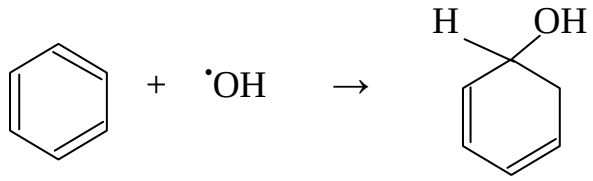
(٣/٢٤)



وبالإضافة إلى التفاعلات الأيونية فهناك عديد من التفاعلات التي تتضمن شقوقًا حرة تتكون بعد إضافة العوامل المؤكسدة إلى مياه الشرب، و تحدث هذه النوعية من التفاعلات مع الأوزون و ثاني أكسيد الكلور؛ وخصوصًا مع عمليات الأكسدة المتطورة.

فمثلاً : إضافة الأوزون سوف تؤدى إلى بعض التحلل و تكوين لاحق لشقوق هيدروكسيل ($OH^{\bullet}$) و تدخل هذه الشقوق النشطة في تفاعلات تؤدى إلي تكوين شقوق جديدة من خلال تفاعلات أكثرها تفاعلات الإضافة لشق الهيدروكسيد وانتقال إليكترون من خلال الأكسدة للشقوق، وتفاعل أكسدة بشق الهيدروكسيد المصاحب بانتقال إلكترون مفرد و انتزاع هيدروجين كما في الأمثلة الآتية:-

(٣/٢٥)



بنزين　　فينول

(٣/٢٦)

كحول ميثيلي

(٣/٢٧)

ايون حديدوز　　ايون حديديك

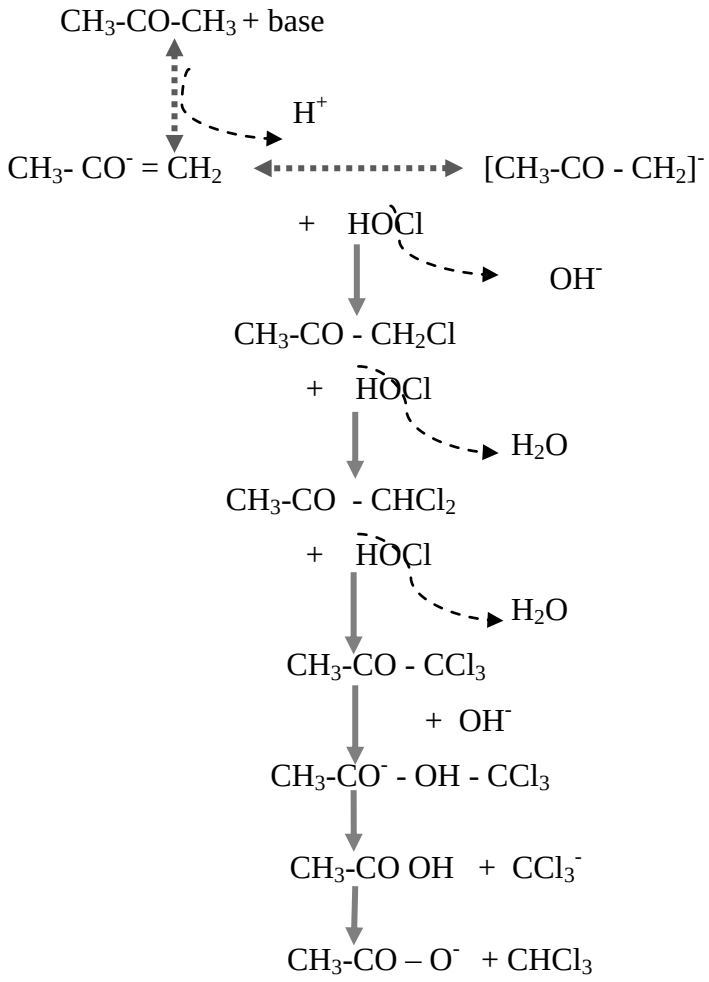
العوامل الحفازة للأكسدة

تتأثر تفاعلات الأكسدة بوجود عوامل حفازة وهذه العوامل هي عبارة عن مركبات تقوم بتغيير معدل التفاعل بدون أن يحدث لها تغير أو استهلاك، فهي تساهم في الخطوة المؤثرة على معدل التفاعل ثم يعاد تنشيطها مرة أخرى فى خطوة لاحقه من التفاعل.

وبوجه عام؛ فالعوامل الحفازة تعطى مسارًا بديلًا للتفاعل وتعمل على زيادة معدل الأكسدة الكيميائية.

تتطلب أكثر العوامل الحفازة مشاركة الأحماض والقواعد، فالأحماض تتضمن إشراك أيون الهيدروجين (إعطاء بروتون)، و القواعد تتضمن إشراك أيون الهيدروكسيد (اكتساب بروتون).

مثال : تفاعل حفز قاعدي (تفاعل الهالوفورم) في هذا التفاعل تتمثل الخطوة المحددة لمعدل التفاعل، في فقد بروتون وتكوين اينول (enol).



شكل (٣/٢) تفاعل الهالوفورم

نلاحظ في شكل (٣/٢) أن أي قاعدة قوية سوف تفي بالغرض وهذه القاعدة (الهيدروكسيد) المستهلكة في الخطوة الأولى أعيد تجديدها في الخطوة الثانية.

وهناك نوع آخر من تفاعلات التحفيز الهامة في تفاعلات الأكسدة، تأتى فى البداية بالتفاعل المتسلسل للشقوق الحرة و مثال لذلك تحلل الكلور بفعل الحديد والأوزون بفعل الهيدروكسيد[٧].
وفى كل حالة من حالات الأكسدة، فإن العامل المؤكسد الأصلي لا يتفاعل مع بعض المركبات مثل:

الأوكزلات، بينما في وجود عامل حفاز كافٍ يسبب حدوث ركلة البداية للتحلل، ثم تتوالي متسلسلة من التفاعلات المنتشرة المتلاحقة و تتحول الأوكزلات في النهاية إلى ثاني أكسيد الكربون.

فى بعض الأحيان يكون التحفيز ذاتيًّا، وهذا التفاعل يزداد في سرعته مع استمراره مثلما يحدث عند أكسدة المنجنيز باستخدام الأكسجين الجزيئي و يمكن حساب معدل التفاعل كما يلي[٨] :

$$d[Mn^{2+}]/dt = k_o[Mn^{2+}] + k[Mn^{2+}][MnO_2] \quad (٣/٢٨)$$

$$K = k_1[OH^-]^2 pO_2 \quad (٣/٢٩)$$

تشير المعادلة السابقة الى أن معدل أكسدة المنجنيز يزداد كلما زاد تكوين ثانى أكسيد المنجنيز (MnO_2)، الذي يعتبر عامل حفاز يساعد على استمرار الأكسدة، وتفسير ذلك هو أن أيون المنجنيز $[Mn^{2+}]$ يمتص على سطح أكسيد المنجنيز الصلب و يتكون مركب معقد سطحي يكون فيه أيون المنجنيز أكثر نشاطاً و قابلية للأكسدة عنه وهو فى حالته الحرة.

تأثير الرقم الهيدروجيني و درجة الحرارة على كفاءة الأكسدة:-

تتأثر تفاعلات الأكسدة بالتغيير في الرقم الهيدروجيني، وهذا يرجع إلى أن عوامل الأكسدة قابلة لتغيير الآلية تحت الظروف الحامضية أو القاعدية كما سنوضح فيما يلي:

يتواجد الكلور في ثلاثة أشكال رئيسية في المحاليل المائية اعتمادا علي الرقم الهيدروجيني (شكل ٣/٤):

- الكلور الغازي عند الرقم الهيدروجيني المنخفض (أقل من ٢)
- الهيبوكلوراس عند الرقم الهيدروجيني (٢ – ٦)
- الهيبوكلورايت عند رقم هيدروجين (أكبر من ٦)

يختلف نشاط كل واحد من الثلاثة، ويمكن ملاحظة ذلك عند إجراء الأكسدة عند أرقام هيدروجينية مختلفة.

يعتمد نشاط الأوزون بنسبة كبيرة على الرقم الهيدروجيني، فمثلاً عند رقم هيدروجيني من ٨ – ٩ يتحلل الأوزون ويعطى شق هيدروكسيد نشط جدّاً ($OH^{\bullet}$)، و يتغير معدل الأكسدة بالأوزون عند الأرقام الهيدروجينية العالية.

تؤثر درجة الحرارة تأثيرًا كبيرًا على معدلات التفاعل الكيميائي و بوجه عام فإن ثابت معدل التفاعل الكيميائي (K) يزيد مع زيادة درجة الحرارة تبعًا للدالة اللوغارتمية الآتية:-

$$\ln K = - E_a/RT \qquad (٣/٣٠)$$

حيث : E_a = ثابت (طاقة التنشيط)

مع زيادة درجة الحرارة بمعدل ١٠°م يتضاعف معدل التفاعل، وفى مجال معالجة المياه يقل معدل الأكسدة بانخفاض درجة الحرارة.

مسارات تفاعلات التطهير فى معالجة مياه الشرب

تحدث تفاعلات معقدة للغاية أثناء تطهير مياه الشرب، فقد تبدأ بالتحليل المائي للمطهر وتفاعلات متسلسلة بواسطة الشقوق الحرة وتفاعلات يتبعها إعادة ترتيب، ثم بعد ذلك تحدث عمليات أخرى غير الأكسدة. فتكوين مركبات الهالوميثان من خلال آليات عديدة مختلفة. و سوف نتناول آلية تفاعل الهالوفورم (شكل ٢/٢) الذي يشتمل على إحلال الكلور على خطوات أثناء التفاعل مع ميثيل كيتون.

يبدأ تفاعل الهالوفورم بدخول الكلور المحفز بقاعدة مؤديًا في النهاية إلى تكوين حامض كربوكسيلى وكلوروفورم. وهذا التفاعل كما ذكرنا محفز بقاعدة لأن الشكل الذي يتفاعل مع حامض الهيبوكلوراس هو شكل الاينول للمثيل كيتون: ($CH_3\text{-}CO^- =CH_2$)

ويخضع هذا التفاعل لإحلال إلكترون مكونًا وسيط أحادي الكلور، ومع وجود كلور على ذرة الكربون يحدث تعجيل من التفاعل اللاحق لإكمال الكلورة.

تتعرض الوسائط الناتجة إلى تحلل مائي محفز بقاعدة مثل مركب ثلاثي كلورو اسيتيل ($CH_3\text{-}$) (CCl_3) – CO^- الذي يتحول إلى ثلاثي كلوروميثان وحامض كربوكسيلى + ($CH_3\text{-}CO - O^-$) $CHCl_3$). وإذا كان حامض الهيبوكلوراس هو الشكل الهالوجيني الوحيد في التفاعل فسوف ينتج الكلوروفورم. ومع تكون الاينول يستمر التفاعل بسرعة؛ حيث أن الخطوة المحددة للتفاعل هي استهلاك الاينول. ويمكن التعبير عن معدل التفاعل بالمعادلة الآتية:

$$d[CH_3COCH_3]/dt = - k[CH_3COCH_3] \qquad (٣/٣١)$$

تحت ظروف معالجة مياه الشرب (أي أن الرقم الهيدروجيني يقترب من التعادل، و يكون الكلور المتبقي منخفضاً) قد يتكون حامض داي كلورواسيتيك، وقد يتعرض مركب تراي كلورو بروبانون لمزيد من الإحلال بالكلور المحفز بقاعدة مكونًا مركب بنتا كلوروبروبانون[٩]، وهذا المركب يتحلل في الماء مكونًا كلوروفورم وحامض داي كلورواسيتيك.

ويمكن صياغة معدل تفاعل تراي كلوروبروبانون علي النحو التالي:

$$d[CH_3COCH_3]/dt = \{k_1k_2[HOCl][P_T]/k_{-1}[P_T]+k_2[HOCl]+k_3[OCl^-]+ k_4[OH^-]\} \quad (٣/٣٢)$$

هذا القانون المعقد لمعدل التفاعل يعكس تأثير التحفيز بأيون الهيبوكلوريت (OCl^-)، والهيدروكسيد (OH^-)، والفوسفات(P_T).

العوامل المطهرة (المؤكسدة) المستخدمة فى معالجة مياه الشرب

أولًا: الكلـــور:

لقد تم تحضير الكلور في عام ١٧٧٤، في عام ١٨٣١ استخدم كمطهر أثناء اندلاع الكوليرا في أوروبا، وقد كان أول استخدام للكلور كمطهر للمياه في عام ١٩٠٨ في الولايات المتحدة الأمريكية.

ومع استخدام الكلور في تطهير المياه حدث خفضاً دراماتيكياً لمرض التيفؤيد في عام ١٩١٨.

وقد كانت الأمونيا تضاف مع الكلور أو قبله لتكوين مركبات الكلورامين بهدف تثبيت الكلور المتبقي في المياه ليمكث فترة أطول في شبكات التوزيع و أيضاً لكي يمنع تكوين مركبات الكلوروفينول المسببة للمذاق غير المقبول للمياه، وكذلك لمنع تكوين المواد المسببة للروائح غير المقبولة ومع عدم توفر الأمونيا أثناء الحرب العالمية الثانية وعدم إدراك أهمية تواجد الكلور الحر كمطهر أدى هذا إلى تناقص استخدام الأمونيا في تطهير المياه مع الكلور.

ويُعتبر الكلور من أكثر مواد التطهير المؤكسدة المستخدمة في محطات معالجة المياه، ولم يثبت له تأثير عكسي على صحة الانسان والحيوان[١٠] وهو يتواجد في صورة سائلة أو غازية في اسطوانات معدنية تحت تأثير ضغط، أو في صورة محلول مركز مائي (هيبوكلوريت الصوديوم)، أو في صورة صلبة (هيبوكلوريت الكالسيوم). وهذه الأشكال الثلاثة جميعها متكافئة كيميائيًا. فعندما يضاف الكلور الغازي الى المياه يحدث اتزان سريع بين الصورة الجزيئية و نواتج التحليل كما يلي:

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + H^+ + Cl^- \qquad (٣/٣٣)$$

$$\text{ثابت الاتزان لهذه المعادلة} = \frac{[HOCl][H^+][Cl^-]}{[Cl_{2aq}]} \qquad (٣/٣٤)$$

$$= ٥ \times ١٠^{-٤} \text{ عند } ٢٥°م$$

يشير هذا الثابت الى أن تركيز الكلور الجزيئي (Cl_2) في المحلول يمثل نسبة صغيرة من الكلور الكلى، وفيما عدا عند الرقم الهيدروجيني المنخفض (أقل من ١) شكل (٣/٤) أو عند التركيزات العالية من الكلوريد.

غاز الكلور غاز كثيف له لون أصفر يميل للاخضرار وترجع تسميته الى الكلمة اليونانية كلوروس وتعنى الأصفر الشاحب. وعندما يتعرض هذا الغاز لضغط متزايد أعلى من ضغطه البخاري يتكثف ويتحول إلى سائل مع انطلاق طاقة حرارية مع تناقص لحجمه النوعي إلى ما يقرب ٤٥٠ مرة من حجمه الأصلي، لذلك يتم الشحن التجاري لهذا الغاز مضغوطا فى اسطوانات من الصلب الخاص (تحت ضغط ٦ - ٨ بار).

يجب أن يكون الحد الأدنى لدرجة نقاء الكلور ٩٩,٥ % والنسبة المتبقية والتي تمثل ٠,٥ % عبارة عن ماء وثاني أكسيد كربون ونيتروجين وبروم وزئبق وحديد ومكونات أخرى. وغاز الكلور أثقل من الهواء بحوالي ٢,٥ مرة. (جدول ٣/٣)

جدول (٣/٣) خصائص غاز الكلور[١١]

البند	البيان
الصيغة الكيميائية	Cl_2
الوزن الذري	٣٥,٤٥٣
الوزن الجزيئي	٧٠,٩٠٦
الكثافة (عند صفر °م وضغط ١٠١٣ ملي بار)	٣,٢١٤ جرام/لتر (غاز)
الكثافة (عند درجة الغليان وضغط ١٠١٣ ملي بار)	١٥٦٢,٥ جرام/لتر (سائل)
الكثافة الحرجة	٥٧٣ جرام/لتر
الوزن النوعي (بالنسبة للهواء الجوي)	٢,٤٨٦
حجم ١ كجم كلور (عند درجة حرارة صفر °م وضغط ١٠١٣ ملي بار)	٣١١ لتر
اللزوجة (كلور سائل) عند صفر °م	٠,٣٨٦٣ ملي باسكال. ثانية
اللزوجة (كلور غاز) عند صفر °م	٠,٠١٢٥ ملي باسكال. ثانية
درجة الإسالة عند الضغط الجوي المعتاد	ـ ٩٨ الى ـ ١٠٠ °م
درجة الغليان عند ١٠١٣ ملي بار	ـ ٣٤,٠٥ °م
درجة الانصهار	ـ ١٠٠,٩٨ °م
الضغط البخاري عند ٢٠°م	٦,٧٣ بار
الضغط الحرج	٦,١ ضغط جوي
درجة الحرارة الحرجة	١٤٤ °م
الحجم الحرج	٠,٠٠١٧٧٥ لتر/جرام

غاز الكلور من الغازات السامة عند التركيزات العالية، وقد حددت المواصفات القياسية المحلية والعالمية حدًا أقصى لتركيز الكلور في بيئة العمل؛ بحيث لا تتجاوز تركيزاته في الهواء ١ جزء في المليون[١٠، ١٢] . يوضح جدول (٣/٤) تأثيرات التعرض لتركيزات مختلفة من الكلور في الهواء، ولابد من توفر سبل الوقاية من خلال اتباع احتياطات السلامة والصحة المهنية مع توفر آلية احتواء الغاز في حالة حدوث تسرب.

جدول (٣/٤) تأثيرات التعرض لتركيزات من الكلور في الهواء الجوي[١١]

تركيز الكلور في الهواء (جزء/مليون)	تأثير استنشاق الغاز
٠,١	الشعور بالرائحة المميزة للغاز
١	حدوث أعراض بسيطة عند التعرض لعدة ساعات (الحد الأقصى المسموح في بيئة العمل)
٣ ـ ٤	شعور الأنف العادي برائحة الكلور المميزة.
٤	الحد الأقصى للتعرض بدون خطورة لمدة من ٣٠ الى ٦٠ دقيقة
١٠ – ١٥	احتقان الحلق وتهييج للجهاز التنفسي
٣٠	كحة ودموع مصاحب بعطس
٤٠ – ٦٠	حدوث تأثيرات خطيرة بعد ٣٠ دقيقة من التعرض
١٠٠	ظهور علامات التسمم الذي يؤدي إلى الوفاة في أقل من ٣٠ دقيقة
١٠٠٠ فأكثر	الموت في دقائق معدودة

يعبر عن تركيز الكلور في أملاح الهيبوكلوريت من خلال تعيين الكميات المتكافئة الكتروكيميائيًّا للكلور الجزيئي (Cl_2) بتلك الأملاح. توضح المعادلة (٣/٣٥) أن مولاً واحدًا من الكلور العنصري يتفاعل مع ٢ إلكترون ويتكون الكلوريد الخامل كما يلي:

$$Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2Cl^- \qquad (٣/٣٥)$$

وتوضح المعادلة (٣/٣٦) أن واحد مول من أيون الهيبوكلوريت يتفاعل مع ٢ إلكترون لتكوين كلوريد خامل علي النحو التالي:

$$OCl^- + 2H^+ + 2e^- \rightarrow Cl^- + H_2O \qquad (٣/٣٦)$$

لذلك فإن واحد مول من الهيبوكلورايت يكافئ الكتروكيميائيًّا واحد مول من الكلور العنصري والذي يحتوى على ٧٠,٩١ جرام كلور (٣٥,٤٥ × ٢ = ٧٠,٩١ جرام مول).

يحتوي الواحد مول من هيبوكلوريت الكالسيوم [$Ca(OCl)_2$] على اثنين مول من الهيبوكلورايت، بينما يحتوي الواحد مول من هيبوكلوريت الصوديوم (NaOCl) على واحد مول من الهيبوكلورايت، وكنتيجة لذلك فإن، ١مول من هيبوكلوريت الكالسيوم = ١مول من الكلور الجزيئي (أي ٢ × ٣٥,٤٥

= ٧٠,٩٠جرام كلور متاح)، ومن خلال حساب الوزنين الجزيئيين لكل من هيبوكلوريت الكالسيوم و هيبوكلوريت الصوديوم ، فنجد أنهما ١٤٣ ، ٧٤,٥ على التوالي، لذلك فإن التحضيرات النقية لكلا المركبين تحتوى ٩٩,١٦% و٩٥,١٧% بالوزن كلور متاح (وذلك من خلال حساب الأوزان المكافئة لكل مادة).

يتواجد هيبوكلوريت الكالسيوم تجاريا كمادة صلبة، ومع الوقت يتعرض لفقد نسبة من الكلور (٠,٠١٣% في اليوم)[٩]. و تنتج منه أقراص، يمكن استخدامها في وحدات المعالجة الصغيرة. يوضح جدول (٣/٥) المواصفات القياسية لكل من هيبوكلوريت الكالسيوم وهيبوكلوريت الصوديوم.

جدول (٣/٥) المواصفات القياسية لمحلول هيبوكلوريت الصوديوم[١٣] ومحلول هيبوكلوريت الكالسيوم[١٤]

المطهر	هيبوكلوريت الصوديوم	هيبوكلوريت الكالسيوم
تركيز الكلور المتاح (Cl_2)	لا يقل عن ٦٠ جرام/لتر للأغراض الصناعية من ٤٠ – ٦٠ جرام /لتر للأغراض المنزلية	لا يقل عن ٦٠جرام/لتر
القلوية (جرام/لتر)	لا تقل عن ١٠ % من نسبة الكلور المتاح (هيدروكسيد صديوم)	لا تقل عن ٧ جرام/لتر ولا تزيد عن ١٠ جرام/لتر (هيدروكسيد كالسيوم)
الرقم الهيدروجيني	١١ صناعي ١١ منزلي	-
الكلورات (جرام/لتر)	لا تزيد عن ٠,٥٠ للأغراض الصناعية لا تزيد عن ٠,٢٥ للأغراض المنزلية	لا تزيد عن ٣ (كلورات كالسيوم)
الكلوريد (جرام/لتر)	-	لا يزيد عن ٧٥ (كلوريد كالسيوم)
الحديد (جزء/مليون)	١	-
النحاس (جزء/مليون)	١	-
النيكل (جزء/مليون)	١	-
المواد العالقة (جرام/لتر)	-	١٥

وقد يُنتج محلول هيبوكلوريت الصوديوم على هيئة محاليل يتراوح تركيزها ما بين ١ إلى ١٦% ، وجدير بالذكر؛ فإن المحاليل ذات التركيزات العالية ليست عملية لأن الثبات الكيميائي لتلك المحاليل يقل بمعدل سريع مقارنة بالمحاليل المخففة، وعند درجات الحرارة العالية فإن فترة نصف العمر لمحاليل هيبوكلوريت الصوديوم تتراوح ما بين شهرين للتركيز ١٨ %، وأربع سنوات للتركيز ٣ % كلور[١٥].

ولا بُد من الأخذ في الاعتبار أن فقدان تركيز محاليل هيبوكلوريت الصوديوم يعني تحولها إلى نواتج ثانوية قد تكون غير مرغوبة فيها.

ومن الناحية الديناميكية الحرارية؛ فإن التحلل الذاتي للهيبوكلوريت إلى الكلورات يحدث بصورة كبيرة علي النحو الآتي[١٧]:

$$3OCl^- \rightarrow 2Cl^- + OCl_3^- \qquad (٣/٣٧)$$

هيبوكلوريت — كلورات

تتراوح تركيزات الكلورات في محاليل هيبوكلوريت الصوديوم في محطات المياه ما بين ١,٧ إلى ٢,٢% من التركيز الكلى للكلور المتاح[١٦،١٧]. ويتحكم في هذا التحلل الذاتي العوامل الآتية[١٨]:

- التركيز الأولى لمحلول الهيبوكلوريت.
- فترة التخزين بدايةً من تاريخ الإنتاج.
- درجة الحرارة العالية أو اشعة الشمس أو كلاهما.
- الرقم الهيدروجيني.
- وجود عامل حفاز فلزى.

عندما يضاف مركب يحتوى على كلور إلى الماء المحتوية على نيتروجين (كلدال)، أو نيتروجين عضوي، أو أي مواد أخرى تستهلك الكلور، فانه يتفاعل معها إلى أن يحدث الاتزان بين الأشكال الكيميائية المختلفة في الماء.

ويطلق مصطلح كلور حُر على مجموعة تركيزات الكلور الجزيئي (Cl_2) و حامض الهيبوكلوراس($HOCl$) وأيون الهيبوكلوريت (OCl^-).

ذوبانية الكلور في الماء

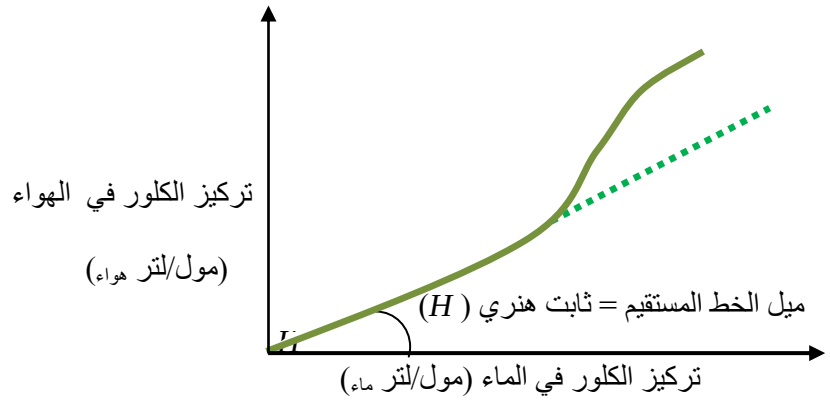
الكلور من الغازات التي عندما تذوب في الماء، تتفاعل مع الماء ومع بعض المكونات القابلة للتفاعل، ويمكن التعبير عن التحلل الذي يحدث للكلور الغاز، ليكون كلور جزيئي ذائب، باتزان الحالة على النحو الآتي:-

$$Cl_{2\ (gas)} \rightarrow Cl_{2\ (aq)}$$

كلور غازي كلور مائي

يوضح قانون هنري ذوبانية الكلور كما يلي:-

$$H_{(mol./L.atm)} = [Cl_{2\ (aq)}]/P\ Cl_2$$



شكل (٣/٣) توزيع تركيز الكلور بين الحالة الهوائية والحالة المائية عند الاتزان عند درجة حرارة ثابتة

$$\text{ثابت هنري (H)} = \frac{\text{تركيز الكلور في الوسط الغازي } [p\ Cl]}{\text{تركيز الكلور في الوسط المائي } [Cl_{2\ (aq)}]} \qquad (٣/٣٨)$$

- $[Cl_{2(aq)}]$: تعبر عن التركيز بالمول.
- $[pCl]$: الضغط الجزيئي للكلور في الحالة الغازية في الهواء.
- H : ثابت هنري و قد اشتُق من المعادلة الآتية[١٩]:-

$$H = 4.805 \times 10^{-6}\ \exp(2818.48/273+25)\ (mol./l\text{-}\ atm) \qquad (٣/٣٩)$$

$$= 0.062\ mol/l\text{-}atm.$$

يتفاعل الكلور المائي الذائب في الماء و يكوّن حامض هيبوكلوراس و ايونات كلوريد و بروتونات كما في المعادلة التالية:-

$$Cl_{2\,(aq)} + H_2O \rightarrow H^+ + HOCl + Cl^- \qquad (٣/٤٠)$$

محلول الكلور　　حامض هيبوكلوراس　　كلوريد

$$K_H = [H^+][HOCl][Cl^-] / [Cl_{2(aq)}]$$
$$= 2.581\ Exp\ (-2581.93/T)\ (mol^2/L^2) \qquad (٣/٤١)$$
$$= -14.93\ mol^2/L^2$$

هذا التفاعل يصل إلى الاكتمال في وقت قصير للغاية[٢٠]، و تحدث فيه تفاعلات بين الكلور الجزيئي الذائب وأيونات الهيدروكسيد، ونرى في هذا التفاعل أن تكافؤ الكلور تغير من صفر في حالة الكلور الجزيئي إلى +١ في حالة مركب الهيبوكلوراس و -١ في حالة الكلوريد (معادلة ٣/٤٠).

يقل التحلل المائي للكلور مع تناقص الرقم الهيدروجيني، ويقل أيضًّاً مع زيادة ملوحة الماء، لذلك تزيد ذوبانية الكلور بإضافة قلوي أو باستخدام مياه عذبه.

يتكون حامض الهيبوكلوراس من التحلل المائي للكلور وهذا الحامض ضعيف ويتحلل طبقًا للمعادلة الآتية:-

$$HOCl \leftrightarrow OCl^- + H^+ \qquad (٣/٤٢)$$

$$Ka = \frac{[H^+][OCl^-]}{[HOCl]} \qquad pK_a = 7.5$$

تربط العلاقة التالية بين ثابت K_a ودرجة الحرارة:[٢١]

$$\ln (Ka) = 23.184 - 0.0583T - 6908/T$$

حيث: T = درجة الحرارة بالدرجة المطلقة (كلفن) = (درجة سليزية + ٢٧٣)

$C_{T,Cl}$ = مجموع أشكال الكلور　　a = النسبة الكمية لكل نوع

توضح المعادلات (٣/٣٨ – ٣/٤٢) أن الضغط البخاري للكلور فوق المحلول يعتمد على الرقم الهيدروجيني، فيقل هذا الضغط مع زيادة الرقم الهيدروجيني بسبب زيادة تكوين أيون الهيبوكلوريت

غير المتطاير، لذلك فان إضافة قلوي مثل الجير أو بيكربونات الصوديوم يقلل من قابلية الكلور للتطاير عندما تحدث انسكابات أو تسرب مما يقلل من خطر التعرض للكلور.

ويوضح شكل (٣/٤) تأثير الرقم الهيدروجيني علي توزيع أشكال الكلور الحر ما بين الكلور الجزيئي (Cl_2) وحامض الهيبوكلوراس (HOCl)، وأيون الهيبوكلورايت (OCl^-).

تؤدى الخصائص الحامضية للكلور الغازي والقاعدية لأملاح الهيبوكلوريت الى فقد أو اكتساب قلوية على التوالي، ويترتب علي ذلك أيضًا نقص وزيادة في الرقم الهيدروجيني على التوالي:

- فإضافة واحد مول من الكلور الحر (كلور جزيئي (Cl_2) الى الماء يحدث نقص متكافئ من القلوية
- وإضافة واحد مول من هيبوكلوريت صوديوم (HOCl) أو ٠,٥ مول من هيبوكلوريت الكالسيوم $Ca(OCl)_2$ يؤديان الى زيادة متكافئة في القلوية.

مثال توضيحي:

محلول كلور يحتوي على ٠,٥ % كلور عند رقم هيدروجيني ٣. احسب الضغط البخاري عند الاتزان لهذا المحلول علمًا أن درجة الحرارة ٢٥°م وقيمة ثابت التحلل المائي $(K_H) = ٤,٥ \times ١٠^{٤}$ عند هذه الدرجة.

معادلة التفاعل:-

$$Cl_{2(aq)} + H_2O \rightarrow HOCl + OCl^- + H^+ + Cl^-$$

$$\text{ثابت التحلل المائي} = \frac{[HOCl][OCl^-][H^+][Cl^-]}{[Cl_{2(aq)}][H_2O]}$$

وحيث أن الرقم الهيدروجيني منخفض بما لا يسمح بتفكك حامض الهيبوكلوراس لتكوين أيون الهيبوكلورايت (انظر الشكل ٣/٤)، وبالتالي يمكن إهمال أيون الهيبوكلورايت، ويصبح تركيز الكلور الحر في المحلول على النحو التالي:

$$[Cl_{2(aq)}] + [H_2O] \rightarrow [H^+][Cl^-][HOCl]$$

$$[Cl_{2(aq)}] + [HOCl] = 5\ gm/l = 5/71 = 0.07\ mol/l$$

تمت القسمة على ٧١؛ حيث أن ١ مول من الكلور الذائب أو حامض الهيبوكلوراس يحتوي على ٧١ جرام من الكلور الحر المتاح.

وبناءً على ما تقدم تصبح معادلة الاتزان هي المعادلة الرباعية التالية:-

$$\frac{[H^+]\,[Cl^-][HOCl]}{[Cl_{2(aq)}} = 4.5 \times 10^4$$

وحيث أن الرقم الهيدروجيني = ٣، أي أن تركيز ايون الهيدروجين $[H^+] = 10^{-3}$ فتصبح المعادلة كالتالي:-

$$\frac{10^{-3}\,[Cl^-][HOCl]}{[Cl_{2(aq)}]} = 4.5 \times 10^4$$

$$\frac{[Cl^-][HOCl]}{[Cl_{2(aq)}]} = 4.5 \times 10^7$$

وحيث أن واحد مول من حامض هيبوكلوراس (HOCl) ينتج ١ مول كلوريد (Cl^-)، وإذا كان تركيز الكلوريد في المياه الخام المغذية لوحدة الكلور قليل جدا، فحينئذ يصبح تركيز الهيبوكلوراس [HOCl] = تركيز الكلوريد$[Cl^-]$. وبالتالي تصبح المعادلة السابقة على النحو الآتي:-

$$[HOCl]^2 = 4.5 \times 10^7 \times [Cl_{2(aq)}]$$

$$[HOCl] = (4.5 \times 10^7 \times [Cl_{2(aq)}])^{0.5}$$

$$= 6708 \times [Cl_{2(aq)}])^{0.5}$$

وبالتعويض عن [HOCl] في المعادلة : $[Cl_{2(aq)}] + [HOCl] = 0.07\ mol/l$ نجد أن:

$$[Cl_{2(aq)}] + [6708 \times [Cl_{2(aq)}])^{0.5} - 0.07 = 0$$

وحيث أن الرقم الهيدروجيني ٣، فهذا يعني أن الكلور الجزيئي Cl_2 مهمل التركيز (انظر شكل ٣/٤)، وعليه تصبح المعادلة الأخيرة على هذا النحو:

$$[6708 \times [Cl_{2(aq)}])^{0.5} - 0.07 = 0$$

$$[Cl_{2(aq)}])^{0.5} = 0.07/6708 = 10.4 \times 10^{-6}$$

$$[Cl_{2(aq)}] = 10.4 \times 10^{-11} \text{ mol/L}$$

يمكن حساب ثابت هنري من العلاقة (٣/٣٩) كما يلي:-

$$H = 4.805 \times 10^{-6} \exp(2818.48/298)$$

$$= 0.062 \text{ (L- atm/mole)}$$

وحيث أن ثابت هنري (H) = $\frac{\text{تركيز الكلور في الوسط الغازي [p Cl]}}{\text{تركيز الكلور في الوسط المائي [} Cl_{2\ (aq)} \text{]}}$

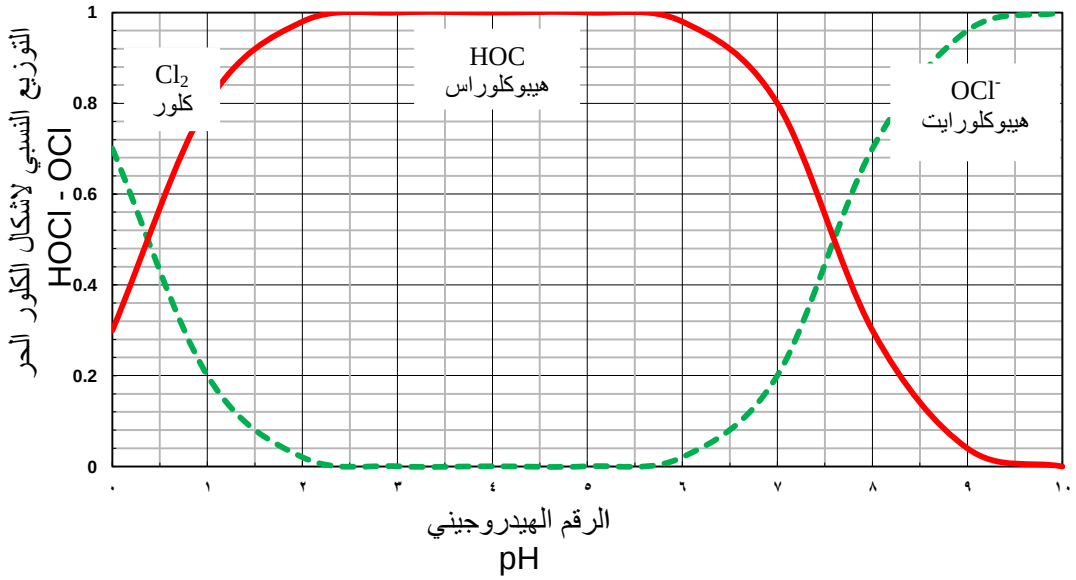
فيصبح الضغط الجزئي لغاز الكلور أو تركيز الكلور في الوسط الغازي [pCl] =

$$10.4 \times 10^{-11}/0.062 = 16.8 \times 10^{-10} \text{ atm}$$

$$= 16.8 \times 10^{-4} \text{ mg/l (ppm)}$$

$$= 1.68 \text{ ppb}$$

الحد الأقصى المسموح للتعرض للكلور ١ جزئ/ مليون لفترة قصيرة (١٥ دقيقة)، وبالتالي هذا التركيز ليس له تأثير صحي سلبي علي العاملين المعرضين له.[٢٢]



شكل (٣/٤) الكميات النسبية للثلاثة لأشكال الكلور عند الأرقام الهيدروجينية المختلفة[٢٣]

من خلال استعراض الشكل (٣/٤)، نلاحظ أنه عند رقم هيدروجيني "٢" و تركيز كلوريد ١٠-٣ مول (٣٥,٥مجم / لتر)، فإن ٢% فقط من الكلور الكلي يتواجد علي هيئة كلور جزيئي (Cl_2) وتجدر

الإشارة إلي أن الكلوريد الذي يتكون في المعادلة (٣/٤٠) يعتبر خامل من ناحية قدرته التطهيرية أو قدرته على الأكسدة ويعتبر حامض الهيبوكلوراس حامض ضعيف (pKa = 7.5) ويمكن حساب نسبة حامض الهيبوكلوراس إلى أيون الهيبوكلوريت علي النحو الآتي:-

$$\text{Log } [HOCl]/[Cl^-] = 7.5 - pH \qquad (٣/٤٣)$$

يعبر مجموع الأشكال الثلاثية (OCl^-, HOCl, Cl_2) عن الكلور الحر (مجم كلور Cl_2/ لتر).

ومن خلال المعادلات يتضح أن أشكال الكلور المتواجد في المياه تعتمد على الآتي:-

- التركيز الكلى للكلور.
- الرقم الهيدروجيني للماء.
- درجة حرارة الماء.

يوضح الشكل (٣/٤) الكميات النسبية للأشكال الثلاثة عند الأرقام الهيدروجينية المختلفة، فنجد أن حامض الهيبوكلوراس هو السائد في المدى من ١ – ٧,٥ ، ويصل إلي ٩٠ % عند رقم هيدروجيني ٦,٥ ويتناقص إلى ٥٠% عند رقم هيدروجيني ٧,٥ ويتساوى تركيز حامض الهيبوكلوراس مع تركيز أيون الهيبوكلوراس عند ٧,٥ وتجدر الملاحظة أن أيون الهيبوكلوريت يكون الأكثر عند الأرقام الهيدروجينية الأعلى من ٧,٥، ويبدو هذا واضحًا من المنحنى المتجه إلى أعلى لايون الهيبوكلوريت على حساب تناقص حامض الهيبوكلوراس ذي المنحنى المتجه إلى أسفل حتى ينتهي عند رقم هيدروجيني = ١٠.

ويمكن القول أن القدرة التطهيرية للكلور تصل إلى أقل ما يمكن ابتداءً من رقم هيدروجيني ٨ فأكثر وذلك لسيادة ايون الهيبوكلوريت ضعيف القدرة التطهيرية.

وحيث أن ثابت الاتزان يعتمد على درجة الحرارة؛ فهذا التوزيع المشار إليه بالشكل (٣/٤) سوف يتأثر كمًا مع ارتفاع و انخفاض درجة الحرارة.

تفاعل هيبوكلوريت الصوديوم مع الماء :

إذا أضيف الكلور إلى الماء على هيئة سائل هيبوكلوريت الصوديوم يحدث التفاعل الآتي:

$$NaOCl + H_2O \rightarrow Na^+ + OCl^- \qquad (٣/٤٤)$$

$$OCl^- + H_2O \rightarrow HOCl + OH^- \qquad (٣/٤٥)$$

تفاعل هيبوكلوريت الكالسيوم مع الماء

إذا أضيف الكلور الى الماء على هيئة حبيبات هيبوكلوريت الكالسيوم فيذوب فى الماء مكوناً أيون هيبوكلوريت الذي يتفاعل مع الماء مكوناً حامض الهيبوكلوراس كما يلي:-

$$Ca(OCl)_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2OCl^- \qquad (٣/٤٦)$$

$$OCl^- + H_2O \rightarrow HOCl + OH^-$$

يحدث توزيع تركيزات الأشكال المختلفة للكلور كما ذكرنا من قبل وفق المعادلة (٣/٤٠ و ٣/٤٢) والشكل (٣/٤). وبغض النظر عن أي شكل من أشكال الكلور المضاف إلى المياه؛ فإنه يتكون أيون الهيبوكلوريت وحامض الهيبوكلوراس و الكلور الجزيئي كما تحدده الثوابت الكيميائية بالمعادلات السابقة (قوانين الاتزان الكيميائي).

والفرق الوحيد بين أشكال الكلور المختلفة هو التأثير على الرقم الهيدروجيني بعد الإضافة، فالكلور الجزيئي (الكلور الغاز) ينتج محلولاً حامضيًّاً يخفض الرقم الهيدروجيني خفضًا طفيفًاً؛ حيث أن الجرعات قليلة، بينما مركب هيبوكلوريت الصوديوم ومركب هيبوكلوريت الكالسيوم يؤديان إلى رفع الرقم الهيدروجيني للماء نتيجة تحرر الهيدروكسيد.

يعتمد تأثر الرقم الهيدروجيني سواء بالصعود أو بالهبوط على قلوية الماء أو قدرتها التنظيمية.

يعتبر هيبوكلوريت الصوديوم هو الأكثر تفضيلاً في الاستخدام من هيبوكلوريت الكالسيوم على الرغم من ارتفاع تكلفته وذلك لثباته أثناء التخزين وسهولة التداول والاستخدام.

عندما يخزن الهيبوكلوريت لفترة طويلة يتحلل ويتكون أيون الكلورات (ClO_3^-)، وخصوصًاً عند التعرض للحرارة العالية و أو لأشعة الشمس.

يمكن إنتاج الكلور بطريقة كهربية في محطات المياه بالتحليل الكهربي لمحلول ملح الطعام (كلوريد الصوديوم). ويمكن إنتاج هيبوكلوريت الصوديوم بهذه الطريقة أيضًا؛ حيث يستخدم الكلور الجزيئي الناتج من التحليل الكهربي بإذابته في محلول هيدروكسيد الصوديوم الناتج من نفس عملية التحليل الكهربي (كمنتج ثانوي) فينتج محلول هيبوكلوريت الصوديوم المركز، كما توضحه المعادلة الآتية:-

$$Cl_2 + NaOH \rightarrow NaOCl + H^+ + Cl^- \qquad (٣/٤٧)$$

هذه الطريقة الموقعية لإنتاج الكلور تعتبر مكلفة إذا ما قورنت بالكلور الغاز المعبأ فى اسطوانات مضغوطة.

يعتبر أيون الهيبوكلورايت وحامض الهيبوكلوراس عاملين مؤكسدين قويين ولكن حامض الهيبوكلوراس أكثر قوة، فنجد أن تفاعلات الأكسدة والتطهير بالكلور تكون أكثر تأثيرًا عند الرقم الهيدروجيني المنخفض (أي عند سيادة حامض الهيبوكلوراس، انظر شكل (٣/٤).

يضاف الكلور السائل (المضغوط داخل أسطوانات) إلى المياه عن طريق تبخيره ليتحول إلى غاز يندفع إلى الماء خلال وحدة الحقن. ويعتبر الكلور في الحالة المائية هو واحد من أكثر العوامل المؤكسدة التقليدية الفعالة؛ حيث يستخدم في أكسدة ايون الحديد الثنائي (Fe^{2+}) والمنجنيز الثنائي (Mn^{2+}) الذائبين في الماء وتحويلهما إلى رواسب يتم التخلص منها عن طريق المعالجة بالمروبات مثل كبريتات الالومونيوم (الشّبّة) وكلوريد الحديديك.

تفاعل الكلور مع المواد العضوية:

يتفاعل الكلور مع المواد العضوية المتواجدة فى الماء عن طريق تفاعلات الأكسدة و الإحلال، فمثلاً يتفاعل مع الأحماض الأمينية مكونا نواتج ثانوية غير هالوجينية مثل الالدهيدات والكيتونات والأحماض العضوية، ويتفاعل الكلور مع الفينول مكونًا مركبات كلوروفينولية مثل اورثو وبارا كلوروفينول وهذه المركبات تعطى مذاق و رائحة غير مقبولين للمياه.

وفى حالة تواجد مركبات عضوية تحتوى على مجموعات إحلال متواجدة علي الحلقة الأروماتية (تعطي إلكترون) تسهل تفاعلات الإحلال وتفاعلات انشقاق الحلقة الناتج عن الأكسدة.

وقد تتكون مركبات عضوية كلورية نتيجة احتواء المياه على مواد عضوية طبيعية تشكل خطورة إذا تجاوزت حدود معينة نتيجة إضافة الكلور إلى تلك المياه.[٢٣]

وتعتبر الأحماض الدبالية والأحماض الفولفية والكلوروفيل وبعض نواتج عمليات الهدم الحيوي للطحالب والبكتريا من المركبات العضوية التي قد تتواجد في مصادر الإمداد بالمياه، والتي تتفاعل مع الكلور مكونة نواتج عضوية كلورية ثانوية ذات خطورة علي بالصحة العامة مثل[٢٤-٢٩]:-

- حامض داي و تراي كلورو أسيتك. Di and trichloroacetic acid
- كلوروبكرين Chloropicrin

- هالوجيناتيد أسيتو نيترال Halogenated acetonitrile
- الهالوميثان Halomethane
- الكلوروفورم Chloroform

وهناك العديد من المركبات التي تتكون بكميات ضئيلة مثل:-

- هالوجيناتيد كيتون Halogenated keton
- هالوجيناتيد أليفاتية Halogenated aliphatic

تفاعل الكلور مع البروميد

يعتمد تركيز هذه المركبات سالفة الذكر على مستوى الكربون العضوي الكلى (TOC) في المياه الخام وقد تنتج مركبات أخرى محتوية على البروم أثناء إضافة الكلور كنتيجة لأكسدة البروم بفعل الكلور، وينتج حامض الهيبوبروماس كما توضحه المعادلة الآتية:-

$$HOCl + Br^- \rightarrow HOBr + Cl^- \quad (٣/٤٨)$$

ويحدث هذا التفاعل بسرعة شديدة ، بثابت معدل تفاعل من الدرجة الثانية = ٢,٩٥ × ١٠ ^{٣} مول$^{-١}$ ث$^{-١}$، وحيث أن البروميد يشكل مصدرًا آخر يستهلك الكلور؛ لذلك فمع وجود البروميد يحدث استنفاذ للكلور الحر. وحامض الهيبوبروماس، مثل حامض الهيبوكلوراس، أي حامض ضعيف (pKa = 8.7 عند ٢٥°م)، فهو يتفكك مكونا أيون هيبوبروميت (OBr^-) معتمدًا على الرقم الهيدروجيني.

$$HOBr \rightarrow OBr^- + H^+ \quad (٣/٤٩)$$

وكما هو ملاحظ من الجدول (٣/١) فإن حامض الهيبوبروماس أضعف من حامض الهيبوكلوراس من ناحية الأكسدة ومع تكوين حامض الهيبوبروماس فهذا أمر مهم؛ لآن هذا الحامض قادر على التفاعل مع المواد العضوية الطبيعية مكوناً نواتج ثانوية برومية غير مرغوب فيها مثل:-

- **البروموفورم وحامض داي برومواسيتك**

ومع وجود البروميد والأكسدة اللاحقة له إلى حامض الهيبوبروماس، فهذا يسهم مع حامض الهيبوكلوراس في تكوين مركبات مختلطة من النواتج الثانوية للتطهير (كلورية وبرومية) مثل:-

- **بروموداى كلوروميثان وحامض بروموكلورواستيك**

ونتيجة أن هذه المركبات ذات ثوابت حامضية؛ فان حامض الهيبوبروماس، يبقى دون تفكك (أي على الصورة الحامضية HOBr) بدرجة أكبر من حامض الهيبوكلوراس تحت أغلب الأرقام الهيدروجينية التي تتم عندها معالجة مياه الشرب (المدى من ٧- ٨).

وحيث أن هذه المركبات في حالتها من دون تفكك تكون أقوى كمؤكسدات من أيوناتها منزوعة البروتون، وبالتالي فإن حامض الهيبوبروماس يعمل كعامل إحلال أقوى من حامض الهيبوكلوراس في تكوين كميات أكبر من النواتج الثانوية للتطهير (بالكلور) في المياه المحتوية على البروميد.

تفاعل الكلور مع الأمونيا و تكوين الكلورامينات

عندما تتواجد الأمونيا في المياه التي يتم تطهيرها بالكلور، يؤدي هذا إلى تكوين مركبات الكلورامين، وهي:

أحادى كلورامين و ثنائي كلورامين و ثلاثي كلورامين (أو ثلاثي كلوريد النيتروجين) تبعًا للمعادلات الآتية:-

$$NH_4^+ + HOCl \rightarrow NH_2Cl + H_2O + H^+ \qquad (٣/٥٠)$$

$$NH_2Cl + HOCl \rightarrow NHCl_2 + H_2O \qquad (٣/٥١)$$

$$NHCl_2 + HOCl \rightarrow NCl_3 + H_2O \qquad (٣/٥٢)$$

يعبر مجموع تركيزات الصور الثلاث للكلورامين عن "الكلور المتحد" و يأخذ الوحدة مجم (Cl_2)/ لتر. ويمكن التمييز بين الكلور الحر والكلور المتحد من خلال طرق التحليل المذكورة في كتاب الطرق القياسية[٣٠]، ومن خلال جمع تركيزات الكلور المتحد بعد التطهير وتركيزات الكلور الحر نحصل علي الكلور الكلي المتبقي.

تعتمد التركيزات النسبية لصور الكلورامين الثلاث على الرقم الهيدروجيني ودرجة الحرارة ونسبة الكلور إلى الأمونيا. فعند نسبة تركيز مولى أقل من ١ : ١ (كلور : أمونيا) أو نسبة وزنيه أقل من ٥ : ١ وعند مدي رقم هيدروجيني من ٧- ٨ وهى الظروف الشائعة أثناء إجراء معالجة مياه الشرب؛ فإن الصورة الرئيسية للكلورامين المتكون سيكون أحادي كلورامين.

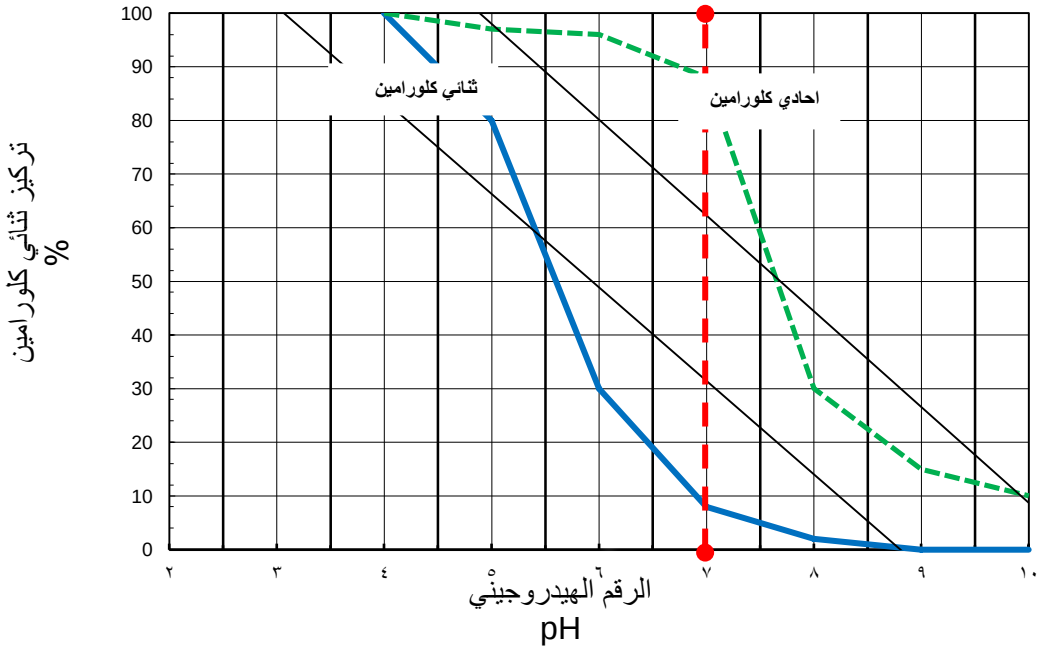
وترجع سيادة أحادي كلورامين عن ثنائي كلورامين في أن الأخير غير ثابت عند رقم هيدروجيني <٨ ويتحلل إلى غاز نيتروجين وكلوريد، وعند النسب العالية للكلور: الأمونيا مع انخفاض الرقم الهيدروجيني (في المدى من ٦ – ٦،٥)، يتكون ثلاثي كلوريد النيتروجين.

عند إضافة تركيز عالٍ من الكلور للماء المحتوية على الأمونيا يحدث التفاعل الآتي:-

$$NH_3 + 1.5HOCl \rightarrow 0.5N_2 \uparrow_{gas} + 1.5H^+ + 1.5Cl^- + 1.5H_2O \qquad (٣/٥٣)$$

"وبناءً على ما تقدم فان المياه المحتوية على الأمونيا لا يتكون فيها ثلاثي كلورامين تحت الظروف الطبيعية المعتادة التى تحدث فيها معالجة مياه الشرب".

تمثل المعادلة سالفة الذكر ما يُطلق عليه نقطة الكسر؛ حيث أن الكلور المضاف بجرعات عالية يؤدى إلى أكسدة الأمونيا و يتكون الكلور الحر المتبقي. ويحدث هذا عندما تكون النسبة المولية بين الكلور : النيتروجين أكبر من ١,٥ أو النسبة الوزنية أكبر من ٧,٥، ويمكن استخدام المعادلة السابقة لتقدير الكلور المطلوب لأكسدة الأمونيا، مع الأخذ في الاعتبار أنه أثناء الممارسة الميدانية تقترب النسبة المولية من النسبة ٢: ١ (نسبة مولية) أي ١٠ : ١ (نسبة وزنية).



شكل (٣/٥) تأثير الرقم الهيدروجيني ونسبة **الأمونيا : الكلور** على النسبة المئوية لتركيز ثنائي كلورامين وأحادي كلورامين عند ٢٥°م.

يوضح الشكل (٣/٥) توزيع التركيزات عند بداية التطهير، وبعد حدوث الاتزان لكل من أحادي كلورامين وثنائي كلورامين لمحاليل متساوية المولية لكل من الكلور المائي و الأمونيا عند ٢٥° م.[٣١]

ويُعد هذا الشكل البياني السابق مثالاً توضيحيًا للتفاعل الذي تحكمه آلية كيميائية وثرموديناميكية، ففي بداية التفاعل يحدث التفاعلان رقم (٣/٥٠، ٣/٥١) في نفس الوقت، ويتكون أحادى كلورامين وثنائي كلورامين، ويتضح من الشكل أنه عند رقم هيدروجيني ٧ فإن الناتج من أحادي كلورامين و ثنائي كلور أمين سوف يكون ٩٠ % ، ١٠ % على التوالي، وإذا تركت المياه لفترة يوم فإن أحادي كلورامين يتحول ببطء إلى ثنائي كلورامين تبعًا للمعادلة الآتية:-

$$2NH_2Cl \rightarrow NHCl_2 + NH_3 \qquad (٣/٥٤)$$

وإذا كان هناك كلور كافي فسوف يحدث تفاعل الكلور مع الأمونيا ثم يتكون أحادي كلورامين الذي يتحول إلى ثنائي كلورامين وتستمر هذه العملية حتى الوصول إلى حالة الاتزان، وعند حدوث الاتزان، فإن المياه تحتوى ٤٠ % أحادي كلورامين و ٦٠ % ثنائي كلورامين تقريبا.

ومما سبق؛ يتضح أن تفاعل الكلور مع الأمونيا تفاعل معقد؛ حيث أن النسبة المئوية لكمياتهما تتغير مع الوقت أثناء تواجد المياه في محطة المعالجة، أو ربما مع مكوث المياه في شبكات التوزيع أو في خزانات المياه المنزلية.

يُعتبر مركب أحادي كلورامين من النواتج الثانوية المرغوب فيها، حيث انه يعتبر بمثابة مطهر متبقي له خاصية البقاء لمدة أطول في شبكات التوزيع، و يتفوق على الكلور الحر في هذه الخاصية إلا أنه أقل بكثير في القدرة التطهيرية من الكلور الحر.

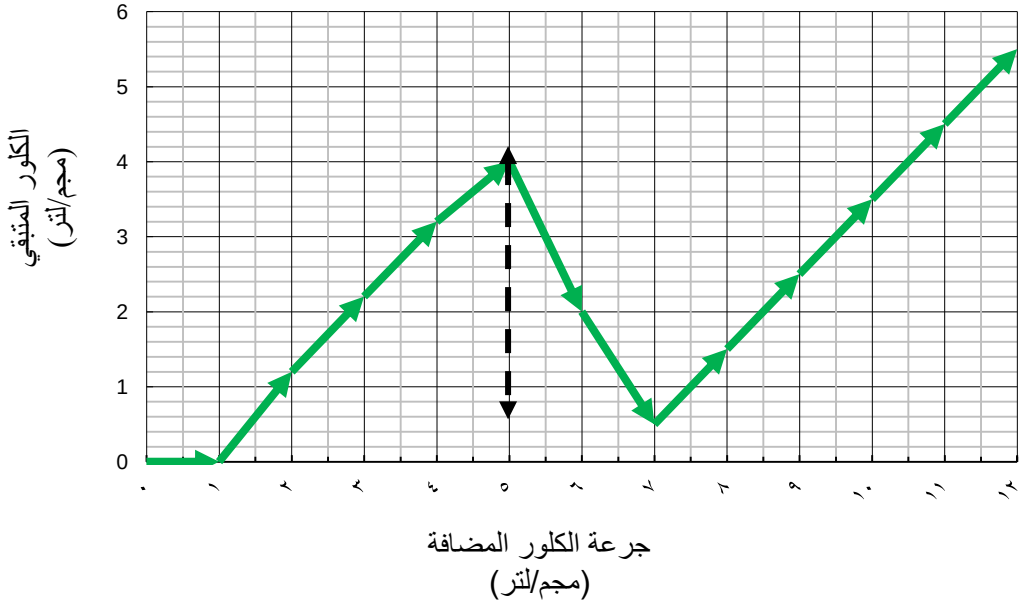
تختلف كفاءة صور الكلور المتحد و الكلور الحر في قتل بكتريا الكولي فورم، فتشير المراجع إلى أنها طبقا للنسب الآتية[٣٢]:-

حامض الهيبوكلوراس	:	أيون الهيبوكلوريت	:	أحادي كلورامين	:	ثنائي كلورامين
٢٠٠	:	٢,٥	:	١	:	٣,٣

"أي أن القدرة التطهيرية للكلور الحر ($HOCl$) تعادل ٨٠ مرة قدرة أيون الهيبوكلوريت(OCl^-)، وتعادل ٢٠٠ مرة قدرة أحادي كلورامين (NH_2Cl)، وتعادل ٦٠ مرة قدرة ثنائي كلورامين ($NHCl_2$)"

ومن هنا فان قدرة الكلور المتحد على إبادة الفيروسات وحويصلات الطفيليات قليلة جدًا مقارنة بالكلور الحر. وتشير المعادلة (٣/٥٠) إلى أن تكوين أحادي كلورامين يكون مصحوبًا بفقد بروتون؛

لأن عملية الكلورة تقلل من احتفاظ النيتروجين بالبروتونات، ومن ناحية جهد الأكسدة، فنجد أن أحادي كلورامين ضعيف التأثير على ايون الحديد (Fe^{2+}) وايون المنجنيز (Mn^{2+})، و المواد العضوية ذات الطعم و الرائحة، وبالتالي فهو ضعيف في قدرته على إزالة اللون الناشئ عن المواد العضوية الطبيعية، ولا تنجم عنه مركبات تراي هالوميثان.



شكل (٣/٦) تأثير زيادة جرعة الكلور على الكلور المتبقي (عند رقم هيدروجيني: "٧" وتركيز أمونيا ١ مجم/لتر)

يوضح الشكل (٣/٦) كفاءة التطهير للأشكال المختلفة للكلور، فكلما زادت الجرعة زاد الكلور المتبقي الكلى، أي أن الباقي في النظام بعد ٣٠ دقيقة من إضافته، ونلاحظ أن الكلور المتبقي يصل إلى قيمة قصوى (٤,٠مجم / لتر) عند جرعة ٥,٠ مجم / لتر، ثم يتناقص هذا المتبقي ليصل الى قيمة دنيا (أقل من ٠,٥ مجم/لتر)، ثم تزيد بصورة خطية لاحقة مع زيادة الجرعة المضافة.

هذا الشكل المكون من قمة و قاع يتوازى مع حساسية الكائنات الدقيقة إلى الكلور المتبقي من حيث نوعيته وتركيزه، فيتضاعف التأثير الاهلاكي للمسببات المرضية اذا تحقق تواجد الكلور الحر؛ أي بعد نقطة الكسر .

ويمكن أن نشرح هذا السلوك من خلال منحنى نقطة الكسر بين الكلور و الأمونيا (شكل ٣/٦) كما يلي:-

النطاق الأول: وهو المنحسر بين صفر – ١ مجم كلور؛ وفيه لا نجد الكلور المتحد ،هذا يعني أن هناك شوائب قامت باختزال الكلور المضاف (مثل أيون الحديد والمنجنيز).

النطاق الثاني: وهو المحصور بين ١ – ٥ مجم/لتر كلور؛ وفيه نجد الكلور المتحد فقط، وهذا النطاق يسبق قمة المنحنى.

النطاق الثالث: وهو المحصور بين ٥ – ٧ مجم/لتر كلور (القمة والقاع)؛ وفيه يحدث تكسير وأكسدة لمركبات الكلور المتحد المتبقي مصحوباً بتكون نيتروجين، وأثناء نقطة الكسر قد يحدث التفاعل الآتي:- [١]

$$2NH_3 + 3HOCl \rightarrow N_2\,(gas) + 3H^+ + 3Cl^- + 3H_2O$$

هذا التفاعل يستخدم أحياناً كوسيلة لإزالة الأمونيا من مياه الشرب ومن المياه العادمة[٣٣].

النطاق الرابع: بعد إضافة جرعة من الكلور أكبر من ٧ مجم/لتر كلور؛ حيث يبدأ الكلور الحر في الظهور بعد أن تتأكسد الأمونيا بالكامل وبعد أن تتكسر مركبات الكلور المتحد.

نلاحظ أن النسبة الوزنية بين الأمونيا و الكلور هي ١ : ٧,٦ عند نقطة الكسر، عند تلك النقطة تصبح كمية الكلور المضافة هي المطلوبة بالفعل للحصول على كلور حر ثابت.

ويمكن إيجاز ما يحدث في النطاقات الأربعة علي النحو الآتي:-

النطاق رقم (١): تكسير مركبات الكلور بواسطة المركبات المختزلة كالحديدوز والمنجنيز ان وجدا.

النطاق رقم (٢): تكوين مركبات عضوية كلورية وكلورامينات عند تواجد الأمونيا والمواد العضوية.

النطاق رقم (٣): تكسير المركبات العضوية الكلورية والكلورامينات بفعل الكلور الزائد.

النطاق رقم (٤): تكوين الكلور الحر مع تواجد مركبات عضوية كلورية لم تتكسر.

التفاعلات التي تحدث في النطاق رقم (١) في حالة تواجد ايون الحديد (Fe^{2+}) والمنجنيز (Mn^{2+}) وكبريتيد الهيدروجين ومواد عضوية في المياه:-

$$Cl_2 + 2Fe^{2+} \rightarrow 2Fe^{3+} + 2Cl^-$$

$$2Fe^{3+} + 6OH^- \rightarrow 2Fe(OH)$$

$$Cl_2 + Mn^{2+} + 4OH^- \rightarrow MnO_2 +$$

$$Cl_2 + H_2S \rightarrow 2HCl + S$$

$$Cl_2 + organic \rightarrow \text{مركبات عضوية كلورية}$$

التفاعلات التي تحدث في النطاق رقم (٢) تفاعل الكلور مع المواد العضوية و الأمونيا

$$Cl_2 + organics \rightarrow \text{مركبات عضوية كلورية}$$

$$Cl_2 + NH_3 \rightarrow NH_2Cl + HCl \quad \text{أحادي كلورامين}$$

$$2Cl_2 + NH_3 \rightarrow NHCl_2 + 2HCl \quad \text{ثنائي كلورامين}$$

التفاعلات التي تحدث في النطاق رقم (٣) تفاعل الكلور مع الأمونيا

$$Cl_2 + NH_3 \rightarrow N_2 + N_2O + HCl$$

$$3Cl_2 + 2NH_3 \rightarrow N_2 + 6HCl$$

التفاعلات التي تحدث في النطاق رقم (٤) تفاعل الكلور مع الماء

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + HCl$$

ملحوظة هامة:

"يختلف شكل منحنى نقطة الكسر تبعًا لنوعية المياه، والذي يؤثر جوهريا على الشكل احتواء المياه على الأمونيا والمواد العضوية والشوائب الأخرى مثل الحديد والمنجنيز وأي مكونات تتأكسد بفعل الكلور".

يتكون هذا المنحنى الذي به قمة وقاع عندما يكون الرقم الهيدروجيني للمياه المعالجة بين ٦,٥ – ٨,٥ ، وتحت الظروف المثالية تصبح **النسبة المولية** بين جرعة الكلور والأمونيا كنيتروجين هي ٢: ١ وهذا يعادل ١٠ : ١ بمعيار النسبة الكتلية (كتلة الكلور إلى كتلة الأمونيا).

الكلور HOCl	:	نيتروجين- أمونيا (N)
١٤٢ جم (٢ مول)		١٤ جم (١ مول نيتروجين)

ومن الناحية العملية نلاحظ أن نسبة الكلور إلى الأمونيا هي ١٠ : ١ للوصول إلى نقطة الكسر، ويؤثر التفاعل الذي يحدث عند نقطة الكسر على الرقم الهيدروجيني للمياه، فإذا استخدم هيبوكلوريت الصوديوم يرتفع الرقم الهيدروجيني عند نقطة الكسر بقيمة قليلة نتيجة تحرر الهيدروكسيد أثناء عملية

الكلورة. أما عند استخدام غاز الكلور تتحرر البروتونات عن طريق الانحلال المائي الغاز الكلور (معادلة ٣/٥٥)[٣٤]، وهذا يؤدى إلى خفض للرقم الهيدروجيني بقيمة تعتمد علي جرعة الكلور المضافة.

عند أكسدة الأمونيا بواسطة الكلور إلى غاز نتروجين عند نقطة الكسر فهذا يتطلب ١,٥ مول كلور لكل مول نيتروجين، طبقا للمعادلة (٣/٥٣)، ونلاحظ هنا أن النسبة المولية في التفاعل المتزن بين الكلور والأمونيا عند نقطة الكسر هي حوالي ٢ : ١، وهذا يوضح أن هناك مركبات غير نيتروجينية تأكسدت عند نقطة الكسر، ومن الناحية العملية يتكون مركب إضافي رئيسي هو النترات كما في المعادلة الآتية:-

$$NH_4^+ + 4HOCl \rightarrow NO_3^- + 6H^+ + 4Cl^- + H_2 \qquad (٣/٥٥)$$

وبناءاً على الكميات النسبية المتكونة من النيتروجين مقارنة بالنترات عند نقطة الكسر فينبغي أن تكون كمية الكلور المطلوبة ما بين ١,٥ مول لكل مول من الأمونيا في حالة تكون النيتروجين، و٤ مول لكل مول من الأمونيا في حالة تكون النترات طبقا للمعادلتين (٣/٥٣ ، ٣/٥٥).

قبل نقطة الكسر يتحلل الكلورامين غير العضوي بالتفاعل المباشر مع مركبات عديدة. فمثلاً: يتفاعل الكلورامين الأحادي مع أيونات البروميد و يتكون أحادى بروميدامين[٣٥]. وإذا تكون ثلاثي كلورامين كما هو الحال عند استخدام جرعات عالية من الكلور عن المطلوبة للوصول إلى نقطة الكسر؛ فيحدث تحلل ويتكون نيتروجين غازي و حامض هيبوكلوراس أو بالتفاعل مع الأمونيا ويتكون أحادى كلورامين وثنائي كلورامين.[٣٦]

تبلغ فترة عمر النصف لاحادى كلورامين حوالي ١٠٠ ساعة في الماء المقطر[٣٧]. وقد وجد أن تحلل المحاليل النقية المحتوية على أحادي كلورامين تنتج نواتج، تمتص الأشعة فوق البنفسجية عند ٢٤٣ نانومتر وتكون قابلة للأكسدة أو الاختزال[٣٨].

عند رقم هيدروجين أقل من " ٩ " (يكون تفكك ايون الامونيوم مهملاً) وتكون كمية الكلور المتحدة على صورة ثنائي كلورامين بالنسبة لأحادي كلورامين (معادلة ٣/٥٠، ٣/٥١) في حالة اتزان طبقا للمعادلة الآتية[٣٤]:-

$$A = Bz \div 1 - \sqrt{1 - B_z(2 - z)} \qquad (٣/٥٦)$$

حيث A نسبة الكلور علي هيئة تنائي كلورامين إلى الكلور على هيئة أحادي كلورامين، و Z هي نسبة مولات الكلور (Cl_2) المضافة لكل مول من الأمونيا- نيتروجين الموجودة.

$$B = 1- 4\ K_{eq}\ [H^+] \qquad (٣/٥٧)$$

يعتمد ثابت الاتزان في المعادلة (٥٧) على التحول الداخلي المباشر بين ثنائي كلورامين وأحادي كلورامين كما يلي: [٣٥]

$$H^+ + 2NH_2Cl \rightarrow NH_4^+ + NHCl_2 \qquad (٣/٥٨)$$

$$K_{eq}= [NH_4^+][\ NHCl_2]/\ [H^+][\ NH_2Cl] \qquad (٣/٥٩)$$

حيث أن K_{eq} = ٦,٧ × ١٠$^{-٥}$ مول/لتر عند ٢٥ °م

من خلال هذه العلاقة يمكن تعيين نسبة الاتزان لكل من ثنائي كلورامين إلى أحادي كلورامين كدالة للرقم الهيدروجيني ونسب جرعات الكلور المستخدمة على افتراض أنه ليس هناك تفاعلات تؤدى الى فقد فى الكلور غير تلك الداخلة فى الكلورامينات غير العضوية.

فكلما قلَّ الرقم الهيدروجيني وزادت جرعة الكلور بالنسبة للنيتروجين؛ فإن الكمية النسبية لثنائي كلورامين تزيد أيضاً. (شكل ٣/٥)، ويشير ثابت الاتزان عند تركيز أيونى ٠,٥ مول وعند درجة حرارة ٢٥ °م إلى أن كمية ثلاثي كلورامين الموجودة في حالة اتزان مع أحادي و ثنائي كلورامين تكون مهملة[٣٥]. وهذا يتفق مع القياسات التي تجرى لأشكال الكلور المتحد كدالة للاقتراب من نقطة الكسر[٣٦].

وهذه النتائج تتوافق مع الملاحظات الروتينية لنقطة الكسر عند جرعات مولية أقل من أو تساوي النسبة المولية ٢ كلور : ١ نيتروجين أو النسبة الوزنية ١٠ كلور: ١ نيتروجين. ومن هنا فليس لثلاثي كلورامين تأثيراً هاماً في تفاعل نقطة الكسر.

تؤدى التفاعلات التي تحدث عند نقطة الكسر إلى أكسدة الأمونيا واختزال الكلور المتحد الذي يبدأ بتكوين ثنائي كلورامين. يُعتبر تكوين أحادى كلورامين تفاعلاً من الرتبة الأولى أخذ في الاعتبار كل

من حامض الهيبوكلوراس والأمونيا غير المتأنية. وقد صيغ معدل تكون أحادي كلورامين من خلال العلاقة الآتية:-

$$r(mole/L\text{-}s) = 6.6 \times 10^{8} \exp^{(-1510/T)[HOCl][NH3]} \qquad (٣/٦٠)$$

وحيث أن حامض الهيبوكلوراس يتفكك إلى أيون هيبوكلوريت، وثابت التفكك (pKa) = ٧,٤ تقريبًا وتقوم الأمونيا بالإتحاد مع بروتون وتكوّن كاتيون الامونيوم وثابت التكوين (pK_a) =٩,٣ ، فإن أقصى معدل لتكوين أحادي كلورامين يحدث عند الرقم هيدروجيني الذي عنده يكون حاصل تركيز حامض الهيبوكلوراس والأمونيا في أقصاه، وهذه هي النقطة الوسطى لكلتا قيمتي ال pK. وعند هذا الرقم الهيدروجيني المثالي و درجة الحرارة المعتادة فى المحطات فإن تكوين أحادى كلورامين يصل الى حالة الاتزان في فترة زمنية من ثانية إلى ٦ ثوان، أما عند الرقم الهيدروجيني العالي أو المنخفض تقل سرعة التفاعل.

عند نقطة الكسر تحدث مجموعة معقدة من التفاعلات العنصرية تتلخص في المعادلتين (٣/٥٣، ٣/٥٥) اللتان تفترضان تكوّن هيدروكسيل أمين و هيدروكسيل نيتروجين كوسائط في هذا التفاعل.

جدول (٣/٦) ملخص تفاعلات الكلور وتأثيراتها علي قلوية المياه و الرقم الهيدروجيني الفعال لتأثير الكلور

الرقم الهيدروجيني	القلوية المستهلكة (مجم كربونات كالسيوم / مجم كلور)	معادلة التفاعل	الكلور المطلوب لكل مجم كاتيون (مجم)
٦,٥ – ١,٥	٠,٧٠٥ ٠,٧٠٥ ١,٤	$Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + HCl$	-
٨,٥	٠,٧٠٥	$Cl_2 + NH_3 \rightarrow NH_2Cl + HCl$	٤,٢ / مجم أمونيا
٥,٠-٤,٤	٠,٧٠٥	$2Cl_2 + NH_3 \rightarrow NHCl_2 + 2HCl$	٨,٤ / مجم أمونيا
٨,٥-٦,٥	١,٤١	$3Cl_2 + 2NH_3 \rightarrow N_2 + 6HCl$	٦,٣ / مجم أمونيا
١٠,٠-٧,٠	٠,٠	$2Fe^{2+} + Cl_2 \rightarrow 2Fe^{3+} + 2Cl^-$	٠,٦٤ / مجم حديد
١٠,٠-٧,٠	Cl_2/٤,٢٢ Fe^3/٢,٦٩	$2Fe^{3+} + 6OH^- \rightarrow 2Fe(OH)_3$	
١٠,٠-٧,٠	Cl_2/٢,٨٢ Mn/٣,٦٤	$Mn^{2+} + Cl_2 + 4OH \rightarrow MnO_2 + 2Cl^- + 2H_2O$	١,٣ / مجم منجنيز
٩,٠-٥,٠	Cl_2/١,٤١ H_2S/٢,٩٤	$H_2S + Cl_2 \rightarrow 2HCl + S$	٢,٠٩/ مجم كبريتيد
٩,٠-٦,٥	Cl_2/١,٧٦ H_2S/١٤,٧	$H_2S + 4Cl_2 \rightarrow 8HCl + H_2SO_4$	٨,٣٥/ مجم كبريتيد
	Cl_2/١,٤١ Na_2SO_3/٠,٧٩	$Na_2SO_3 + Cl_2 + 2OH \rightarrow Na_2SO_4 + 2Cl\text{-}\ H_2O$	٠,٥٦٤/ مجم كبريتيت

الأوزون

نبذة عن الأوزون وعمليات الأكسدة المتقدمة

غاز الأوزون غير ثابت، لذلك يجب توليده موقعياً ويمكن وضع تمثيل مبسط لكيمياء تكوين الأوزون على النحو الآتي:

$$O_2 + Energy \rightarrow O + O \qquad (٣/٦١)$$

$$O + O_2 \rightarrow O_3 \qquad (٣/٦٢)$$

يتم إمداد بالطاقة اللازمة لهذه التفاعلات من خلال تفريغ كهربي يتراوح ما بين ٨ – ٢٠ كيلو فولت تبعاً لجهاز التوليد المستخدم. ويستخدم هواء أو أكسجين جاف مبرد و خالٍ من الغبار أو يستخدم هواء غنى بالأكسجين و يمرر هذا الهواء خلال فتحة ضيقة بين قطبين؛ حيث يتولد تفريغ كهربي عالي الطاقة عبر الفراغ بين القطبين، يطلق عليه "تفريغ الكورونا" أو "تفريغ البلازما البارد"، وينشأ هذا التفريغ من تيار كهربي متردد يخلق دائرة جهد بين ألقطبين.

يعتمد انتاج الأوزون على الجهد الكهربي و التردد وتصميم مولد الأوزون و نوع ومدى جودة الغاز المستخدم. ويمكن إنتاج تيار من الأوزون يحتوى على ١٤% أوزون بالحجم. و تعمل مولدات الأوزون الحالية على أنظمة ذات تردد منخفض (٥٠ – ٦٠ هرتز) و أنظمة ذات تردد متوسط (٤٠٠ – ١٠٠٠ هرتز) و أنظمة ذات تردد عالي (٢٠٠٠ – ٣٠٠٠ هرتز).

حينما يتولد الأوزون يمرر الهواء المحمل به خلال وسيلة امتصاص للغاز لنقل الأوزون إلى المحلول. وهذا يتحقق إما من خلال و حدة تلامس فقاعي متعددة المراحل أو نظام حقن الغاز المباشر على الخط أو من خلال وسائل أخرى لنقل الغاز. تصل انتاجية وحدة انتاج الأوزون الى ٤٨ كجم/ساعة.

غاز الأوزون غير ثابت فى المحاليل المائية، يتفاعل بشدة مع عدد من المكونات الشائعة فى مياه الشرب (مثل المواد العضوية الطبيعية). وتصل أقصى ذوبانية للأوزون فى الماء حوالي ١٢ مجم / لتر (٠,٢٤ مول/م^٣) اعتمادا على ثوابت قانون هنري المعتمدة على درجة الحرارة والرقم الهيدروجيني.[١]

يتحلل الأوزون ذاتيًا من خلال تفاعل متسلسل معقد وينبثق عنه تكوّن شقوق حرة متعددة. وهذا التحلل يبدأ بعدد من مكونات المياه المختلفة مثل ايون الهيدروكسيد (قيم الرقم الهيدروجيني العالية)، المواد

العضوية الطبيعية، ايون الحديدوز أو قد يبدأ بإضافة فوق أكسيد الهيدروجين أو بالإشعاع باستخدام الأشعة فوق البنفسجية.

تمثل المعادلات (٦٤ – ٦٩) تفاعلات التحلل الذاتي عندما يكون أيون الهيدروكسيد هو البادئ.

$$O_3 + OH^- \rightarrow O_2^- + HO_2 \qquad (٣/٦٣)$$

$$HO_2 \rightarrow O_2^- + H^+ \qquad (٣/٦٤)$$

$$O_2^- + O_3 \rightarrow O_2 + O^-_3 \qquad (٣/٦٥)$$

$$O_3^- + H^+ \rightarrow HO_3 \qquad (٣/٦٦)$$

$$HO_3 \rightarrow O_2 + OH \qquad (٣/٦٧)$$

$$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2 \qquad (٣/٦٨)$$

تشكل هذه التفاعلات آلية متسلسلة؛ لان شق الهيدروبيراكسيد (HO_2)، وايون سوبراكسيد (O_2^-) يتكونان من خلال تفاعل البدء (معادلة ٣/٦٣) الذي يؤدي إلى توليد تفاعلات متسلسلة جديدة تسهم في المزيد من تحلل الأوزون. في حالة المياه النقية الخالية من أي مكونات تكون السلسلة طويلة جدّا، وذلك لأن مئات من جزيئات الأوزون تتحلل في خطوة بداية فردية.

تعتمد فترة حياة الأوزون علي عدة عوامل، تشمل: الرقم الهيدروجيني، درجة الحرارة، تركيز الكربون العضوي الكلي، تركيز البيكربونات والكربونات. تعمل الكربونات و البيكربونات على زيادة فترة عمر الأوزون من خلال التفاعل مع شق الهيدروكسيد (OH).

$$OH + HCO_3^- \rightarrow OH^- + HCO_3^- \qquad (٣/٦٩)$$

$$OH + CO_3^{-2} \rightarrow OH^- + CO_3^- \qquad (٣/٧٠)$$

يعُتبر شقا البيكربونات والكربونات غير فعالين كوسائط؛ حيث أنهما لا يعملان على استمرار التفاعلات المتسلسلة. لذلك فالمياه المحتوية على قلوية عالية من البيكربونات و الكربونات سوف تحتفظ بشق الأوزون لفترات أطول من المياه المحتوية على قلوية منخفضة. هذا في غاية الأهمية وخصوصًا عندما يستخدم الأوزون كمطهر، بالإضافة إلى أن نشاط شق الكربونات يزيد مع زيادة الرقم الهيدروجيني لأن الكربونات أكثر تفاعلا من البيكربونات.

شق الهيدروكسيل (OH) هو واحد من الوسطاء المنتجة بواسطة تحلل الأوزون، وهو يعتبر واحدً من أقوى المؤكسدات الكيميائية المعروفة، وهو قادر على التفاعل السريع مع العديد من المركبات العضوية وغير العضوية، وتبعًا لذلك فإن خصائص الأكسدة للأوزون تعتمد بصفة جوهرية على خصائص الأكسدة للشقوق الحرة.

توضيح بياني لسلوك الأوزون في المحاليل المائية

يتفاعل الأوزون من خلال نوعين من المسارات:

- مسار مباشر يتطلب الأوزون الجزئي (O_3).
- ومسار غير مباشر ينشأ من تحلل الأوزون مكونًا شق هيدروكسيل حرًا (OH).

فى حالة التفاعلات المباشرة التي تتطلب الأوزون الجزئي تكون اختيارية فيتفاعل الأوزون بسرعة جدًا مع بعض المكونات، مثل الفينول و الميركبتان، ولكنه يتفاعل ببطء مع المكونات الأخرى مثل البنزين ورباعي كلورو إثيلين. وعلى النقيض فشق الهيدروكسيل (OH) غير إختيارى في سلوكه؛ فيتفاعل بسرعة مع عدد كبير من المكونات بالإضافة إلى إن شق الهيدروكسيل (OH) يتفاعل بسرعة مع الأوزون الجزيئي (معادلة ٣/٦٨)، وبالتالي يشارك في معدل الحفز الذاتي لتحلل الأوزون.

وشق الهيدروكسيل مثل أيون البيكربونات و أيون الكربونات اللذين يتفاعلان مع شق الهيدروكسيل (معادلة ٣/٦٦، ٣/٦٧) مزيلان له من الدورة مقللان من آليات تحلل الأوزون وبالتالي تشجع على ثبات الأوزون الجزيئي في المحلول.

ويمكن إنتاج شقوق الهيدروكسيل الحرة من خلال عدد من المسارات الأخرى، بالإضافة إلى سلسلة تحلل الأوزون عن طريق الهيدروكسيد المذكور من قبل.

فمثلا: إضافة كلا من فوق أكسيد الهيدروجين والأوزون إلى الماء يعجلان من تحلل الأوزون، ويعضدان من إنتاج شق الهيدروكسيل. يتفكك فوق أكسيد الهيدروجين (H_2O_2) إلى أيون هيدروبيرأوكسيد (HO_2^-) طبقا للمعادلة الآتية:

$$H_2O_2 \leftrightarrow HO_2^- + H^+ \qquad (٣/٧١)$$

يتفاعل أيون هيدروبيرأوكسيد مع الأوزون الجزيئي وينتج أيون سوبرأوكسيد (O_2^-) وشق هيدروكسيل وأكسجين جزيئي على النحو التالي:-

$$HO_2^- + O_3 \rightarrow OH + O_2^- + O_2 \qquad (٣/٧٢)$$

تنتج مركبات ثانوية من تفاعل الأوزون مع المركبات المتواجدة في المياه (المركبات العضوية). وهذه المركبات العضوية تكون ذات قطبية مثل الالدهيدات والأحماض الكربوكسيلية الأليفاتية والأروماتية والكيتونات والبيروكسيدات، وبالمقارنة مع التطهير بالكلور و ثاني أكسيد الكلور؛ فإن الأوزون يكوّن كميات قليلة من المركبات الثانوية [١].

تتميز المركبات الثانوية الناتجة من استخدام الأوزون بأنها أكثر قابلية للتحلل الحيوي من مركباتها الأولية قبل التفاعل مع الأوزون، لذلك فإن المياه التي تم تطهيرها بالأوزون؛ تظهر نموًّا نشط للبكتريا إذ لم يتم تطهيرها تطهيرًا جيدًا فيما بعد.

عمليات التطهير بالأوزون مع الأشعة فوق البنفسجية:

عادة يحدث تفكك للأوزون عند طريق تفاعل مصاحب بانتقال إلكترون ليكوّن ايونًا غير مستقر (فوق أكسيد O^{2-}) أو شق ايوني (اوزونيد O^{3-}) (معادلة ٣/٦٣، ٣/٦٥ علي التوالي)، وهذا يسبب مجموعة من التفاعلات التي تستهلك أوزونًا أكثر وتولد أشكالا قوية الأكسدة وخصوصًا شق الهيدروكسيد (OH) (معادلة ٣/٦٧) ونظرًا لكون شق الهيدروكسيد (OH)، وهو واحد من أشكال الأكسدة القوية المعروفة، فعندما يتفكك الأوزون فان قدرته علي الأكسدة لا تُفقد إذا استخدم شق الهيدروكسيد بكفاءة.

انه من بين العمليات الواعدة لتفكيك الأوزون؛ استخدم الأشعة فوق البنفسجية كعامل منشط لإحداث خطوة البداية مع استخدم فوق أكسيد الهيدروجين، وهذا الأخير بمفرده عامل متوسط الأكسدة ولم يكن مقبولا استخدامه في معالجة المياه[٣٩] كعامل مؤكسد. ومع استخدامه مع الأشعة فوق البنفسجية،[٤٠] أو مع الأوزون[٤١] يكون أكثر فاعلية؛ حيث يتكون شق الهيدروكسيل، ويُعتبر فوق أكسيد الهيدروجين حامض ضعيف، وهو يكون قاعدة (HO_2^-) تتفاعل مع الأوزون[٤٢] على النحو المذكور بالمعادلتين (٣/٧١) و(٣/٧٢).

من خلال الرجوع الى المعادلتين ٣/٦٦ ، ٣/٦٧ يتضح أن شق الهيدروكسيل ينتج من ايون شق الاوزونيد (O_3^-)، كما ان استخدام الأشعة فوق البنفسجية للماء المحتوية على الأوزون الجزيئي الذائب يؤدي الى تكوين فوق أكسيد الهيدروجين موقعيًّا[٣٩، ٤٣] من خلال التفاعل الآتي:-

$$O_3 + H_2O + UV_{\text{radiation}} \rightarrow H_2O_2 + O_2 \qquad (٣/٧٣)$$

يتفاعل فوق أكيد الهيدروجين مع الأوزون الجزيئي بنفس الطريقة التي تحدث في المعادلتين (٣/٧١) و(٣/٧٢)، وينتج شق الهيدروكسيل الذي يدخل دورة تحلل الأوزون كما في المعادلات (٣/٦٥ – ٣/٦٨).

ويمكن استخدام الأوزون مع الأشعة فوق بنفسجية أو الأوزون مع فوق أكسيد الهيدروجين، وهذا الاستخدام يعطي فاعلية أكثر من استخدام الأوزون منفردًا ويرجع هذا إلى أكسدة المواد العضوية الطبيعية (المسببة لتكوّن الهالوميثان) وأيضًا المواد العضوية المخلقة مثل: ثلاثي ورباعي كلوريد الايثيلين [٤١، ٤٤، ٤٥]. كما أن استخدام الأوزون مع الأشعة فوق البنفسجية أو مع فوق أكسيد الهيدروجين يمثلان عاملان مؤكسدان بديلان للعوامل الأخرى من اجل تكسير المركبات التي تُحدث طعمًا ورائحة غير مقبولين في المياه مثل جيوسمين ، وميثيل ايزوبرنيول اللذين يقاومان عوامل الأكسدة الأخرى.

يوجد عيبان للثنائي (الأوزون /فوق البنفسجية) و الثنائي (الأوزون /فوق أكسيد الهيدروجين)[٤٦]:

العيب الأول: إنهما يكلفان كثيرًا نسبيًا بالمقارنة بالطرق التقليدية الأخرى وقد ينافسان استخدام الكربون المنشط المحبب في التخلص من المواد العضوية.

العيب الثاني: في حالات العمليات التي تنتج فيها وسائط (شقوق)، تتعرض لتداخلات من مصائد تلك الشقوق، مثل ايونات البيكربونات، التي تتفاعل مع شق الهيدروكسيد وبالتالي تقلل من فاعلية عملية الأكسدة التي تهدف الى تكسير المواد العضوية.

في حالة المياه ذات المستوي العالي من البيكربونات، والتي سوف تعالج بالأوزون / أشعة فوق بنفسجية أو الأوزون/ فوق أكسيد الهيدروجين؛ فانه من الضروري خفض القلوية قبل المعالجة. بالإضافة إلى العيوب سالفة الذكر فانه عملية استخدام الأوزون/ أشعة فوق بنفسجية تتطلب معدات وإجراءات صيانة مكلفة وغير مألوفة لدي المشغلين في اغلب محطات المعالجة.

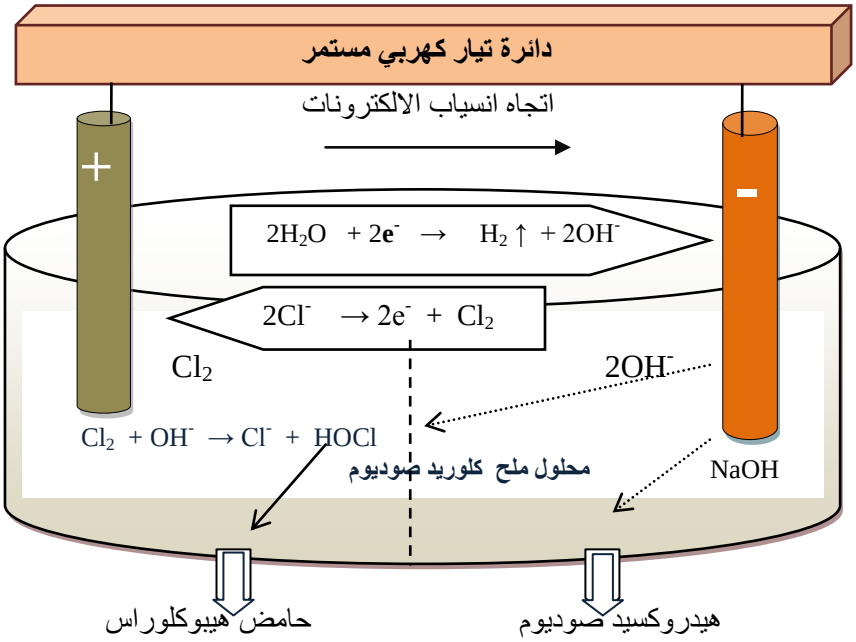
إنتاج خليط من العوامل المؤكسدة بالتحليل الكهربي

تُستخدم عملية التحليل الكهربي لمحلول ملح كلوريد الصوديوم (ملح المائدة) لإنتاج الكلور منذ القرن التاسع عشر. وقد حدث تطوير لهذه التقنية حديثا لإنتاج خليط من الكلور الحر وعوامل أكسدة قوية أخري عن طريق التحليل الكهروكيميائي لمحلول الملح لاستخدامها في تطهير مياه الشرب. و قد

بُني مبدأ هذه الطريقة علي أساس النظرية الكهروكيميائية الأساسية، فعند أنود الخلية الكهروكيميائية يتأكسد ايون الكلوريد ويتحول الى كلور جزيئي، الذي يتفاعل مع الماء مكونًا حامض الهيبوكلوراس (شكل ٣/٧) من خلال التفاعلات الآتية:

$$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^- \qquad (٣/٧٦)$$

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + Cl^- + H^+ \qquad (٣/٧٧)$$



شكل (٣/٧) إنتاج الكلور من خلال التحليل الكهروكيميائي لمحلول ملح المائدة

يتراوح الرقم الهيدروجيني للسائل الأنودي ما بين ٣ – ٥، وعند الكاثود تختزل الماء الي غاز الهيدروجين منتجًا محلولًا قلويًا رقمه الهيدروجيني يقع في المدى (١٠- ١١):-

$$2\ H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2\ OH^- \qquad (٣/٧٨)$$

يفصل المحلول الأنودي عن الكاثودي بحاجز نصف منفذ، ومع إنتاج الكلور الحر كعامل مؤكسد أو مطهر أولي من خلال وحدة توليد عوامل الأكسدة المختلطة، تحدث في نفس الوقت عند الأنود تفاعلات أخري قد تؤدي إلى تكوين الاوزون، وثاني أكسيد الكلور، وفوق أكسيد الهيدروجين، وتكوين العديد من النواتج الثانوية غير العضوية مثل الكلوريت والكلورات والبرومات. في حين أن هناك دراسة تشير الى عدم رصد الأوزون أو ثاني أكسيد الكلور أو فوق أكسيد الهيدروجين في محلول الأنود[٤٧]. وقد وُجد أن قوة الأكسدة لنواتج هذه التقنية تختلف عن قوة الأكسدة الناشئة عن الكلور منفردًا[٤٨].

يُنتِج المولد الواحد من هذه المولدات كلور حرًّا بتركيزات تتراوح ما بين ٢٠٠-٤٠٠ مجم/لتر،[٢٤،٤٧]

تتراوح فترة عمر النصف للأوزون في الهواء من ٢٠ الي ١٠٠ ساعة عند درجة الحرارة العادية[٤١].ويمكن وصف ذوبانية هذا الغاز في الماء من خلال قانون هنري المعتمد علي درجة الحرارة والرقم الهيدروجيني كما يلي:-[٥٠]

$H = 3.84 \times 10^{-7}\ [OH]\exp^{(-2428/T)}$ = ثابت atm^{-1}

تأثير الكلور والأوزون علي نوعية المياه

أولًا: ترسيب الحديد والمنجنيز

يتواجد الحديد والمنجنيز في المياه في صورة ذائبة نسبيا تحت الظروف الاختزالية علي شكل ايون الحديدوز (Fe^{2+}) وايون المنجنيز (Mn^{2+}) على هيئة مركبات معقدة عضوية وغير عضوية عديدة، وتتواجد مركبات الفلزين في المياه الأرضية الساكنة وأحيانا في المياه السطحية العميقة، وفي البحيرات الملوثة.

تتأكسد ايونات الحديدوز والمنجنيز وتترسب وتتراكم علي الأسطح الداخلية لأنظمة توزيع المياه مسببة لمشاكل عديدة. تضاف العوامل المؤكسد في المراحل الأولية من المعالجة لأكسدة الحديد والمنجنيز، وإذا لم تُضَف تلك المواد المؤكسدة في المراحل الأولى من المعالجة فيجب أن تضاف قبل مرحلة الترشيح حتي لا تجد طريقها الي المستهلك.

تقوم عوامل التطهير المؤكسدة ماعدا الكلورامينات بأكسدة الحديدوز(Fe^{2+}) الذائب إلى الحديديك (Fe^{3+}) وهو راسب برتقالي مشوب بالاحمرار، وأكسدة المنجنيز الثنائي (Mn^{2+}) الذائب إلى المنجنيز الرباعي وهو راسب اسود.

يعتمد التركيب الكيميائي للراسب علي طبيعة المياه، فمثلا: المنجنيز رباعي التكافؤ (Mn^{4+}) يترسب علي هيئة التركيب (MnOOH)، أما الحديد فيترسب علي هيئة هيدروكسيد حديديك ($Fe(OH)_3$)، عند القلوية المنخفضة وعلى هيئة كربونات الحديديك ($Fe_2(CO3)_3$)، وذلك في المياه عالية القلوية (ذات الرقم الهيدروجين ٩).

ويمكن إزالة المنجنيز باستخدام وسط ترشيحي من الرمل الأخضر المحتوي علي منجنيز، الذي يعمل علي تحفيز أكسدة المنجنيز الثنائي (Mn^{2+}) بالأكسجين الجزيئي، وعادة ما تكون أكسدة المنجنيز أبطء من أكسدة الحديد .

يتم تحفيز عملية أكسدة الحديد والمنجنيز التي تجرى بالهواء (الأكسجين)، بأيونات الهيدروكسيد من خلال إضافة الجير أو الصودا الكاوية لضبط الرقم الهيدروجيني المناسب للأكسدة.

في بعض الحالات يكون فيها عنصر الحديد والمنجنيز موجودين علي هيئة مركبات شديدة التعقيد وبالتالي فليس من السهل أكسدتهما بأكسجين الهواء الجوي وحده؛ إنما ينبغي استخدام عامل مؤكسد قوي[٨]مثل الكلور وبرمنجانات البوتاسيوم، كما يمكن استخدام ثاني أكسيد الكلور والأوزون لتحقيق هذا الغرض.

ثانيًا: التحكم في النمو البيولوجي الذي يكون ترسبات في محطات المعالجة

إن التحكم في النمو البيولوجي ضروريّ للغاية، وخصوصًا في حالة أن تكون المياه مهيأة من حيث النوعية والبيئة المحيطة للنمو البيولوجي، وهذا يشمل محطات معالجة المياه، وأبراج التبريد وخطوط نقل المياه.

في محطات معالجة المياه التي لها أحواض ومرشحات معرضة لضوء الشمس تنمو الطحالب والكائنات الدقيقة الأخرى في مراحل المعالجة، ومن خلال استخدام العوامل المؤكسدة الكيميائية فيمكن الحد من النمو البيولوجي مع المحافظة علي إبقاء مستوي متبقي من العامل المؤكسد خلال مراحل المعالجة لمنع ظهور النمو البيولوجي وازدهاره في نظام المعالجة. كما ينبغي التحكم في النمو البيولوجي في أنظمة معالجة المياه بالأغشية (التناضح العكسي).

يُعتبر الكلور هو أكثر عوامل الأكسدة والتطهير استخدامًا للتحكم في النمو البيولوجي الذي يسبب تكون رواسب وحراشيف علي الأسطح الداخلية لأنظمة المعالجة. وهناك عوامل مؤكسدة أخري مثل الأوزون وثاني أكسيد الكلور، ولكن كل نوع له مميزاته وعيوبه، فنجد أن الأوزون نشط جدًا تجاه الملوثات الموجودة في المياه، وعادة لا يمكث الأوزون كثيرًا في المحطة فهو يتلاشى مع الوقت وبالتالي لا تحدث فاعلية مستديمة خلال مراحل المعالجة المتلاحقة.

يتفاعل الأوزون مع المواد العضوية الطبيعية المتواجدة في المياه ويكوّن مركبات عضوية ابسط (ذات أوزان جزيئية أصغر من أسلافها) وتكون قابلة للتحليل الحيوي، وكنتيجة لذلك؛ فان نمو الكائنات

الدقيقة في الأحواض والوسط ألترشيحي يكون أكثر ازدهارًا، وهذا يتطلب إضافة الأوزون في مرحلة أخري وسطية في المحطة للتغلب علي مشكلة فقد الأوزون أو تبدده أثناء المعالجة.

ثالثًا: إزالة اللون

ينشأ اللون بالمياه بسبب تواجد مواد عضوية وغير عضوية وعادة ما تكون جميعها من منشأ طبيعي. وتختلف طبيعة هذه المواد تبعًا لظروف مصدر المياه، ففي كثيرا من الأحوال ينشأ اللون من تواجد المواد الدبالية التي تكوّن مركبات معقدة مع الفلزات [٤٩] ومن خلال إضافة المؤكسدات يُزال اللون جزئيًّا أو كليًّا .

تعمل الأكسدة علي مهاجما "الكروموفور"، وهو جزء من أجزاء جزيئات الأحماض الدبالية، وهذا الجزء يمتص الضوء المنظور، ومن خلال الأكسدة يتحول إلى شكل كيميائي لا يمتص الضوء، وبالتالي لا يري وتصبح المياه عديما اللون.

فمثلا: يقوم الكلور والأوزون بمهاجمة الرابطة الكربونية المتعددة. و ربما لا يكون عامل الأكسدة قادرًا علي إزالة اللون بمفرده، لذلك فان عملية المعالجة تكون عادة مسبوقة بالتخثير الكيميائي ثم الترسيب والترشيح. وهذه المراحل تساهم في إزالة اللون من المياه حينما تكون مصممة ومنفذة جيدا. و يمكن استخدام الكلور والأوزون وثاني أكسيد الكلور لإزالة اللون بعد المعالجة الأولية باستخدام أحد المروبات.

رابعًا: إزالة المذاق والروائح

تأتي مشاكل الطعم والرائحة للمياه فجأة و شديدة وتكون دائما متعلقة بنمو الكائنات الدقيقة في مصادر المياه. وكثيرًا ما يكون الطعم والرائحة غير مقبولين، وخصوصًا إذا كانت المصدر مياه سطحية؛ حيث تكون معرضة لنمو الكائنات الدقيقة بها مثل الطحالب الخضراء الزرقاء. وأحيانا تنشأ رائحة وطعم للمياه الأرضية نتيجة العمليات الكيميائية والبيولوجية التي تحدث للمياه الأرضية وينتج عن تلك العمليات مركبات محتوية علي الكبريت.

يستطيع الإنسان أن يشعر بالطعم والرائحة لتلك المركبات عند التركيزات المنخفضة جدّا (نانو جرام/لتر)، وتعتبر العوامل الكيميائية هي أكثر العوامل المسببة لمشاكل الطعم والرائحة بمياه الشرب.

وهناك العديد من المركبات الكيميائية التي تسبب المذاق والرائحة غير المقبولين مثل:-

- **مركبات الكبريتيدات - الالدهيدات المشبعة وغير المشبعة.**

ومن أهم المركبات المسببة للمذاق والرائحة:-

مركب جيوسمين (ترانس- ١، ١٠ داي ميثيل - ترانس-٩- ديكالول)، ومركب ميثيل ايزوبرنيول [١]

methyl isobarneol (MIB) ،trans-1,10 dimethyl-trans-9-decalol (geosmin)

وهذان المركبان هما من بين أكثر المركبات المسببة للطعم والرائحة في مصادر المياه، وهما من نواتج عمليات الهدم الحيوي للطحالب الخضراء الزرقاء والاكتينومايسيس.

وتُعتبر الأكسدة واحدة من طرق المعالجة للتحكم في مشاكل الطعم والرائحة، ولكنها لا تحقق نجاحًا كاملًا[٤٢]، علاوة علي ذلك فان إضافة العامل المؤكسد قد يضيف مذاق وطعم جديدا للمياه[٥١].

يستخدم الكلور وبرمنجانات والبوتاسيوم والأوزون وثاني أكسيد الكلور لإزالة الطعم والرائحة.
يستخدم الكربون المنشط في إزالة الطعم والرائحة واللون من المياه، ولا ينبغي في هذه الحالة استخدام الكلور لأنه يتفاعل مع الكربون ويقلل ذلك من فاعليته، وقد تتكون مركبات عضوية جديدة.[٥٢]

"يُستخدم ثاني أكسيد الكلور في إزالة الطعم والرائحة في بعض البلدان الأوروبية وفي كثيرا من دول أمريكا الشمالية"

يعتبر الأوزون أكثر فعالية في إزالة المركبات المسببة لمشاكل الطعم والرائحة وخاصة مركب الجيوسمين والميثيل ايزوبرنيول.

خامسًا: المساعدة في عملية الترويب

تعمل الأكسدة بالكلور علي الهدم النسبي لحالة الاستقرار التي تكون عليها المادة الغروية المعلقة بالمياه، مما يساعد في عملية الترويب وبالتالي يساعد في عمليتيّ الترسيب والترشيح. ويمكن توضيح آلية هذه العملية في أن أكسدة المادة العضوية تؤدي إلى جعلها ذات قطبية، وبالتالي تخرج من حالة الاستقرار والتنافر نتيجة التعادل النسبي للشحنات.

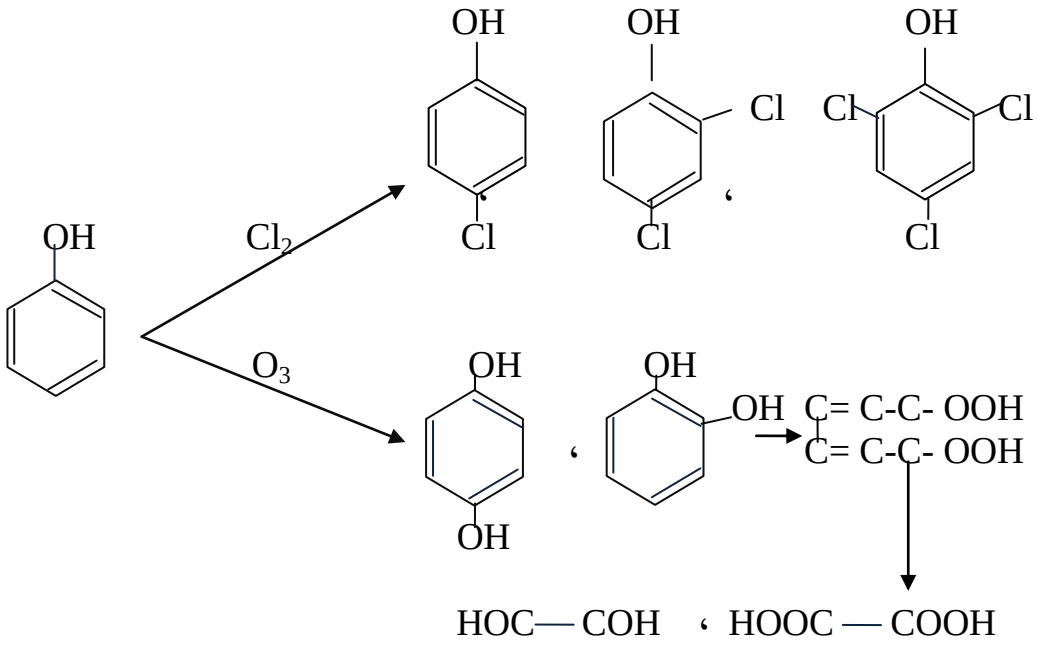
كما ينشأ عن أكسدة المادة الدبالية مركبات أخري أكثر قطبية أو مجموعة قابلة للاستخلاب، وهذا يساعد في عملية الترويب، كما أن أكسدة أيونات الفلزات مثل الحديد والمنجنيز (إن وجدا) تؤدي الى تكوّن مركبات غير ذائبة وقابلة للترسيب[٥٣].

"يُعتبر الأوزون عاملًا مساعدًا للترويب وأكثر فاعلية من الكلور[٥٤] وبالتالي يتحسن أداء المعالجة، ومن ثم يقلل ذلك من الجرعات المستخدمة من المروبات.

سادسًا: أكسدة الفينول والمواد العضوية الصناعية

تعتمد الأكسدة الكيميائية بشدة علي طبيعة المادة العضوية الموجودة بالمياه، فبعض المواد عضوية بسيطة نسبيا في أكسدتها، بينما البعض الآخر يقاوم الأكسدة فمثلًا: تتفاعل المركبات الفينولية بشدة مع الكلور[٢] والأوزون[٥٥] شكل (٣/٨).

عندما يتفاعل الكلور مع الفينول تظهر رائحة وطعم غير مقبولين نتيجة تكون فينولات مكلورة، أما مع الأوزون تحدث أكسدة كاملة وتتكون جزئيات ذات قطبية مثل حامض جليوكزاليك، ولكن عند الجرعات المنخفضة تحدث أكسدة جزئية ينشأ عنها تكون هيدروكينونات وحامض ميكونيك[٢، ٥٥]



شكل (٣/٨) النواتج الثانوية الرئيسية الناتجة من أكسدة الفينول بواسطة الكلور والأوزون

تعتمد نوعية النواتج الثانوية لكل عامل مؤكسد علي جرعته، فعند الجرعات المنخفضة تتكون نواتج ثانوية لأكسدة جزئية. ومن الناحية النظرية فالأوزون وعوامل الأكسدة الأخرى تكون قادرة علي التفاعل مع المركبات العضوية الصناعية ولكنها تكون انتقائية بمعني أن معدلات العمليات تكون قليلة الفاعلية جدا. وهذا يعتبر صحيحا عندما تكون الملوثات الموجودة ذات تركيزات صغيرة جدّا

(ميكروجرام/لتر) وتتداخل وتؤثر علي الملوثات الطبيعية الأخرى ذات التركيزات الأكبر نسبيًّا (ملليجرام/لتر).

وتعتبر عوامل الأكسدة الشائعة مكلفة إذا استخدمت لإزالة بعض المواد العضوية، مثل ثلاثي كلورواثيلين والمذيبات المكلورة الأخرى ومبيدات الآفات التي قد تتواجد في المياه السطحية الملوثة أو المياه الأرضية.

تكوين النواتج الثانوية للأكسدة أو للتطهير

هذه النواتج عبارة عن مركبات كيميائية تنتج من التفاعلات التي تحدث أثناء تطهير المياه بالمطهرات مثل الكلور. تحتوى هذه المركبات على ذرات الكلور و البروم وبعض هذه المركبات يسبب مشاكل تتعلق بالصحة العامة (دراسات أجريت على الحيوانات) البعض الآخر من تلك النواتج الثانوية قد يسبب تسممًا كبديًّا أو حدوث طفرات وراثية، ونتيجة لذلك قامت وكالة حماية البيئة الأمريكية بوضع قاعدة لتنظيم تواجد مثل تلك النواتج الثانوية في مياه الشرب في ١٩٧٩ و ١٩٩٨.

يتحكم النشاط الكيميائي لتلك المطهرات في تأثيرها على الكائنات الدقيقة، وكذلك المواد العضوية الذائبة، فيتفاعل مع أغشية خلايا الكائنات الدقيقة و مكونات أنويتها، وفي واقع الأمر فان كمية المادة المطهرة المستخدمة تعتمد على التفاعلات التي تتم مع المكونات الحيوية وغير الحيوية في المياه.

أن أكثر المواد العضوية المتواجدة بالمياه السطحية أو الأرضية ذات منشأ طبيعي، فالبعض منها نشط جدّاً مع العديد من العوامل المؤكسدة، و ينتج عن ذلك نواتج جديدة مثل الكلوريد و الهيدروكسيد و الكلوريت، ونواتج أكسدة أخرى للمادة العضوية أو غير العضوية الموجودة بالمياه.

يقوم العامل المؤكسد بمهاجمة المادة العضوية الطبيعية على مواقع الكربون = كربون (الرابطة المزدوجة) و تنتج نواتج عضوية ثانوية مؤكسدة، وغالبًاً ما تحتوى على ذرات أكسجين، و مع زيادة معدل التفاعل تصبح المادة العضوية محطمة و تكون أبسط في التركيب من أسلافها.

تشتمل تلك النواتج الثانوية بوجه عام على أحماض أحادية وثنائية وثلاثية الكربون وأحماضاً أحادية و ثنائية الكربوكسيل و الدهيدات و كيتونات،[٥٦] ومن أمثلة تلك النواتج الثانوية حامض

أوكزاليك، حامض الخليك وحامض الفورميك، و قليل من تلك المطهرات يكون قادرًا على إنتاج نواتج ثانوية تحتوى على ذرات من الهالوجين (كلور – بروم – يود).

يتفوق الكلور والبروم في إنتاج تلك المركبات الثانوية، يليهما الكلورامين والأوزون، ويمكن قياس الهاليدات العضوية من خلال ما يُعرف بالهاليدات العضوية الكلية (TOX) أو بتعبير أكثر دقة الهاليدات العضوية الذائبة (DOX).

يقوم الكلور والأوزون بأكسدة البروميد المتواجد بصورة طبيعية فى المياه، ويتكون بروم نشط، وهذا البروم النشط يتفاعل مع المواد العضوية الطبيعية، وتتكون مركبات عضوية برومية مثل البروموفورم، و في وجود الكلور الحر يتكون خليط من المواد العضوية البرومية و الكلورية. وتقاس تلك المركبات الهالوجينية الثانوية إجمالا كهاليدات عضوية (TOX).

أولًا: النواتج الثانوية للكلورة

تشتمل النواتج الثانوية للكلورة على مدى واسع من المركبات العضوية الهالوجينية و غير الهالوجينية، وقد وُضعت المركبات الهالوجينية فى بؤرة الاهتمام وخصوصًا "تراي هالوميثان وأحماض هالواسيتيك"[٢٣].

وفى حالة المياه المعالجة المحتوية على تركيز منخفض من البروميد، يحدث إحلال كامل للكلور وتتكون مركبات الكلوروفورم و داي و تراي كلورواسيتيك بصفة سائدة. أما المياه المحتوية على تركيزات متوسطة أو عالية من البروميد فسوف تتكون مستويات عالية من المركبات العضوية المحتوية على البروم مثل: برومو داي كلوروميثان و برومو داي كلورو اسيتيك أسيد.

وقد تركز الاهتمام في السبعينات من القرن الماضي على النواتج الثانوية للكلورة مثل: مركبات تراي هالوميثان، و أصبحت تخضع للمسح الروتيني في محطات معالجة المياه[٥٨] و مع بداية الثمانينات اكْتُشِفَتْ أحماض الهالو اسيتيك في المياه المكلورة[٢٥، ٢٦].

وقد سُجلت العديد من النواتج الثانوية الهالوجينية في مياه الشرب المكلورة، وكان أكثرها دراسة و عمقاً مركبات هالوبروبانون و هالواسيتونيترايل و كلوروبيكرين و كلورال هيدريت. ينتج هالو

اسيتونيترايل من كلورة الأحماض الأمينية والمادة البروتينية،[٥٩] ويعمل التركيب النيتروجيني للمادة على تكوين هالواسيتونيترايل[٦٠]

وهناك نواتج هالوجينية أخرى تشابه بعض النواتج الثانوية الشائعة للتطهير بالأوزون مثل: هالو بروبانون (١،١،١ تراي كلورو بروبانون) و الكلورال هيدريت (هالو الدهيد)، وهذه المركبات تتواجد بتركيزات مرتفعة في المياه التي سبق لها المعالجة بالأوزون[٤٥، ٦١]

و حيث أن المواد العضوية الهالوجينية تمثل نسبة ضئيلة لا تتعدى ١٠% من الكلور الكلى المطلوب، ومن هنا نستنتج أن أكثر النواتج الثانوية لعملية الكلورة لا تحتوى على الكلور.

نلاحظ من الجدول (٣/٧) أن أغلب النواتج الثانوية غير الهالوجينية هي أحماض أليفاتية أحادية وثنائية وأحماض بنزين بولي كربوكسيليك، وحيث إن تلك المركبات ليس لها تأثير محتمل على الصحة العامة، فلم تدرس جيداً. ومن الملاحظ أن العديد من تلك المركبات قابلة للانحلال الحيوي السهل، وبالتالي فهي تعد من المحتوى الكربوني العضوي القابل للانحلال الحيوي.

ثانيًا: النواتج الثانوية للتطهير بالأوزون

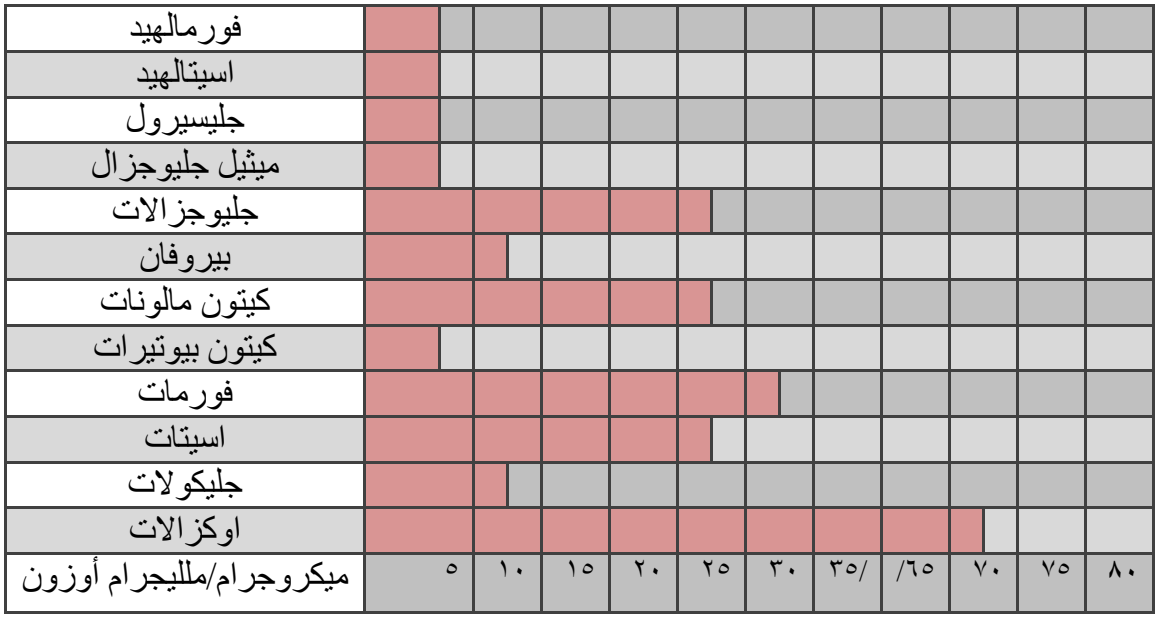
يؤدى تطهير المياه بالأوزون إلى تكوين نواتج ثانوية برومية، هذا في حالة احتواء المياه على تركيزات من البروميد؛ حيث يقوم الأوزون بأكسدة البروميد و تحويله إلى حامض هيبوبروماس، كما في المعادلة الآتية:

$$O_3 + Br^- + H^+ \rightarrow HOBr + O_2$$

يستمر بعض البروم المؤكسد في التفاعل مكونًا أيون البرومات، والجزء الأكبر من حامض الهيبوبروماس الناتج يتفاعل مع المواد العضوية الطبيعية مكونًا مركبات عضوية برومية، وهذه المركبات الثانوية تشمل نفس المركبات الثانوية الناتجة من التطهير بالكلور، وهى: تراي هالوميثان (بروموفورم)، و حامض هالو اسيتيك (داي برومو اسيتيك) وهالو اسيتونيترايل. وتظهر الدراسات أن ٧% من البروميد المتواجد فى المياه الخام يدخل ضمن المركبات العضوية الهالوجينية (بروميد عضوي كلي TOBr) تنتج من عملية التطهير بالأوزون تحت الظروف النموذجية لمعالجة مياه الشرب[٦٢].

وتشير الدراسات أن الغالبية العظمى من النواتج الثانوية للتطهير بالأوزون تكون غير هالوجينية وتتماثل مع النواتج الثانوية للمطهرات الأخرى. فالأوزون و ثاني أكسيد الكلور يُنتجان نفس الأحماض الكربوكسيلية المنخفضة الوزن الجزيئي[٥٦].

يوضح الشكل (٣/٩) النواتج الثانوية الأساسية للتطهير بالأوزون



شكل (٣/٩) النواتج الثانوية الأساسية بالميكروجرام لكل ملليجرام من الأوزون[٦٣]

هناك بعض نواتج الأكسدة الناشئة عن الأوزون، وتشمل الأحماض الهيدروكسيلية والأحماض الأروماتية والمركبات الأروماتية الهيدروكسيلية (جدول ٣/٩)، وهناك أيضًا بيرو كسيد عضوي وإيبوكسيد.

ملخص للنواتج الثانوية للتطهير

في بداية السبعينيات من القرن الماضي؛ اكتشفت مركبات الهالوميثان، وتم التعرف على المئات من المركبات كنواتج ثانوية لعملية تطهير مياه الشرب. يشتمل جدول (٣/٧) على قائمة من تلك المركبات.[٥٧]

نلاحظ أن كل مطهر من الأربعة المذكورة في هذا الجدول له تفاعلاته الكيميائية الخاصة به، فالأوزون هو المطهر الوحيد الذي ينتج كميات يمكن قياسها من البرومات. على الرغم من ذلك فهناك عدد معين من المركبات الشائعة التي تنشأ عند استخدام مطهر أو أكثر، فنجد على سبيل المثال حامض

ألخليك وهو من الأحماض الكربوكسيلية البسيطة شائع التكوين ضمن النواتج الثانوية بغض النظر عن نوع المطهر المستخدم.

و قد وُجد أن كل المطهرات المؤكسدة تنتج كربونايل مثل الفورمالدهيد، ويُعتبر الأوزون وثاني أكسيد الكلور هما الأكثر إنتاجًا لمثل هذه المركبات يليهما الكلور و الكلورامين و هناك بعض المركبات الهالوجينية مثل: أحماض داي هالو اسيتيك تنتج مع المطهرات الأربعة، ولكن تختلف كميات النواتج الثانوية تبعًا لنوع المطهر و الجرعة المستخدمة منه، وتركيز البروميد بالمياه، ولهذا السبب قُسمت النواتج الثانوية بحسب كمياتها على النحو التالي:

التركـــــيز	المستـــــــــــــوى
أكبر من ١٠٠ ميكروجرام / لتر	عالي جداً
١٠ - ١٠٠ "	عالي
١ – ١٠ "	متوسط
أقل من ١	منخفض

جدول (٣/٧) بعض النواتج الثانوية لأربعة مطهرات

النواتج الثانوية	الكلور	الكلورامين	ثاني أكسيد الكلور	الأوزون
اكسي كلور مثل: - الكلورات – الكلورايت اكسي بروم مثل: - البرومات – البرومايت			عالي جدا	متوسط
تراي هالو ميثان مثل: - كلوروفورم – داي كلورو بروموميثان - كلورو داي بروموميثان - بروموفورم	عالي متوسط			متوسط
هالو الكان أخرى مثل: - ١و٢ داي بروموايثان - ١و٢ داي بروموبروبان	منخفض منخفض			
هالو هيدرين				متوسط
هالو اسيد (مشبعة) مثل: - داي كلورو اسيتيك اسيد - تراي كلورو اسيتيك اسيد - مونو كلورو اسيتيك اسيد - برومو كلورو اسيتيك اسيد - وبرومو داي كلورواسيتيك اسيد - مونوبروموا سيتيك - داي برومو اسيتيك اسيد - تراي برومو اسيتيك اسيد	عالي عالي متوسط متوسط متوسط منخفض	متوسط متوسط		متوسط

تابع جدول (٣/٧) بعض النواتج الثانوية لأربعة مطهرات

النواتج الثانوية	الكلور	الكلورامين	ثاني أكسيد الكلور	الأوزون
هالو كيتون مثل: ١،١،١- تراي كلورو بروبانون	متوسط			
هالو الدهايد مثل: - كلورال - كلورو اسيتالهايد - داي كلورو اسيتالهيد	متوسط			
هالو نيترايل مثل: - داي كلورو اسيتو نيترايل - تراي كلورو اسيتو نيترايل	متوسط			
اليفاتيك مثل: فورميك – اسيتيك – بيوتيريك – بينتانويك	عالي		عالي	عالي
اليفاتيك داي اسيد (مشبع) مثل: - اوكزاليك	عالي		عالي	عالي جدا
هالو الدهايد مثل: - كلورال - كلورو اسيتالهايد - داي كلورو اسيتالهيد	متوسط			
الدهايد مثل: - فورمالدهايد - اسيتالهايد - بروبانال - جليوجزال - ميثايل جليوجزال				عالي عالي عالي عالي
كيتون مثل: اسيتون- بروبايل ايثيل كيتون				متوسط
كيتو اسيد مثل: - بايروفيك - جليوجزاليك - كيتومالونيك				عالي عالي عالي عالي

ملحوظات: - عالي جدا = اكبر من ١٠٠ ميكروجرام/لتر عالي = ١٠ - ١٠٠ ميكرو جرام/لتر

- متوسط = ١- ١٠ ميكرو جرام/لتر منخفض = اقل من ١ ميكروجرام/لتر

- يشتمل الجدول على بيانات غير مذكورة وذلك يرجع لكونها تقع في المستويات المتوقعة لمياه الشرب النموزجية.

العوامل التي تحكم تكوين النواتج الثانوية

أولا : الزمن

يُعتبر عامل الزمن من العوامل الأكثر أهمية في تكوين وتركيز النواتج الثانوية عند تواجد كمية من المطهر متبقية. وتُعتبر مركبات تراي هالوميثان وأحماض هالو اسيتيك مركبات ثابتة كيميائيًّا وتتراكم فى المياه المطهرة ويزداد تركيزها مع الوقت طالما ان هناك مطهر متبقيًّا.

في بعض الحالات يقل تركيز حامض الهالو اسيتيك حتى ينعدم بعد فترة طويلة من المكوث في أنظمة توزيع المياه، وهذه الظاهرة ترجع إلى التحلل الحيوي، وهذا لا يحدث للتراي هالوميثان التي لا تتحلل حيويًّا إلا تحت الظروف اللاهوائية.

تُظهر التجارب المعملية أن أحماض الهالو اسيتيك تتكون بسرعة اكبر من الهالوميثان، كما أن المركبات البرومية المماثلة تتكون بسرعة اكبر من المركبات الكلورية، وهذا يجعل نسبة أحماض الهالو اسيتيك إلى الهالو ميثان تكون اكبر عند المراحل المبكرة من التفاعل، وتقل هذه النسبة ببطء مع الوقت، وقد دعم هذه النتائج ما تم رصده من بيانات لهذه المركبات بمحطات المياه وشبكات التوزيع.[٦٤]

وعلى نقيض الكلورة فان النواتج الثانوية للأوزون تتكون بسرعة وتزداد قليلا مع الوقت، ويرجع هذا إلى التبديد السريع للأوزون، فبمجرد تبدد الأوزون تستمر النواتج الثانوية في تفاعلات التحلل المائي وما ينتج من نواتج أخرى تكون ضئيلة للغاية.

هناك العديد من المركبات العضوية الثانوية الهالوجينية تكون غير ثابتة كيميائيًّا، فتتعرض للتحلل المائي أو لمزيد من الأكسدة. ولهذه المركبات وقت للتفاعل تصل فيه إلى أقصى تركيز (راجع تأثير الرقم الهيدروجيني). وبعض المركبات الثانوية مثل: داي كلورو اسيتونيترايل تتحلل ببطء وتصل إلى أقصى تركيز بعد أيام، والبعض الآخر يكون أكثر نشاطا وفعالية ويتحلل إلى مستويات ضئيلة لا يمكن قياسها في فترة زمنية من دقائق إلى ساعات (مثل ١،١ داي كلورو بروبانون).

ثانيا: جرعة المطهر

هناك تأثير لجرعة المطهر المستخدمة على تركيز النواتج الثانوية، ولكن غالبًا ما يكون ضئيلًا، فعندما يُضاف المطهر للمياه لا بُد من الحرص على الإبقاء على تركيز متبقي معين من المطهر لكي

يستمر الأداء ألتطهيري داخل شبكات التوزيع. ويرجع التأثير الضئيل لقيمة الجرعة على تكوّن النواتج الثانوية الى انه عادة ما يضاف المطهر بكمية تتوافق مع كمية أو الاحتياج للمطهر، والنواتج الثانوية ذات ارتباط بتواجد المواد العضوية بالمياه. وعندما ينخفض المطهر المتبقي إلى أقل من ٠،٣ مجم / لتر تصبح النواتج الثانوية قليلة التكوين.

ومع الأنواع الأخرى من المياه المحتوية على تركيزات قليلة من الكربون العضوي الكلى لا تزيد تركيزات الهالوميثان.

ونسوق هنا قاعدة عامة؛ وهي أن جرعة المطهر تلعب دوراً كبيراً فى تكوين النواتج الثانوية للتطهير أثناء التطهير الأولى عنه أثناء التطهير الثانوي و يرجع هذا إلى أن التطهير الأولى عادة يضاف بكمية أقل من الجرعة الممتدة المفعول (أي التي لها أثر متبقي على المدى) لذلك فإن المطهر هو المتفاعل الذي يقع على عاتقه تكوين النواتج الثانوية لكونه قابل للتحكم بحكم أنه هو المضاف وليس المواد العضوية الموجودة بالمياه المعالجة.

التطهير باستخدام الأشعة فوق البنفسجية

تعمل الأشعة فوق البنفسجية على قتل الكائنات الدقيقة والمسببات المرضية من فيروسات وبكتريا وطفيليات. وتتميز الأشعة فوق البنفسجية بقدرتها الفائقة على إبادة الكريبتوسبوريديوم بمياه الشرب، كما أن الأشعة فوق البنفسجية لا ينشأ عنها تكوّن البرومات كما يحدث عند استخدام الأوزون في التطهير.

عند استخدام الأوزون كمطهر أولي ثم يتبعه استخدام الأشعة فوق البنفسجية لا تتكون المركبات التي تقوم بتكسير الاندوكراين، والتي قد تنتج من بعض المطهرات الأخرى، أو تتواجد في الماء نتيجة وصول مخلفات صناعات الأدوية ومنتجات العناية بالصحة. ونظام الاندوكراين هو واحد من اثنين من الأنظمة الرئيسية المسئولة عن تنظيم إنتاج الهرمونات في جسم الإنسان والكائنات الحية الأخرى.[٦٥]

تنتج الأشعة فوق البنفسجية بواسطة لمبات بخار الزئبق، وحديثا تنتج بواسطة لمبات بخار الانتيمون.[٦٦] تجرى عملية تعريض المياه للأشعة فوق البنفسجية من خلال مرور المياه بحيث تحيط احاطة كاملة بلمبة الأشعة، أو أن تكون لمبات الأشعة تحيط بماسورة شفافة من التفلون (Teflon) والتي تمر من داخلها المياه. وهناك العديد من التقنيات المستخدمة في تطبيقات التطهير بالأشعة فوق البنفسجية.[٦٧]

تعتبر فترة التماس لأنظمة التطهير بالأشعة فوق البنفسجية قصيرة جدًا (أقل من دقيقة). ولكن ليس هناك مطهير متبقي لذلك لا بُد من استخدام مواد التطهير المتبقي في المراحل النهائية من المعالجة. ويجب اتباع برنامج نظافة للقميص المحيط بلمبات الأشعة وكذلك مواسير التفلون للخلص من االترسبات التي تحول من دون نفاذية الأشعة خلال مقطع المياه.[٦٦] تتأثر فعالية الأشعة فوق البنفسجية في التطهير بمعدل انسياب المياه وبنوعية المياه المعالجة.[٦٨، ٦٩]

إن الحاجة الى معالجة ناجعة للمياه أصبح أكثر إلحاحًا من ذي قبل، فاستخدام الأوزون يتزايد باستمرار باعتباره أقل من مطهر الكلور في تكوين المركبات الثانوية للتطهير، كما أن النواتج الثانوية الناشئة عنه قابلة للانحلال والتكسير مع الوقت. ومن المفضل استخدام الأوزون في التطهير الأولي بالمحطات ثم يتبعه استخدام الكلور للحصول على قدر من المطهر المتبقي حتى نهاية شبكات توزيع المياه.

يلخص جدول (٣/٨)[٧٠] فعالية عوامل التطهير (الأكسدة) الشائعة الاستخدام في معالجة المياه، ولابد من الأخذ في الاعتبار أن الكفاءة النسبية للمطهر تتأثر بنوعية المياه المعالجة.

جدول (٣/٨) فاعلية عوامل التطهير (الأكسدة) المستخدمة في معالجة المياه

البنود	العوامل المؤكسدة (المطهرة)					
	كلور	كلورامين	أوزون	ثاني أكسيد الكلور	برمنجانات	أكسجين
إزالة الحديد	+	-	+	+	+	+
إزالة المنجنيز	≠	-	+	+	+	-
إزالة الكبريتيد	+	-	≠	≠	≠	+
إزالة المذاق والرائحة	≠	-	+	+	≠	≠
إزالة اللون	+	-	+	+	≠	-
مساعدة الترويب	+	-	+	-	≠	-
تكوين الهالوميثان THMs	+	-	-	-	≠	-
المواد العضوية المخلقة	≠	-	≠	≠	≠	-
النمو البيولوجي	+	≠	-	+	≠	-

الرمز (+) يعني فعّال والرمز ≠ يعني فعّال الى حد ما والرمز (–) يعني غير فعّال.

من خلال ما تقدم من معلومات في هذا الفصل، يمكن ايجاز المميزات والعيوب للمطهرات المستخدمة في تطهير مياه الشرب في جدول (٣/٩)[١]، وينبغي الاشارة الى ان فعالية اي مطهر قد تختلف نسبيا تبعًا لطبيعة المياه المعالجة.

جدول (٣/٩) المميزات والعيوب لعوامل الأكسدة المستخدمة في معالجة المياه

عامل الأكسدة	المميزات	العيوب
الكلور	مؤكسد قوي. مطهر قوي. بسيط الإضافة. له متبقي دائم نسبيا. رخيص نسبيا له تاريخ ممتد من الاستخدام.	يكون مركبات ثانوية ذات حدود قصوى لا ينبغي تجاوزها. (DBDs) قد يساهم في مشاكل المذاق والرائحة. تتأثر الفاعلية بالرقم الهيدروجيني.
الكلورامين	لا ينشأ عنه تكون هالوميثان. (THMs) له متبقي دائم. يتحكم في النمو الميكروبي. بسيط الإضافة. له تاريخ ممتد من الاستخدام.	مؤكسد ضعيف. مطهر ضعيف. يكون بعض المواد العضوية المكلورة. (TOX) تتأثر الفاعلية بالرقم الهيدروجيني. تنشأ عنه مشاكل المذاق والرائحة. قد تنشأ عنه مشاكل تتعلق بالنيترة.
الأوزون	مؤكسد قوي جدًا. مطهر قوي جدًا. لا ينشأ عنه هالوميثان أو مواد عضوية مكلورة. لا ينشأ عنه مشاكل المذاق والرائحة. تتكون نواتج ثانوية قابلة للانحلال الحيوي. تنشأ عنه مركبات هالوجينية عضوية في حالة احتواء المياه المعالجة على تركيز عالٍ من البروميد. يتأثر قليلا بالرقم الهيدروجيني. يساعد في عملية الترويب.	لا يبقي مطهر متبقي في المياه. مكلف نسبيًا ينتج في موقع الاستخدام و يتطلب طاقة كهربائية كبيرة. طريقة الإنتاج والتغذية معقدة. له تأثير تأكلي على الفلزات. يكون نواتج ثانوية قابلة للانحلال الحيوي تتطلب التحكم فيها. تشأ عنه تكون مركب البرومات.
ثاني أكسيد الكلور	عامل مؤكسد قوي. مدة البقاء طويلة. فعال في التخلص من بعض المواد المسببة للمذاق والرائحة. لا ينشأ عنه هالوميثان. لا يتأثر بالرقم الهيدروجيني. لا يتفاعل مع الأمونيا.	تتكون نواتج ثانوية مثل الكلوريت والكلورات. ينتج في موقع الاستخدام. تنشأ عنه روائح الهيدروكربونات. من الصعوبة المحافظة على مطهر متبقي دائم.
محلول برمنجانات البوتاسيوم	سهلة الاستخدام. فعال في أكسدة الحديد والمنجنيز. لا ينشأ عنها هالوميثان. فعال في التخلص من أنواع معينة من المذاق والرائحة.	ينشأ عنه راسب ثاني أكسيد المنجنيز ولا بُد من ازالته. عامل مؤكسد متوسط القوى. تتلون المياه باللون البنفسجي اذا لم تضبط الجرعة المستخدمة. القدرة التطهيرية محدودة.
الأكسجين	سهل الاستخدام. لا ينتج عنه نواتج ثانوية.	عامل مؤكسد ضعيف نسبيا لأغلب تطبيقات معالجة المياه عدا أكسدة الحديدوز والكبريتيد. يسبب حدوث تأكل وتكون حراشيف ورواسب.

كيفية التخلص من النواتج الثانوية لعملية التطهير

تعتبر النواتج الثانوية للتطهير هي مركبات صغيرة الوزن الجزيئي محبة للماء وهذا يجعلها صعبة الازالة بالطرق الفزيائية- الكيميائية. ويمكن التخلص من مركبات الهالوميثان بالطريقتين التاليتين:

- الانتزاع بالهواء Air stripping
- أو بالادمصاص على الكربون المنشط الحبيبي GAC

هناك بعض النواتج الثانوية القابلة للانحلال الحيوي وهذه النوعية تتطلب الترشيح الحيوي النشط، ومن أمثلة تلك النواتج الالدهيدات والأحماض العضوية الناتجة من التطهير بالاوزون.

خلاصة فصل التطهير

١- تعتمد الكثير من الدول علي استخدام الكلور والهيبوكلوريت كمطهرات، وهناك دول تستخدم ثاني أكسيد الكلور أو الأوزون. ومع زيادة الوعي بأهمية إزالة وتثبيط نشاط المسببات المرضية الأكثر مقاومة للمطهرات مثل: **الجيارديا والكريبتوسبوريديوم** أصبح هناك حرصا شديدا علي أن تتحقق الفاعلية العالية لعملية الترويب والترسيب ثم الترشيح وانتهاءً بالتطهير وبالتالي تصبح المياه خالية من أي مسببات مرضية.

٢- يعتبر الكلور من أكثر مواد التطهير (المؤكسدة) المستخدمة في محطات معالجة المياه وهو يتواجد في صورة سائلة أو غازية في اسطوانات معدنية تحت تأثير ضغط، أو في صورة محلول مركز مائي (هيبوكلوريت الصوديوم)، أو في صورة صلبة (هيبوكلوريت الكالسيوم). وهذه الأشكال الثلاثة جميعها متكافئة كيميائيًّاً.

٣- حددت المواصفات القياسية حد لتركيز الكلور في بيئة العمل؛ بحيث لا يتجاوز ٠,٥ جزء في المليون كمتوسط تركيزات في الثماني ساعات عمل والتي يمكن أن يتعرض لها العامل خلال خمسة أيام عمل، وفي حالة التعرض باستمرار لفترة قصيرة مدة ١٥ دقيقة فيجب الا يتجاوز التركيز ١ جزء/مليون[١٢].

٤- تزداد القدرة التطهيرية للكلور كلما قل الرقم هيدروجيني عن ٨ وتصل لى أقصى قيمة اعتبارًا من ٦ فأقل ويرجع ذلك لسيادة حامض الهيبوكلوراس والكلور الجزيئي اللذين لهما قدرة تطهيرية عالية.

٥- عند تواجد أمونيا في الماء الذي يطهر بالكلور يحدث استهلاك عال من الكلور للوصول الى أعلى قدرة تطهيرية، نتيجة تكوّن مركبات الكلورامين (كلور متحد) ذات القدرة التطهيرية الضعيفة بالمقارنة بالكلور الحر الذي يتواجد على صورة حامض الهيبوكلوراس.

٦- غاز الاوزون من العوامل المطهرة الفائقة الواعدة المنافسة للكلور ولكنه لا يتبقى في الماء لفترة طويلة، ويمكن استخدامه في التطهير الاولي بالمحطات ثم يتبعه استخدام الكلور كمطهر نهائي للحصول على قدر من المطهر المتبقي حتى نهاية شبكات توزيع المياه.

٧- بجانب التأثير التطهير للمطهرات تقوم ايضا بازالة اللون والروائح غير المرغوب فيها من المياه، كما تساعد في عملية الترويب.

٨- تعمل الأشعة فوق البنفسجية على قتل الكائنات الدقيقة والمسببات المرضية من فيروسات وبكتريا وطفيليات. وتتميز الأشعة فوق البنفسجية بقدرتها الفائقة على إبادة الكريبتوسبوريديوم بمياه الشرب، كما أن الأشعة فوق البنفسجية لا ينشأ عنها تكون البرومات كما يحدث عند استخدام الأوزون في التطهير.

مراجع الفصل الثالث

1. American Water Works Association, Water Quality and Treatment, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

2. Morris, J.C. "Formation of halogenated organics by chlorination of Water supplies", EPA-600/1 -75-002. Washington, D.C. U.S Environmental Protection Agency, 1975.
3. Lide, D. R. ed. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 76th ed. Boca Raton, Fla.: CRC press, 1995.

4. Stumm, W., and Morgan, J.J. Aquatic Chemistry, 3rd ed. New York: Wiley Interscience, 1996.

5. Pankow, J.F. Aquatic chemistry concepts. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1991.

6. Tratnyek, P.G. and Hoigne, J. "Kinetics of reactions of chlorine dioxide (ClO_2) in water I I Quantitative structure –-activity relationships for Phenolic compounds." ***Water Research***, 28(1), 1994:57.

7. Brezonik, P.L. Chemical Kinetics and process dynamics in Aquatic Systems. Boca Raton: Lewis publishers, 1994.

8. Pankow, J. F. and Morgan, J. J., "Kinetics for the Aquatic Environment, 2," Environ. Sci. Tech., vol. 15, 1981, p. 1306.

9. Reckhow, D.A and Singer, P.C. "Mechanism of organic halide formation during fulvic acid chlorination and implication with respect to preozonation", Water chlorination: Environmental Impact and Health effects, Vol. 5. R.L. Jolley, R.J. Bull, W.P. David, S. Katz, M.H. Roberts, Jr., and V.A. Jacobs, eds., pp. 1229-1257. Chelsea, MI: Lewis publishers, 1985.

10. World Health Organization, "Guidelines for Drinking Water Quality, 4rd ed., Geneva, WHO, 2011.

11. الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، المواصفات القياسية المصرية رقم ٩٧٧ للكلور السائل، ٢٠٠٣

12. الهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية، القانون رقم ٤ /١٩٩٤ والمعدل بقرار رقم ٢٠٠٥/٣٣٨

13. الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، المواصفات القياسية المصرية رقم ١٤٦٢ لمحلول هيبوكلوريت الصوديوم، ٢٠٠٨.

14. الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، المواصفات القياسية المصرية رقم ٩٣٩ لمركب هيبوكلوريت الكالسيوم، ٢٠٠٨.

15. Baker, R. J.,"Characteristics of Chlorine Compounds," Jour. Water Pollution Control Fed., vol. 41, 1969, p.482.

16. Bolyard, M., Fair, P. S., and Hautman, D. P. "Occurrence of Chlorate in Hypochlorite solutions Used for Drinking Water Disinfection." Environmental Science and Technology, 26(8): 1663-1665,1992.e

17. Gordon, G., Adam, L. C. and Bubnis, B. P. "Minimizing Chlorate Ion Formation." Jour. AWWA, 87(6); 97-106, 1995.

18. Gordon, G., Adam, L. C. Bubnis, B. P., Hoyt, B., Gillette, S. J. and Wilczak, A. "Controlling the Formation of Chlorate Ion in Liquid Hypochlorite Feed stocks." Jour. AWWA, 85(9); 89-97, 1993.

19. Downs, A. and Adams, C. "The Chemistry of Chlorine, Bromine, Iodine and Astatine." Pergamon, Oxford, 1973.

20. Aieta, E. and Roberts, P., "The Chemistry of Oxo-Chlorine Compounds Relevant to Chlorine Dioxide Generation," In Water Chlorination: Environmental Impact and Health Effects, vol. 5 (R. Jolley, ed.). Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1985.

21. Morris, J.C., "The Acid Ionization Constant of HOCl from 5C to 35 C," Jour. Phys. Chem., vol. 70, 1966, p. 3798.

22. ACGIH. "Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices." American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH, 1994.

23. Singer, "P.C., Control of disinfection by products in drinking water", ***Jour. Environ. Eng.*** 120(4), 1994:727 – 744.

24. Dowd, M.T. "Assessment of THM formation with MIOX," M.S. report. Department of Environmental Science Engineering, University of North Carolina, 1994.

25. Miller, J. W., Uden, P.C. "Characterization of nonvolatile aqueous Chlorination products of humic substances", ***Environ. Sci. and Tech.***, 17(3), 1983: ISO.

26. Chrisman, R. F., Norwood, D. L., Millington, D. S., "Identity and Yields of Major Halogenated Products of Aquatic Fulvic acid Chlorination." Environ. Sci. and technol., 17(10), 1983: 625.

27. Krasner, S. W., McGuire, M. J., Jacangelo, J.J., "The occurrence of Disinfection By- products in US drinking water."***Jour. AWWA***, 81(8), 1989:41.

28. Reckow, D.A., Singer P.C., Malcolm, R.L. " Chlorination and Humic Materials: by-product Formation and chemical interpretations." ***Environ. Sci, and Tech***., 24(11), 1990:1655-1664.

29. Montgomery Watson consulting Engineers. "Mathematical Modeling of the Formation of THMs and HAAs in Chlorinated Natural Water", Final Project Repot. Denver, CO: American Water works Association and Water Industry Technical Action Fund, 1993.

30. APHA, "Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater", AWWA, WEF, 19th ed., 1995.

31. Snoeyink, V.L., and Jenkins, D., Water Chemistry. New York: John Wiley & Sons, 1980.

32. Chang, S. L., "Modern Concept of Disinfection," ASCE J. Sanitary Eng. Div., vol. 97, 1971, p.689.

33. Pressely, T., Dolloff, F. and Roan, S. "Ammonia Nitrogen Removal by Breakpoint Chlorination." Environmental Science and Technology, 6:622, 1972.

34. Mekee, et al., "Chemical and Colicidal Effects of Halogens in Sewage," ***Jour. Water Pollution Control Fed***., vol. 32, 1960, p.795.

35. Trofe, T.W. et al., "Kinetics of Monochloramine Decomposition in the presence of Bromine, ***Environ. Sci. Tech.*** vol. 14, 1980, p.544.

36. Saguinsin, J.L.S. and Morris, J.C., "The Chemistry of Aqueous Nitrogen Trichloride," in J.D. Johnson (ed.), Disinfection: Water and Wastewater, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Mitch. 1975.

37. Kinman, R.N. and Layton, R.F., "New Method for Water Disinfection," ***Jour. AWWA***, vol. 68, no. 6, 1976, p. 298.

38. Valentine, R.L. et al., "A Spectrophotometric Study of the formation of an Unidentified Monochloramine Decomposition Products", ***Water Research***, vol. 20, no. 8, 1986, p. 1067.

39. Posselt, H.S. and W.J. Weber, Jr., in W.J. Weber, Jr. (ed), "Physiochemical Processes for Water Quality Control", Wiley-Interscience, New York, 19720.

40. Berglind, E., Gjesing, E. and Skipperud Johansen, E. "Removal of Organic Matter in Water by Ultraviolet and Hydrogen Peroxide" in W. Kuhn and H. Santheimer (eds.), Oxidation Techniques in Drinking Water Treatment, EPA-570/9-79-020, EPA, Washington, 1979.

41. Duguet, J.P., Brodard, E., Dussert, B. and Mallevialle, J. "Improvement in the Effectiveness of Ozonation of Drinking Water through the use of Hydrogen Peroxide ", ***Ozone: Sci. Eng.,*** vol. 7, 1985, p.241.

42. Staehelin, J. and J . Hoigne. "Decomposition of Ozone in Water: Rate of Initiation by Hydroxide and Hydrogen Peroxide", ***Environ. Sci. Tech***., vol .16, 1982, p. 676.

43. Peyton, G.R. and W.H . Glaze, "Mechanism of Photolytic Ozonation", in Zika,R. G., and Cooper, W. J. (eds), Photochemistry of Environmental Aquatic Systems, ACS Symposium, Series No.327, American Chemical Society, Washington, 1987.

44. Prengle, H.W. Jr., Hewes, G. C. and C.E. Mauk, C. E. "Oxidation of Refractory Materials by Ozone with Ultraviolet Radiation", Second International Symposium on Ozone Technology, Ozone Press International, Jamesville N.Y., 1978.

45. Glaze, W.H., Kang, J. W. and Aieta, E. M. "Ozone-Hydrogen Peroxide System", The Role of Ozone for control of Organics in Municipal Water Supplies, "The Role of Ozone in Water and Waste Water Treatment, Proc. Second International Conference, Edmonton, Alberta, April, 28-29, 1987.

46. Legube, B., Croue, J. P., Reckhow, D. A. and Dore, M. "Ozonation of Organic Precursors: Effects of Bicarbonate and Bromide", in R. Perry and A.E. McIntyre (eds), Proc. International conference on the Role of Ozone In Water and Waste Water Treatment, Selper Ltd., London, 1986.

47. Gordon,G. "Electrochemical Mixed Oxidants Treatment: Chemical Detail of Electrolyzed Salt Brime Technology". Cincinnati, OH: U.S. Environmental of protection Agency, 1998.

48. Venczel, L. V., Arrowood, M., Hurd, M., Sobsey, M.D." Inactivation of Cryptosporidium parvum oocysts and Clostridium perfringens spores by mixed-oxidant disinfectants. And by free chlorine", ***Appl. Envirm. Microbiol***. 63(4) 1997, 1598.

49. Gjessing, E.T., "Physical and Chemical Characteristics of Aquatic Humus", Ann Arbor Science, Ann Arbor, Mich., 1975, I.H.

50. Lalezary, S., Pirbazari, M., and McGuire, M. J," Oxidation of Five Earthy-Musty Taste and Odor Compounds", ***Jour. AWWA***, vol. 78, no, 3, March 1986 p,62.

51. Suffet, C. Anselme, an. Mallevialle, J., "Removal of Taste and Odors by Ozonation ", Seminar Proc.: Ozonation: Recent Advances and Research Needs, AWWA Annual Conference, Denver, June 1986.

52. Voudrias, E.A., Snoeyink, V. L , and Larson, R. A., "Desorption of Organics Formed on Activated Carbon, ***Jour. AWWA***, vol.78, no.2, February 1986, p.82.

53. Reckhow, D.A., P.C. Singer, and R.R. Trussell, "Ozone as a coagulant aid, "Seminar Proceed.: Ozonation: Recent Advances and Research Needs, AWWA Annual Conference, Denver, June 1986.

54. Prendiville, P.W., "Ozonation at 900 efs Los Angeles Water Purification Plant, ***Ozone: Sci. Eng***., vol. 8, 1986, p.77.

55. Singer, P.C. and Gurol, M. D., "Ozonation of Phenol, Mass Transfer and Reaction Kinetics Considerations, Wasser Berlin 81 ,Proc. of the Fifth Ozone World Congress, Berlin, International Ozone Association, Vienna, Va, 1981.

56. Griffini, O. and Iozzelli, P., "The influence of H_2O_2 in ozonation treatment: Experience of the water supply service of Florence Italy." O_2 in: Science and Engineering, 18(2), 1996: 117-126.

57. Richardson, S.D., "Identification of drinking water disinfection by-products", In Encyclopedia of Environmental Analysis and remediation, vol. 3.R.A. Meyers, ed., New York: John Wiley & Sons, 1998: 1398-1421.

58. Symones, J.M., Bellar, T. A, Carswell, J. K., "National organics reconnaissance survey for halogenated organics in drinking water", ***Jour. AWWA***, 67, 1975: 634.

59. Shiraishi, H., Polkington, N.H., Otsuke, A. and Fuwa, K., "Occurrence of poly nuclear aromatic hydrocarbons in tap water."***Environ. Sci. and Tech.*** 19(7), 1985:585-540.

60. Backlund, P., Kronberg, L. and Tikkanen, L. "Formation of Ames mutagenicity and of the Strong bacterial mutagen 3- chloro -4-(dichloromethy1)-5- hydroxyl -2- (sh)- furanone and other halogenated compounds during disinfection of humic water." Chemosphere, 17(7), 1988: 1329-1336.

61. Mcknight, A., and D.A. Reckhow. "Reaction of ozonation by-products with chlorine and chloramines" Proc. 1992 Annual Conference, Vancouver, British Columbia, Canada. Denver, CO: AWWA, 1992: 399-409.

62. Song, R., Westerhoff, P., Minear, R. and Amy, G.L. "Bromate minimization during ozonation." ***Jour. AWWA,*** 89(6), 1997:69-78.

63. Reckhow, D. A. "Control of Disinfection By-Products in Drinking Water. Denver, CO: American Water Works Association, 1999: 179-294.

64. Reckhow, D. A., and Singer, P.C. "The removal of organic halide Precursors by preozonation and alum coagulation", ***Jour. AWWA***, 76(4), 1984: 151-157.

65. Rodrigue El Balaa, "The Need for Water Treatment more than ever, Arab Water World, 8(36), 2012:7.

66. Stover, E. L., Haas, C. N., Rakness, K. L. and Scheible, O. K. " Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection." USEPA, Cincinnati, OH, 1986.

67. O‘ Brien, W. J., Hunter, G. L., Rosson, J. J., Hulsey, R. A. and Carns, K. E. " Presented at the Disinfecting Wastewater for Discharge and Reuse," Portland, OR, 1996.

68. Chiu, K., Lyn, D. A., Savoye, P., Blatchley, E. R. III. " Integrated UV Didinfection Model Based on Particle Tracking." Jour. of Environmental Engineering, 125(1):7-16,1999.

69. Lyn, D. A., Chiu, K., Blatchley, E. R. III. " Numerical Modeling of Flow and Disinfection in UV Didinfection Channels." Jour. of Environmental Engineering, 125(1):17-26,1999.
70. American Water Works Association, Water Quality and Treatment, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

الفصل الرابع

إدارة مخلفات عملية الترويب

إدارة مخلفات معالجة المياه

انه نظرًا للوعي البيئي الذي بدأ ينمو في نهاية القرن الماضي، وأصبح هناك اهتمام بطرق التخلص الآمن من المخلفات الناتجة بمحطات معالجة المياه، وانصب الاهتمام على الاستفادة الاقتصادية من تلك المواد العادمة، وقد عمل هذا على تطوير تكنولوجيا المعالجة وإعادة الاستخدام. ومن المعلوم أن هذه المخلفات كانت تلقي إما في النهر أو في أماكن للتجفيف.

تعتمد نوعية وخصائص مخلفات محطات معالجة المياه على التقنية المستخدمة في المعالجة. وقد تتأثر نوعية المياه المعالجة بطريقة التعامل مع المخلفات سواء بالتخزين أو إعادة التدوير. وانه ليس من المفضل تخزين المخلفات الصلبة أو الحمأ في وحدات منظومة معالجة المياه.

الهدف من إدارة المخلفات

لا بُد من الإجابة عن الأسئلة الآتية:

ما الذي يجب التخلص منه؟ والى أين؟ وما نوع المعالجة المطلوبة؟

وللاجابة على تلك التساؤلات ينبغي توضيح مفهوم ادارة المخلفات.

مفهوم إدارة المخلفات:

هو التخلص من المخلفات بطريقة اقتصادية ومقبولة بيئيا. ومع وضع التشريعات البيئية والإلزام بتنفيذها؛ أصبح هناك قيود على صرف المخلفات الى المياه السطحية أو الى خطوط الصرف الصحي.[١]

وفي وقتنا الحاضر؛ أصبح ضروريًا الاهتمام بكيفية الاستفادة من المخلفات بدلا من أن يكون الهدف مجرد التخلص. ومن هنا فان المنهجية في التعامل مع المخلفات تحتم علينا الاتجاه نحو إعادة الاستخدام بغرض الانتفاع.

يُطلق على المخلفات الصلبة "الحمأ" وهذا المصطلح يُعبر عن المواد الصلبة المترسبة ومعها ماء. وفي هذا الصدد يطلق مصطلح متبقيات لتعطي وصفًا لكل المخلفات الناتجة بمحطات معالجة المياه سواء أكان المخلف سائلًا أو صلبًا أو غازيًّا.

كما علمنا من فصل الترويب أن المروبات تضاف الى المياه أثناء المعالجة، مثل: كبريتات الألومونيوم أو كبريتات الحديديك أو كلوريد الحديديك. والهدف من تلك المروبات هو تجميع الشوائب العالقة غير القابلة للترسيب وجعلها في صورة قابلة للترسيب والانفصال عن المياه، ويتم التخلص من

بعض المواد العضوية الذائبة ومسببات اللون الطعم والرائحة، وهذا يجعل الماء أكثر نقاءً وقابلًا للترشيح.

يتخلف عن المروب المضاف مادة صلبة تقوم باجتذاب الجسيمات العالقة بالماء وتجمعها وتترسب بها الى قاع حوض الترسيب.

إذا كان المروب المستخدم كبريتات الالومونيوم (الشَّبَّة) أصبح لدينا حمأ الومونيومي، وإذا كان المروب كبريتات الحديديك أو كلوريد الحديديك صار لدينا حمأ حديدي، وفي محطات إزالة الحديد والمنجنيز يتكون حمأ حديدي ومنجنيزي.

قد تصل كمية الحمأ الناتج عن المروب المضاف الى حوالي ٥٠ % أو يزيد من إجمالي كمية الرواسب المتخلفة عن المعالجة.

في بعض الأحوال التي يُستخدم فيها الفحم المنشط الناعم أو الكربون المنشط يتكون حمأ فحمي أو كربوني مختلط مع الرواسب الأخرى التي يقوم النظام بإزالتها من الماء، وهذا بطبيعة الحال ينتج في أحواض الترسيب. وفي أحوال أخرى عندما يستخدم الفحم المنشط الحبيبي (الخشن) في الوسط ألترشيحي فقد يخرج جزء منه أثناء عملية الغسيل العكسي.

وقد تكون المخلفات في صورة سائلة مثلما يحدث في محطات إزالة الأملاح باستخدام الأغشية حيث ينتج ما يسمى بالماء المركز الأملاح. وقد يكون هناك مخلفات غازية كما هو الحال عند إزالة غاز الأوزون من وحدات التلامس.

ويمكن تلخيص أنواع المتبقيات كما في جدول (٤/١)

جدول (٤/١) المخلفات الرئيسية بمحطات معالجة المياه

نوع المخلف	المصدر
صلب مع سائل	- كبريتات الألومونيوم، كبريتات الحديديك، كلوريد الحديديك. - حبيبات المبادلات الأيونية. - الوسط ألترشيحي الكربوني. - إزالة الحديد والمنجنيز.
سائل	- التبادل الأيوني. - السائل المعاد تدويره من الالومينا المنشطة.

ينتج الحمأ في مرحلتيّ الترسيب والغسيل العكسي للمرشحات. تعتمد كمية الرواسب على العوامل التالية:-

١- كمية المواد الصلبة المصاحبة للمياه الخام (العكارة).
٢- نوع وجرعة المادة المروبة المستخدمة في المعالجة.
٣- كفاءة النظام في إزالة المخلفات من الماء.
٤- طريقة إزالة الحمأ المترسب.
٥- كفاءة الترسيب.
٦- عدد مرات الغسيل العكسي للمرشحات.

ونظرًا للمتغيرات الكثيرة التي تطرأ على هذه العوامل فقد يكون من الصعب تقدير كميات الحمأ المنتجة بدقة، وبالتالي يتم تقدير الكميات على أساس المتوسط النظري، ويجري ذلك من خلال معرفة كمية الراسب الصادر عن المروب المستخدم، وكمية المواد الصلبة المصاحبة للمياه الخام (العكارة أو المواد الصلبة العالقة).

أولًا: تقدير كمية الراسب الناتج عن استخدام مروب كبريتات الألومونيوم (الشَّبَّة)

معادلة التفاعل:

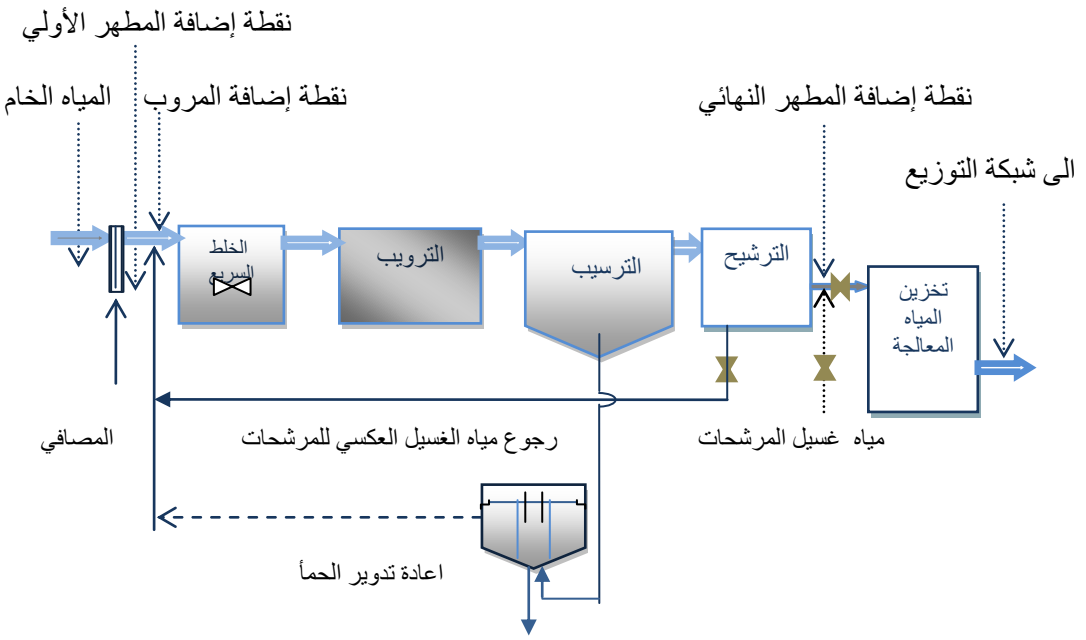
كبريتات الومونيوم + بيكربونات كالسيوم ← هيدروكسيد الومونيوم (راسب) + ثاني أكسيد كربون + كبريتات كالسيوم + ماء

$$Al_2(SO_4)_3.14H_2O + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2Al(OH)_3.3H_2O\downarrow + 6CO_2 + 11H_2O + 3CaSO_4$$

(٤/١)

(راسب هيدروكسيد الألومونيوم) 264 g ⟵ (كبريتات الومونيوم) 594 g

نلاحظ من المعادلة (٤/١) أن الراسب له الصيغة الكيميائية $Al(OH)_3.3H_2O$ وبالتالي فالراسب يحتوي على ٣ جزيئات من الماء مرتبطة بروابط كيميائية تساهمية قوية مع باقي الجزئ[٢-٤]، وبالتالي تصبح ذرة الألومونيوم محاطة بستٍّ من جزيئات الماء.



التخلص من الحمأ (المعالجة)

شكل (٤/١) شكل تخطيطي للمعالجة التقليدية للمياه السطحية موضح به نقاط تجميع الحمأ

عند حساب كمية الراسب فلا بُد من إدراج كمية المياه المرتبطة الموجودة في جزئ راسب هيدروكسيد الألومونيوم، فعدم إدراجها في حساب كمية الراسب يؤدي الى تقدير كمية من الراسب تقل بحوالي ٤٠ % عن الواقع. وحيث أن المياه تزيد من كمية الراسب فهي أيضا تزيد من حجم الحمأ المتكون، وهذا الماء المرتبط يصعب إزالته بالطرق الفيزيائية التقليدية المعتادة.

وبالنظر الى المعادلة (٤/١) نجد أن:

٥٩٤ جرام من مروب الشَّبَّة أنتجت ٢٦٤ جرام راسب

هذا يعني أن:

١ جرام من مروب الشَّبَّة ينتج ٠,٤٤ جرام من الراسب

وفي حالة إضافة مواد أخري للمعالجة كالكربون المنشط البودرة، فالكمية المضافة منه تخلف كمية مساوية له. ومما سبق يمكن صياغة علاقة تتناول بعض المتغيرات التي من خلالها يمكن حساب الحمأ المتكون أثناء المعالجة على النحو التالي:

كمية الحمأ (كجم/ يوم) =

تصرف المحطة (م٣/يوم) [جرعة الشَّبَّة المضافة (جم/م٣) × ٠,٤٤ + المواد العالقة الصلبة (جم/م٣)] ÷ ١٠٠٠ (٤/٢)

ثانيًا: تقدير كمية الراسب الناتج عن استخدام مروب كلوريد الحديديك

معادلة التفاعل:

كلوريد الحديديك + بيكربونات كالسيوم ← هيدروكسيد الحديديك (راسب) + ثاني أكسيد كربون + كلوريد كالسيوم + ماء

$$2FeCl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 + 6H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3.3H_2O\downarrow + 6CO_2 \quad (٤/٣)$$

٣٢٢ جرام (هيدروكسيد حديديك) ⟶ ٣٢٥ جرام (كلوريد حديديك)

١ جرام (هيدروكسيد حديديك) ⟶ ١ جرام (كلوريد حديديك)

٢,٩ (هيدروكسيد حديديك) ⟶ ١ جرام (حديد)

من خلال المعادلة السابقة نجد أن ٣٢٥ جرام من كلوريد الحديديك (الوزن الجاف) أنتجت حمأ يحتوي على ٣٢٢ جرام من هيدروكسيد الحديديك، أو ١ جرام من مروب كلوريد الحديديك ينتج تقريبا ١جرام من راسب هيدروكسيد الحديديك. وحيث أن هناك عدة مروبات للحديد، وقد تصنع على هيئة محاليل وبتركيزات مختلفة، وبالتالي يمكن التعبير عن جرعة مروب الحديد منسوبا الى الحديد المتواجد في المركب. ومن أمثلة تلك المروبات:

- محلول كلوريد الحديديك $[FeCl_3.nH_2O]$
- كلوريد حديديك صلب $[FeCl_3.6H_2O - FeCl_3.2H_2O - FeCl_3]$
- كبريتات الحديدوز $[FeSO_4.7H_2O - FeSO_4.H_2O]$
- كبريتات حديديك $[Fe_2(SO_4)_3.9H_2O - Fe_2(SO_4)_3]$

ويمكننا صياغة العلاقة التالية لحساب الحمأ المتكون أثناء المعالجة بمروب الحديد:

- كمية الحمأ (كجم / يوم) =

تصرف المحطة (م٣/يوم) [جرعة مروب الحديد المضافة (جم/م٣) × ٢,٩ + المواد العالقة الصلبة (جم/م٣)] ÷ ١٠٠٠ (٤/٤)

مثال توضيحي:

محطة معالجة مياه شرب تعالج مياه خام ذات عكارة متوسطة قيمتها ٥ وحدات نفيلومترية (NTU) ، تستخدم تلك المحطة مروب كبريتات الألومونيوم (الجاف) $(Al_2(SO_4)_3.16H_2O)$ في المعالجة،

ويبلغ متوسط جرعات المروب ٢٥ جرام/م٣ (وزن جاف). احسب كمية الحمأ المنتج سنويًّا علمًا بأن التصرف اليومي للمحطة ١ مليون متر مكعب. (معامل تحويل العكارة الى كتلة العوالق الصلبة = ١,٣ العكارة).

الحل:

حيث أن العكارة خاصية فيزيائية تعبر عن كمّ الضوء المار خلال عينة من الماء أثناء القياس أو كمّ الضوء المحتجز نتيجة تواجد جسيمات عالقة في الماء، وبالتالي فالعكارة دالة لكم العوالق وليست دلالة كتلية، وبالتالي يمكن إيجاد علاقة بين العكارة وكتلة العوالق. وقد أجريت العديد من القياسات التي تضاهي بين العكارة والكتلة المقاسة المقابلة، وتبين أن هناك علاقة تقترب من الثبات للمصدر المائي الواحد ولكنها تختلف موسميا تبعًا لطبيعة العوالق المتواجدة؛ فالعكارة الناشئة عن الطحالب تختلف كتليًا عن العكارة الناشئة عن جسيمات الغرين.

وتوضح القياسات أن قيمة العوالق الصلبة تتراوح ما بين ٠,٧٥- ٢ قيمة العكارة. وبناءً عليه لا يمكن تثبيت معامل إلا للمصدر الواحد مع الأخذ في الاعتبار التغيرات الموسمية في طبيعة العوالق.

ومن خلال العلاقة (٤/٣) نجد أن:

كمية الحمأ المتكون بالمحطة = ١٠٠٠٠٠٠ م^3/يوم × [٢٥ جم/م^3 × ٠,٤٤ + (٥× ١,٣) جم/م^3]

= ١٠٠٠٠٠٠ × [٢٥× ٠,٤٤ + ٦,٥]

= ١٧٥٠٠٠٠٠جم/يوم

= ١٧,٥ طن/يوم

= ٦٣٨٧,٥ طن/سنة

ملحوظة مهمة:

عند استخدام الشَّبَّة السائلة لا بُد من معرفة التركيز ونسبته الى المنتج الجاف. ومن المعلوم أن الشَّبَّة السائلة التجارية ذات تركيز يعادل تقريبا ٥٠ % من الشبة الجافة.

فإذا كان تركيز أكسيد الألومونيوم وهو يمثل المادة الفعالة = ٨ % في الشبة السائلة وكان تركيزه في الشَّبَّة الجافة التجارية = ١٦ % ، هذا يعني أن تركيز الشَّبَّة السائلة يعادل ٥٠ % من الشَّبَّة الجافة فيما يتعلق بأكسيد الالومونيوم، وينبغي التأكد من ذلك من الشركة المصنعة.

تعتمد كمية الحمأ المتكون على الآتي:

- نوعية المياه الخام
- نظام المعالجة (المواد المضافة)

- طريقة التخلص من الحمأ.

عندما يتم التخلص الدوري من الحمأ المتراكم بقاع أحواض الترسيب، فيصبح الحمأ متماسكا ومنضغط الحبيبات في القاع. ومع تتابع الترسيب يصير هناك طبقات من الرواسب تأخذ فيها الجسيمات الأثقل الطبقات السفلى والأخف الطبقات العليا.

ولكي تتحقق جودة عالية للماء المعالج فيجب التخلص المستمر من الحمأ المترسب في القاع، ومراعاة عدم مكثه لفترة طويلة في أحواض الترسيب.

يتراوح تركيز المواد الصلبة بالحمأ الخارج من أحواض الترسيب التي يُزال منها الراسب بصفة مستمرة ما بين ٠,١ – ١ % . بينما في حالة النظام المعتمد على الطبقة المائعة فان التركيز يصل الى ٢ %. وفي حالة المروقات التي يتحرك فيها الماء لأعلى يكون تركيز المواد الصلبة أقل من ٠,١%.

كلما كانت نسبة المروب الى تركيز المواد الصلبة بالمياه الخام عالية كلما كان تركيز المواد الصلبة بالحمأ أقل، وكان حجم الحمأ أعلى. يرجع هذا الى أن الحمأ الناتج من المروب يكون أخف وبالتالي يشغل حيزًا أكبر.

يزداد الحمأ الناتج من المروب عندما تكون المياه الخام شديدة العكارة، حيث يصل تركيز المواد الصلبة بالحمأ الى ٤ %، ويبلغ حجم الحمأ الناتج من أحواض الترسيب ما بين ٠,١ - ٣ % من كمية المياه الخام وفي بعض الأحيان تنتج أحواض الترسيب التقليدية حمأ يحتوي على تركيزات من المواد الصلبة تتراوح ما بين ٢ – ٤ %، و في حين أن مروقات الطبقة المائعة تنتج تركيزات من المواد الصلبة قد تصل الى ٣ %. وتتراوح أحجام الحمأ ما بين ٠,٥ – ٥ % من تصرف محطة المياه.[٥]

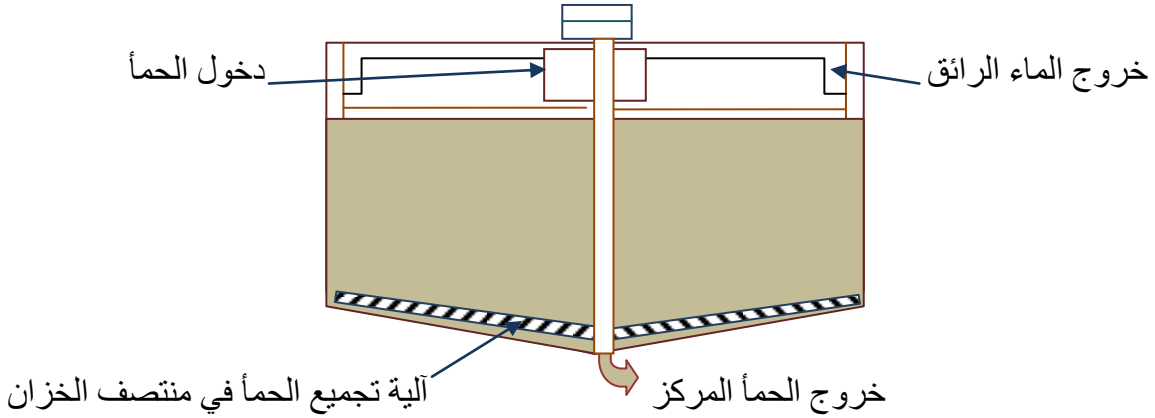
تشكل مياه الغسيل نسبة كبيرة من إنتاجية المحطة، وتحتوى تلك المياه على تركيز منخفض من الرواسب مقارنة بمياه الحمأ المنصرفة من أحواض الترسيب. تتراوح فترة غسيل المرشحات ما بين ١٥ – ٢٠ دقيقة، وتصل أحجام مياه الغسيل ما بين ٣ – ١٠ % من المياه المنتجة.

الخصائص الكيميائية للحمأ

- يحتوي الحمأ على تركيز عالٍ من الألومونيوم أوالحديد تبعًا لنوع المروب المستخدم.
- يتواجد الالومونيوم والحديد على هيئة هيدروكسيدات مائية.
- لا تحتوي على مركبات الفوسفور والنيتروجين (المخصبات).

تركيز الحمأ

بعد أن يتم سحب الحمأ من أحواض الترسيب، تضخ الى أحواض التركيز (شكل ٤/٢)؛ حيث يتم التركيز بفعل الجاذبية. يعمل حوض التركيز على الاقلال من حجم الحمأ من خلال تقارب الجسيمات وخروج الماء جزئيًّا من الفراغات البينية ليكوّن طبقة رائقة أعلى حوض التركيز.



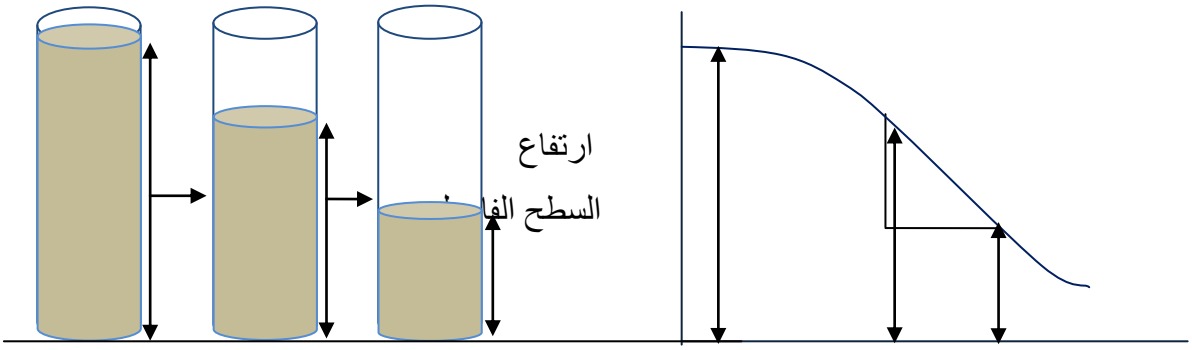
شكل (٤/٢) حوض تركيز يعمل بالجاذبية

عادة ما يكون حوض تركيز الحمأ دائريًّا ومزودًا بآلية تجميع الحمأ المركز في المنتصف، يدخل الحمأ من المركز ويتوزع في كل الاتجاهات. يخرج الماء الصافي من نقطة علوية، أما الحمأ المركز فيصرف من القاع. يدور كاسح الحمأ ببطء و مع الحركة البطيئة للكاسح يتجه الحمأ المركز نحو مركز قاع الحوض، وهذه الحركة البطيئة تقرب الجسيمات الصلبة من بعضها البعض بالحمأ وتمنع وجود فجوات بينها، يميل مستوى قاع الحوض نحو المركز لتسهيل انسياب وتجميع الحمأ المركز نحو منطقة الخروج.

يمكن إجراء اختبار معملي لبيان عملية الترسيب باستخدام مخبار شفاف من الزجاج أو البلاستيك، ويجرى الاختبار على النحو الآتي:[٥]

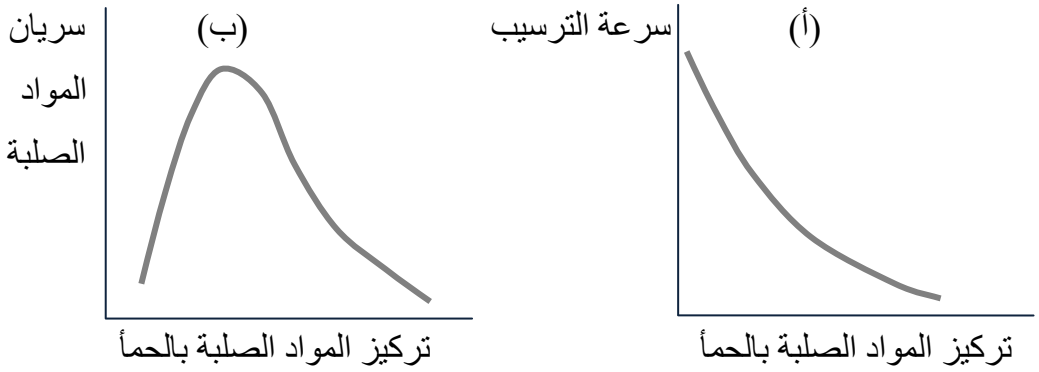
- يملئ مخبار (ذي قطر ٢٠ سم وارتفاع لا يقل عن ٩٠ سم) بالحمأ ويقلب تقليبًا خفيفًا لتصبح المكونات متجانسة.
- يجب تقليب الحمأ ببطء أثناء الاختبار (٠،٥ لفة/دقيقة).
- يحدث ترسيب للحمأ على هيئة طبقة واضحة الحدود.

- يتم تسجيل ارتفاع السطح الفاصل مع الزمن.
- ترسم العلاقة البيانية بين قيم الارتفاع.
- تحدد سرعة الترسيب الحر من خلال ميل الجزء المستقيم من الخط البياني.



شكل (٤/٣) اختبار تركيز الحمأ باستخدام مخبار اسطواني والتمثيل البياني للعلاقة بين ارتفاع السطح الفاصل بين السائل الرائق الحمأ المركز.

ويمكن تكرار هذا الاختبار باستخدام عينات من الحمأ مختلفة تركيز المواد الصلبة، وترسم العلاقة البيانية بين سرعة الترسيب وتركيز الحمأ، وهذه العلاقة تمثل علاقة عكسية بمعنى أن سرعة الترسيب تقل مع زيادة تركيز المواد الصلبة بالحمأ وتقترب من الصفر مع زيادة تركيز الحمأ. (شكل ٤/٤)



شكل (٤/٤) اختبار تركيز الحمأ : (أ) سرعة الترسيب في مقابل تركيز المواد الصلبة
(ب) سريان المواد الصلبة في مقابل تركيز المواد الصلبة

وعندما نرسم العلاقة البيانية بين سرعة سريان المواد الصلبة بالحمأ وتركيز تلك المواد الصلبة، فإننا نحصل على شكل بياني له قمة وقاع، وتكون قيمة المنحنى صفر عندما يكون تركيز المواد الصلبة تساوي صفرًا، وأيضًا عندما يكون تركيز المواد الصلبة عاليًا جدًا.

ويمكن استخدام الشكل (٤/٤أ) لتقدير سرعة الترسيب اللازمة والتنبؤ بتركيز الحمأ المركز، كما يمكن استخدام شكل (٤/٤ ب) لبيان معدل سريان المواد الصلبة في مدى متوقع من تركيزات المواد الصلبة الداخلة الى حوض التركيز.

ويمكن التعبير عن حجم الحمأ وتركيز المواد الصلبة من خلال الآتي:-

حجم الحمأ =

كتلة المادة الجافة ÷ كثافة الماء ($١٠^{٣}$) × الكثافة النوعية للحمأ × نسبة المواد الصلبة (وزن/ وزن)

وحيث أن كثافة الحمأ لا تتغير، ولتعيين الانخفاض في الحجم بناءً على نسبة المواد الصلبة نتبع الآتي:

الحجم الثاني ÷ الحجم الأول = النسبة المئوية للمواد الصلبة الأولي ÷ النسبة المئوية للمواد الصلبة الثانية

هذه العلاقة مفيدة لان الكثافة النوعية للحمأ غير معروفة ولا تتغير؛ فهي تنحصر في قيم معينة لأكثر عمليات تركيز الحمأ المستخدمة.

عندما يكون تركيز الحمأ ١ % ثم يتم تركيزه ليصبح ١٠ % في هذه الحالة يكون الانخفاض في حجم الماء ٩٠ %.

مثال توضيحي:

محطة مياه تنتج ١٠٠٠ كجم / يوم حمأ جاف، والحمأ الناتج من حوض الترسيب يحتوي على ٠,٥ % مواد صلبة.

احسب حجم الحمأ الناتج الذي تركيزه ٠,٥ %؟ وما هو الحجم إذا كانت وحدة التركيز تقوم بزيادة تركيز المواد الصلبة من ٠,٥ % الى ٢ %.

الحل:

تحويل النسبة المئوية لتركيز الحمأ الخارج من حوض الترسيب الى (كجم / م٣):

تركيز المواد الصلبة = ٠,٥ جرام / ١٠٠ ملل حمأ = ٠,٥ كجم / ١٠٠ لتر حمأ

= ٥ كجم /١٠٠٠ لتر = ٥ كجم / ١ م٣ حمأ

الحجم = ١٠٠٠ × ١÷ ٥ = ٢٠٠ م٣

الحجم بعد التركيز = الحجم الأولي × النسبة المئوية للمواد الصلبة الأولية ÷ النسبة المئوية للمواد الصلبة الثانية

= ٢٠٠ × ٠,٥ ÷ ٢

= ٥٠ م^{٣}

طرق تجفيف الحمأ

طرق غير ميكانيكية وتشتمل على الآتي:

- طبقات التجفيف الرملية (ترشيح + تبخير طبيعي)
- طبقات التجفيف الشمسية (تبخير طبيعي)
- برك انتزاع الماء (تبخير طبيعي)

طرق ميكانيكية وتشتمل على الآتي:

- الترشيح بالتفريغ
- الترشيح بالعصر بالسير
- الطرد المركزي
- الترشيح بالضغط

إعادة تدوير المياه

تقوم بعض المرافق بإعادة تدوير المياه داخل منظومة المعالجة رغبةً في الحفاظ على المياه من الفقد ولتحسين أداء المحطة. ونظرًا الى أن هناك العديد من البلدان يعانون من ندرة المياه فان إعادة التدوير يوفر كمية لا بأس بها؛ حيث تتراوح نسبة المياه المحملة بالحمأ ما بين ٣ – ١٠ % من إنتاجية محطة المياه.

يتم إعادة التدوير باسترجاع الحمأ الى بداية مراحل المعالجة أو الى مرحلة وسطية بالمحطة.

وقد تشتمل مياه إعادة التدوير على الآتي:-

١- مياه الغسل العكسي للمرشحات
٢- أحواض الترسيب
٣- الماء الرائق الخارج من أحواض التركيز.
٤- الماء الرائق الخارج من أحواض تجفيف الحمأ.
٥- المياه الناتجة من التجفيف الميكانيكي للحمأ (سيور الكبس – مرشحات الضغط).

قد تؤثر المياه المعاد تدويرها سلبًا على نوعية المياه، وينتج ذلك من المواد الصلبة أو من المكونات الذائبة بتلك المياه، لذلك ينبغي أن تخضع للمواصفات المطلوبة في المياه المراد اعادة تدويرها في منظومة المعالجة.

تعمل مرحلة الترويق بالمحطة على إزالة حوالي ٩٠ % من المواد الصلبة العالقة بالماء، والـ ١٠ % الباقية وهي تمثل الندف الخفيفة يتم التخلص منها في وحدات الترشيح. وأثناء عملية الغسيل العكسي للمرشحات يحدث تهييج وإثارة لطبقة المرشح وما تحمله من رواسب وشوائب، وتطرد مياه الغسيل الى حوض الفصل، وقد يعاد تدوير تلك المياه بخلطها مع المياه الخام الداخلة للمحطة، وقد يتم التخلص منها بمصدر المياه. ومن الآثار الإيجابية لإعادة تدوير مياه الغسيل أنها تعمل علي تحسين أداء عملية الترويب نتيجة احتوائها علي ندف دقيقة تعمل كأنوية لبناء ندف كبيرة قابلة للترسيب، وهذا من شأنه التقليل من جرعة المروب المستخدم، كما أن إعادة التدوير يوفر أكثر من ٥ % من إنتاجية المحطة من المياه المعالجة.

هناك بعض العوامل الرئيسية التي لابد من دراستها قبل اتخاذ قرار إعادة تدوير الحمأ وماء الغسيل العكسي حديثة الانتاج وليست المخزنة الى منظومة المعالجة مرة أخرى، وهي:-

- المكونات الميكروبيولوجية وأهمها حويصلات طفيليات الجيارديا والكريبتوسبوريديوم.
- الكربون العضوي الكلي.
- نواتج التطهير الثانوية.
- العكارة والشوائب العالقة.
- الفلزات مثل الألومونيوم والحديد.
- المركبات والعناصر ذات التأثير على الصحة العامة.

تؤدي إعادة التدوير الى زيادة أعداد حويصلات طفيليات الجيارديا والكريبتوسبوريديوم (اذا كانت متواجدة في المياه الخام).[٦] كما تؤدي الى زيادة تركيز الهالوميثان المحتمل التكوين في المياه المعالجة نتيجة الاحتواء المسبق على الهالوميثان وخضوع تلك المياه لإعادة التطهير. ومن الممكن تطهير تلك المياه باستخدام الأوزون إذا استلزم الأمر وكان ذلك متاحًا بالمحطة ثم إعادة تدويرها، وقد يستلزم الأمر إعادة تدويرها بإدماجها مع المياه المروقة وترشيحها.

التخلص النهائي وإعادة الاستخدام للحمأ

- كتربة زراعية

تتميز تلك المخلفات الصلبة بقدرتها على الاحتفاظ بالرطوبة ومن ثم يمكن خلطها مع التربة الزراعية لتحسين خاصية الاحتفاظ بالماء لمدة كبيرة. وكنتيجة لذلك تزيد الانتاجية من المحاصيل الزراعية مثل الذرة.[٧] يؤدي خلطها مع التربة الزراعية الى انخفاض الكثافة الكلية لتلك التربة وتصبح أقل انضغاطا وأكثر مسامية تسمح بالتهوية والاحتواء على الماء وهذا يفيد لنمو النبات.[٨] كما أن اضافة حمأ الالومونيوم الى التربة الزراعية يعوض نقص الفوسفور.[٩]

تخلط تلك المخلفات الصلبة مع بعض المواد العضوية والمخصبات وتباع كتربة زراعية.

- صناعة الطوب

يمكن الاستخدام في صناعة الطوب إذا كانت نوعية الرواسب غير مناسبة كتربة زراعية. تتركب المخلفات الصلبة لمحطات المياه المعتمدة على مروب الالومونيوم علي المكونات التالية:

١- هيدروكسيد الألومونيوم ٢- سيليكات الألومونيوم (معادن الطين) ٣- مادة عضوية طبيعية والمكونان ١ ،٢ يتشابهان مع المواد المستخدمة في صناعة الطوب ألطفلي وبالتالي يمكن استخدام تلك المخلفات في إنتاج نوعيات من الطوب وذلك بخلط ها مع الطفلة أو مع الرمل. ولا تختلف الطوبة الناتجة كثيرًا عن الطوب ألطفلي. وبالتالي تصبح المخلفات مصدر دخل للمحطات بدل من كونها مصدر لتكلفة بدون عائد، فضلا عن حماية البيئة من تلك المخلفات التي قد يجري التخلص منها في المياه السطحية.

- عند التفكير في إعادة استخدام المخلفات الصلبة الالومونيومية في تصنيع كبريتات الالومونيوم على

اعتبار أن الرواسب تحتوي على نسبة من هيدروكسيد الالومونيوم، فلابد من دراسة تركيزات المركبات المصاحبة للحمأ والتي تمثل الشوائب التي فصلت عن الماء. وقد يتطلب المروب الناتج من تفاعل المخلفات مع حامض الكبريتيك تنقية لفصل الشوائب وقد يكلف ذلك الكثير، ويلزم الرجوع الى المواصفتين القياسيتين للشبة الصلبة والسائلة (٢٠٠٨/٤ [١٠]، ٢٠٠٨/١٧٠٠ [١١]).

مراجع الفصل الرابع

1- القانون رقم ٤٨ لسنة ١٩٨٢ في شأن حماية نهر النيل والمجاري المائية.

2- Cornwell, D. A., Bishop, M. M., Gould, R. G. and Vandermeyden, C. " Water Treatment Plant Waste Management." Denver, CO; AWWARF, 1987.

3- Cornwell, D. A., Koppers, H. "Sludge". Denver, CO; AWWARF, 1990.

4- AWWA. " Management of Water Treatment Plant Residuals." Denver, CO: AWWARF, 1996.

5- AWWA, " Water Quality and Treatment." Denver, CO; AWWA, 1999.

6- Cornwell, D. A., and Lee, R. G. "Recycle Stream Effects on Water Treatment." Denver, CO: AWWARF, 1993.

7- Rengasamy, P., Oades, J. M., Hancock, T. W. "Improvement of Soil Structure and Plant Growth by Addition of Alum Sludge." Communication in Soil Science and Plant Analysis, 11(6), 1980: 533-545.

8- Tisdale, S. L., and Nilsson, W. L. "Soil Fertility and Fertilizers, 3rd ed. pp. 105-189. New York, Macmillan, 1975.

9- Bugbee, G. J. and Frink, C. R. "Alum Sludge as Soil Amendment: Effects on Soil Properties and Plant Growth." Connecticut Agricultural Experiment Station, Bulletin 827, 1985.

10- الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، "المواصفات القياسية المصرية رقم ٤- ٢٠٠٨ الخاصة بالشبة الصلبة المستخدمة في تنقية مياه الشرب"، ٢٠٠٨.

11- الهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة، "المواصفات القياسية المصرية رقم ١٧٠٠- ٢٠٠٨ الخاصة بالشبة السائلة المستخدمة في تنقية مياه الشرب"، ٢٠٠٨.

ملحق (أ)

استخدام اختبار الجار في إنجاز ترويب مُحَسّن Enhanced coagulation

تشتمل قاعدة المطهرات/والنواتج الثانوية للتطهير علي المتطلبات التي يجب علي أنظمة المعالجة التقليدية من إتباعها لإزالة المواد العضوية التي تسبب تكوّن تلك النواتج الثانوية غير المرغوب فيها.[١، ٢] تقاس المواد العضوية الطبيعية ككربون عضوي كلي، وتعتمد معايير إزالة الكربون العضوي الكلي علي أساس تركيزه وقلوية المياه الخام. (وهذا ما يعرف بالخطوة الأولي لهذه القاعدة)

وقد تكون هناك ضرورة لإتباع معايير إزالة بديلة للكربون العضوي الكلي وذلك من خلال إجراء "اختبار الجار"، وهذا ما يُعرف بالخطوة الثانية. وتُظهر كثير من الدراسات أن بعض المصادر المتنوعة من المياه تحقق الخطوة الأولي لمعايير الإزالة للكربون العضوي وليس هناك حاجة لإجراء الخطوة الثانية. يستخدم "اختبار الجار" لتحديد وسائل الوفاء بمعايير إزالة المواد العضوية. في بعض أنواع المياه الخام تكون التجربة المعملية مطلوبة لتحديد نقطة تضائل تأثير الجرعات المستخدمة من المروب المستخدم (أي تكون إزالة الكربون العضوي أقل من ٠,٣ مجم/لتر من جراء إضافة جرعة ١٠ مجم/لتر من مروب الشَّبَّة) والتي تنفذ لتحقيق معايير إزالة الكربون العضوي.

تُستخدم أملاح الالومونيوم أو الحديد في عملية الترويب الكيميائي بهدف إزالة العكارة، وفي نفس الوقت يقوم الترويب بإزالة المواد العضوية الطبيعية التي تعد مصدرًا لتكوين النواتج الثانوية لعملية التطهير بالكلور غير المرغوب فيها. وبوجه عام فان جرعة المروب المستخدم المطلوبة لإزالة العكارة والمواد العضوية معًا يجب أن تؤخذ في الاعتبار أثناء تنفيذ إستراتيجية الترويب المرتفع الكفاءة.

تتشكل المواد العضوية الطبيعية من خليط من المواد العضوية، فالبعض يمكن التعرف عليه من خلال طرق الفصل والتجزيء المختلفة. ونجد أن المواد الدبالية الكارهة للماء يمكن فصلها عن المواد العضوية المحبة للماء. وتستخدم طريقة الترشيح الفائق لفصل المواد العضوية ذات الأوزان الجزيئية العالية عن الأخرى ذات الأوزان الجزيئية المنخفضة.

تقوم عملية الترويب بإزالة نوعيات معينة من المواد العضوية الطبيعية، فمثلا المواد الدبالية الكارهة للماء وكذلك المواد العضوية ذات الأوزان الجزيئية العالية تزال بفعالية أكثر من تلك ذات الأوزان الجزيئية المنخفضة والمواد الدبالية المحبة للماء.

تتمكن عملية الترويب باستخدام مروبات الالومونيوم من إزالة المواد العضوية عن طريق آليتين هما:

- الادمصاص علي أسطح راسب هيدروكسيد الالومونيوم.
- تكوين مركبات معقدة غير ذائبة من فولفات الالومونيوم.

جدول (١) تركيز الكربون العضوي المطلوب إزالته من خلال الترويب المحسن لأنظمة التقليدية لمعالجة التقليدية لمعالجة المياه السطحية وفق قاعدة التطهير/والنواتج الثانوية للتطهير.[١]

الكربون العضوي الكلي بالمياه الخام TOC (مجم/لتر)	النسبة المئوية المطلوبة للإزالة من الكربون العضوي الكلي		
	قلوية المياه (كربونات كالسيوم) (مجم/لتر)		
	٠-٦٠	٦٠-١٢٠	اكبر من ١٢٠
٢ - ٤	٣٥	٢٥	١٥
٤ - ٨	٤٥	٣٥	٢٥
اكبر من ٨	٥٠	٤٠	٣٠

في الآلية الأولي تؤثر الشحنة السطحية للندف المتكونة علي قابلية المروب في أن يدمص الكتروستاتيكيا الأحماض الهيومية والفولفية. تقوم الأحماض الدبالية في البداية بتكوين معقد من الالومونيوم في مدي كبير من الرقم الهيدروجيني وذلك قبل حدوث ترسيب هيدروكسيد الالومونيوم.

تتطلب عملية الادمصاص تواجد مركبات معقدة ذائبة وكذلك المادة الصلبة. وتقاس شحنة السطح للندف بجهد الزيتا عند الأرقام المختلفة من الرقم الهيدروجيني، وعند نقطة الشحنة الصفرية لا تحمل الندف أي شحنات، وفي حالة راسب هيدروكسيد الالومونيوم حديث التكوين يكون الرقم الهيدروجيني الذي يحقق النقطة الصفرية للشحنة = ٨ . أما الآلية الأخرى فتتأثر بحامضية المواد العضوية الطبيعية والتي تتمثل في مواقع الاتحاد مع الكاتيونات لتكوين المركبات المعقدة مع الالومونيوم.

وعلي وجه العموم؛ فان الآلية الأولي هي الأكثر حدوثا علي ارض الواقع عند الجرعات العالية من المروب وعند الرقم الهيدروجيني العالي، بينما الآلية الثانية تكون أكثر حدوثا عند الجرعات المنخفضة من المروب والأرقام الهيدروجينية المنخفضة.

تتفاعل المواد العضوية الدبالية بصورة كبيرة مع الكلور وتكوّن المركبات العضوية الكلورينية، كما أن المواد العضوية غير الدبالية تكوّن كميات جوهرية من مركبات وتراي هالوميثان والهالواسيتيك أسيد مع الكلور.

تتسع هنا دائرة أهداف الترويب من مجرد إزالة العكارة فقط إلي إزالة للمواد العضوية الطبيعية التي تشكل أهمية كبيرة؛ حيث يؤدي اتحادها مع الكلور إلى تكوين مركبات عضوية كلورية جديدة. وهذان الهدفان معًا يتطلبان الإجراءات الآتية:

١- استخدام الجرعة المناسبة من المروب التي تحقق الإزالة المطلوبة من العكارة ومن المواد العضوية ممثلة في الكربون العضوي الكلي.
٢- تحديد الرقم الهيدروجيني المناسب والممكن تحقيقه وفق المواصفات القياسية لمياه الشرب والإمكانيات المتاحة. وتجدر الإشارة إلي أن خفض الرقم الهيدروجيني يقلل من كثافة الشحنة علي أحماض الهيوميك والفولفيك مما يجعلهما أكثر كراهية للماء (أي أكثر قابلية للادمصاص).
٣- إن اختيار المروب المناسب يحكمه عاملان: الأول يتمثل في ذوبانية المادة الفعالة، والثاني يتمثل في الرقم الهيدروجيني الذي يتحقق.

يعمل الترويب المُحَسّن أو المُعَزّز على إزالة مرضية من العكارة والمواد العضوية الاستقطابية في نفس الوقت من خلال زيادة مواقع الادمصاص البروتونية مع زيادة مساحة سطح الادمصاص.[٣]

بروتوكول اختبار الجار

يشتمل هذا البروتوكول علي إضافة جرعات من مروب الشَّبَّة بمعدل تزايدي، أي أن الجرعة تزيد بمقدار ١٠ مجم/لتر (أو ما يعادلها طبقا للمروب المستخدم) (جدول ٢) حتى تتحقق الأرقام الهيدروجينية المنخفضة المستهدفة التي تعتمد علي القلوية للمياه الخام (جدول ٣).

جدول (٢) الجرعات المتكافئة من المروبات

المروب	الوزن الجزيئي (جرام/مول)	أكسيد الألومونيوم (Al_2O_3) (%)	الجرعات المتكافئة من الشبة (مجم/لتر)	نقطة تضائل تأثير المروب* (مجم كربون عضوي كلي/مجم شبة)
شَبَّة صلبة $Al_2(SO_4)_3.14H_2O$	٥٩٤,٣٦	١٧	١٠ (١,٧ مجم الومونيوم/لتر)	٠,٠٣
شَبَّة صلبة $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$	٦٦٦,٤٢	١٥,٣	١١,٢ (١,٧ مجم الومونيوم/لتر)	٠,٠٢٧
محلول شَبَّة "سائلة" $Al_2(SO_4)_3.50.5H_2O$	١٢٦٩	٨,٠٤	٢١,٢ (١,٧ مجم الومونيوم/لتر)	٠,٠١٤

* بني ذلك علي أساس أن ١,٧ مجم الومنيوم/ لتر تزيل ٠,٣ مجم/لتر من الكربون العضوي الكلي.

جدول (٣) الأرقام الهيدروجينية المطلوبة اعتمادا علي قلوية المياه الخام

القلوية (كربونات كالسيوم) (مجم/لتر)	٦٠-٠	١٢٠-٦٠	٢٤٠-١٢٠	اكبر من ٢٤٠
الرقم الهيدروجيني المقابل	٥,٥	٦,٣	٧,٠	٧,٥

يُقاس بعد هذه التجارب الكربون العضوي الكلي لكل وعاء "جار" وترسم العلاقة بين الكربون العضوي الكلي المتبقي في مقابل جرعة الشَّبَّة المضافة. ومن خلال الرسم يمكن تحديد النقطة التي عندها لم تتمكن الجرعة المضافة من الهبوط بقيمة ٠,٣ مجم من الكربون العضوي الكلي، أو بمعني آخر انعدام لتأثير المروب المضاف (أي أن ميل الخط البياني لتركيز الكربون العضوي الكلي المتبقي يصبح اقل من أو يساوي ٠,٣ مجم/ ١٠ مجم مروب).

يمكن أن تستخدم تلك البيانات للوقوف علي مدي الاحتياج الفعلي لإجراء ترويب مُحسّن أم لا، ولا بُد من أن تتحقق معايير الخطوة الأولي (جدول ١). وفي حالة تحقيق الخطوة الأولي من القاعدة وكانت المياه الخام تحتاج الى جرعة اقل من نقطة انعدام تأثير الجرعة المستخدمة من المروب فان الخطوة رقم (١) لإزالة الكربون العضوي الكلي تكون حتمية، وفي بعض الأحيان يتطلب إزالة أكثر من المواد العضوية للتأكد من التوافق مع الحدود المسموح بها من مركبات الهالوميثان الكلية وأحماض الهالواسيتك.

مراجع ملحق (أ)

40- Edzwald, J. K., Tobiason, J. E., "Enhanced coagulation: US requirements and a broader view", ***Water Science and Technology***, 40(9)1999, 63-70.

41- Xiao, F., Zhang, X. R., Zhai, M. T., Lo, I. M. C., "Effect of enhanced coagulation on polar halogenated disinfectant by-products in drinking water Separation and Purification Technology, 76(1),2010, 26-32.

42- Xiao, F., Simcikb, M. F., Gullivera, J. S., "Mechanism for removal of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctonate (PFOA) from drinking water by conventional and enhanced coagulation**"** ***Wat. Res***., 47(1), 2013, 49-56.

ملحق (ب)

نوعيات من الطحالب وتأثيراتها او دلالاتها*

الطحالب	التأثير /الدلالة
أفانيزومينوم – سيراتيوم – نيتيلا – انسيستس – باندورينا – جونفوسفيرا – انابينا – سينورا – استيرسونيلا – سيندرا – تابيلاريا – اورجينوبسس – مالوموناس – هيدرروديكتايون – بيريدينيوم – استورا ستروم.	تعطي مذاق ورائحة للماء.
دياتومات – انابينا – فلاجيلاريا – استيريونيلا – بالميلا – سبيروجيرا – سيكلوتيلا – نافيكيولا – كلوستيريوم – سندرا – كلوريلا – اوسيلاتورا – تريبونيما – كروكوكاس – جيمبيلا.	إعاقة عملية الترشيح.
سبيروجيرا – انابينا – نيتزيشيا – فورميديوم – تترادرون – كلوروكوكام – كلوردجونيوم – جونفونيما – ستيجيوكلونيوم – اوسيلاتوريا – كارتيريا – ميريسموبيديا – كلاميدوموناس – ارثروسبيرا.	تدل علي وجود تلوث بالمياه
نوديولاريا – كولاستروم – فراجيلاريا – جومفوسفيرا – مابكراكتينيوم – دسميديوم – زيجنيما – ستورونيس – بيدياستروم – موجيونيا – سيفانوديسكاس – اكتينياستروم.	تميز المياه السطحية.
بولبوشليت – ميكروسبورا – اودوجنيوم – درابارنالديا – كنجيبيا – جونفونيما – اولوتركس – اودونيلا – كلادوفورا – فورميديوم – فيوتوكونيس – سيجيوكلونيوم – تتراسبورا – شيتوفوريا – سيمبيلا – باتراشوسفيرموم – توليوبوتركس – شاراالشنانشيس.	تنمو علي جدران خزانات المياه.
ميرميسموبيديا – ميريديون – ليمانيا – كولونيس – ستوراستروم – ميكروكوليس – كروميولينا – نافيكيولا – اولوتركس – افانوسيكا – سيكلونيلا – ريزووكلونيوم – بنيولاريا – كلادوفورا – انكستروديسموس – فاكوتاس – كالوتركس – ميكراستيرياس – سيريريلا – شاماسيفون – كوكونيس – رودوموناس – هيلدينبراديا – فاكوتيوس - نينيولاريا	تميز المياه النقية.

*AWWA, APHA and WEF. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

AWWA, Washington, D.C. (18th ed. 1992).

المؤلف في سطور

د. نبيل أحمد عبد الله محمد الصغير **مواليد القاهرة عام ١٩٦١**

تخرج في كلية العلوم جامعة عين شمس تخصص الجيولوجيا والكيمياء عام ١٩٨٣.
حاصل على درجة الماجستير عام ١٩٩٥ في معالجة المياه تحت عنوان:-

"تقييم عمليات معالجة المياه العادمة بمحطة المعالجة بمنوف" (بعثة من منظمة الصحة العالمية).
حاصل على درجة الدكتوراه في معالجة المياه تحت عنوان:-

"تحسين نوعية مياه الشرب من خلال عملية الترويب"

درس تكنولوجيا البيئة (تخصص معالجة المياه) بجامعة بريمن بألمانيا الاتحادية، ١٩٩٦.
درس الإدارة البيئية المتكاملة بمعهد "يانتسكي" بكولونيا ١٩٩٦ ـ ألمانيا الاتحادية.
درس وتدرب خلال المشروع السويدي النموذجي RUST VA – Project AB لنقل تكنولوجيا إزالة الحديد والمنجنيز بقرى المنوفية، ١٩٩٥.
درس العلوم البيئية بجامعة عين شمس ١٩٩٢/١٩٩١.
عمل باحث بالهيئة القومية لمياه الشرب والصرف الصحي من ١٩٨٨ ـ ١٩٩٥.
اشتغل بالعمل البحثي لتطوير صناعة المواد المخثرة المستخدمة في معالجة المياه.
يعمل حاليا باحثا ومديرًا للبحوث والتطوير والخدمات العلمية بشركة الشَّبَّة المصرية.

مجالات الخبرة:

- تطوير العمليات الإنتاجية الصناعية لرفع الكفاءة وتحسين نوعية كيماويات معالجة المياه.
- إجراء التجارب الميدانية لاستخدام مواد معالجة المياه.
- إجراء أبحاث معالجة مياه الصرف العادمة باستخدام المروبات لرفع الكفاءة.
- استخدام أجهزة المحاكاة لمحطات معالجة المياه لتقييم أداء كيماويات المعالجة.
- الاشتراك مع الخبراء في وضع المواصفات القياسية الخاصة بنوعية المياه.
  وكيماويات معالجة المياه بالهيئة المصرية العامة للمواصفات والجودة.
- تحقيق المواصفات القياسية المطلوبة في المواد المستخدمة في معالجة المياه.
- تطوير الأداء المعملي من حيث تطوير طرق القياس المستخدمة في مجال نوعية كيماويات معالجة المياه.
- متابعة استخدام مواد المعالجة بمحطات معالجة المياه ووضع حلول للمشاكل التي تواجه المستخدمين.
- الاشتراك في المؤتمرات المعنية بمعالجة المياه
- استخدام المروبات العضوية في انتزاع المياه من الحمأة بمحطات المعالجة.
- استخدام المروبات غير العضوية المختلفة الحمضية والقاعدية المنخفضة والعالية في معالجة نوعيات
  المياه المختلفة.

القضايا محل الاهتمام:

- تلوث البيئة والمياه.
- ندرة المياه.
- ترشيد استخدامات كيماويات معالجة المياه.

تكنولوجيا معالجة مياه الشرب
(الترويب - التطهير)

قال تعالى:

وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَّاهُ فِي الْأَرْضِ وَإِنَّا عَلَى ذَهَابٍ بِهِ لَقَادِرُونَ (١٨) [المؤمنون، الآية: ١٨]. وقال تعالى: أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَلَكَهُ يَنَابِيعَ فِي الْأَرْضِ ثُمَّ يُخْرِجُ بِهِ زَرْعًا مُخْتَلِفًا أَلْوَانُهُ ثُمَّ يَهِيجُ فَتَرَاهُ مُصْفَرًّا ثُمَّ يَجْعَلُهُ حُطَامًا إِنَّ فِي ذَلِكَ لَذِكْرَى لِأُولِي الْأَلْبَابِ (٢١)[الزمر،الآية: ٢١].