الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

مذكرة تخرج لنيل شهادة

ماستـــر أكاديمـــي

ميـــدان: العلوم والتكنولوجيا

شعبـــــة: هندسة الطرائق

تخصـــــص: هندسة كيميائية

مـن اعـــداد الطلبـــة:

1- ليفة سيف الدين

2- بن مبارك إلياس

المـوضـــــــوع

معالجة المياه المستعملة بمواد طبيعية منخفضة التكلفة: دراسة الامتزاز والحركية وتقييم السمية الحيوية

نوقشت في:2026/06/13

أمام لجنة المناقشة:

د. حشاني صلاح الدين	رئيسا	جامعة الوادي.
د. بن مية عمار	مناقشا	جامعة الوادي.
د. منصر سهيلة	مشرفا	جامعة الوادي.
د. سالمي شيماء	مشرفا	جامعة الوادي.

الموسم الجامعي: 2026/2025

الاهداء

إلى والديّ الحبيبين: سر وجودي وقوة حياتي.

إلى إخوتي الأعزاء: سندي في الشدة وفرحي في النجاح.

إلى زوجتي الحبيبة: شريكة دربي ونعيم أيامي.

إلى أبنائي الأعزاء: قرة عيني وأمل مستقبلي.

أهدي هذا الجهد المتواضع

راجياً أن يكون خالصاً لوجه الله ونافعاً للخلق.

ليفة سيف الدين

الاهداء

احمد الله على نعمه و على فضله عليّ لإنهاء هذا البحث

الى من سهر على تربيتي و تعليمي احسن المكارم و الاخلاق

الى من دعمني و ساندني سرا و جهرا

يا ربي احفظ لي أبي

الى من حملتني و تعبت لاجلي

الى من كانت دعواتها سلاحا يقوي عزيمتي

الى من كانت تمرض معي اذا مرضت و تبكي اذا بكيت

الى من كانت الجنة تحت قدميها

الى امي الغالية اللهم احفظها لي

الى اخوتي الذين لم يبخلوا علي من نصائحهم

الى من تشاركوا معي افراحي و أحزاني

يا رب اطل في اعمار عائلتي

الى كل الأصدقاء و الزملاء و الأساتذة

الذين شجعوني على إتمام هذا البحث من قريب او بعيد

لكل من كانت له ذرة خير تجاهي

شكرا لكم و بارك اللهم فيكم و حفظكم الله لكل من احبكم و احببتم.

بن مبارك إلياس

الشكر والعرفان

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.

نتقدم بجزيل الشكر والعرفان إلى كل من ساهم في إنجاز هذا العمل:

إلى الأستاذة الفاضلة **منصر سهيلة**، المشرفة الأولى، على توجيهاتها القيمة ودعمها المستمر.

إلى الأستاذة الفاضلة **شيماء سالمي**، المشرفة المساعدة، على نصائحها الثمينة وعطائها.

إلى المخبرية المخلصة **ساعي خولة** في **محطة التطهير بكوينن**، على تعاونها الكبير وتسهيلها لمهمة البحث.

إلى جميع **أساتذتنا المدرسين** الذين قدموا لنا العون والنصح طوال مسيرتنا الجامعية.

إلى **جامعتنا** و**كليتنا** على توفير المناخ العلمي الملائم.

إلى **أسرنا الكريمة** :آبائنا، أمهاتنا، إخوتنا، زوجاتنا، وأبنائنا، على سندهم ودعمهم.

إلى **أصدقائنا** و**زملائنا في الدراسة**، رفقاء الدرب، على تشجيعهم ووقوفهم بجانبنا.

شكراً لكم جميعاً، وجزاكم الله خيراً.

ليفة سيف الدين، بن مبارك إلياس

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير حل بيئي مستدام ومنخفض التكلفة لمعالجة المياه المستعملة، وذلك لمواجهة تحديات ندرة المياه المتزايدة خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة، مع إمكانية إعادة استخدام المياه المعالجة في الزراعة والصناعة. تعتمد الدراسة على تثمين الموارد الطبيعية المحلية من خلال ابتكار مزيج ثنائي يدمج بين آلية التخثير الحيوي لمستحلب بذور المورينجا وآلية الترسيب والامتزاز للمادة الطينية، كبديل فعال للطرق التقليدية المكلفة.

تم تحديد الجرعة المثالية للمعالجة بعد سلسلة من التجارب الاستكشافية، حيث بلغت 25 ملغ من المادة الطينية مضافاً إليها 0.5 ملل من المستحلب النباتي لكل 25 ملل من مياه الصرف. ولتقييم أداء هذا المزيج، أجريت التجارب في وسطين مختلفين: الوسط الداخلي المخبري، والوسط الخارجي المتعرض للعوامل البيئية الطبيعية كالتهوية ودرجة الحرارة والإضاءة، كما تم قياس مجموعة من المؤشرات الكيميائية والفيزيائية قبل وبعد المعالجة.

أظهرت النتائج كفاءة عالية للمزيج في إزالة الملوثات العضوية، حيث بلغت نسبة إزالة DCO = 96.4% وDBO_5= 96.2% في الوسط الخارجي بعد 180 دقيقة. كما حقق المزيج إزالة شبه تامة للمعادن الثقيلة والأيونات (نحاس، زنك، كلوريد، سيانيد) واختصر زمن المعالجة إلى 30 دقيقة فقط. أظهرت الدراسة أن عملية الامتزاز تتبع نموذج الدرجة الثانية مما يؤكد طابعها الكيميائي، في حين كانت إزالة الأملاح محدودة جداً.

للتحقق من سلامة المياه المعالجة بيئياً، أكد اختبار السمية النباتية على بذور الفجل نجاح المعالجة، حيث ارتفعت نسبة الإنبات من 0% في المياه الخام إلى 70% في المياه المعالجة، بمتوسط طول 4.0 سم، مما يثبت صلاحية المياه المعالجة للري الزراعي.

تفتح هذه الدراسة آفاقاً واعدة لتثمين الرواسب الناتجة عن عملية المعالجة في قطاع البناء، بالإضافة إلى استخلاص المعادن الثقيلة ذات القيمة الاقتصادية، تدعيماً لمبادئ الاقتصاد الدائري وتحويل النفايات إلى موارد.

الكلمات المفتاحية:

المياه المستعملة، الامتزاز، التخثير الحيوي، المادة الطينية، بذور المورينجا، السمية النباتية.

Résumé :

Cette étude vise à développer une solution environnementale durable et à faible coût pour le traitement des eaux usées, afin de faire face aux défis croissants de la rareté de l'eau, en particulier dans les zones arides et semi-arides, avec la possibilité de réutiliser les eaux traitées dans l'agriculture et l'industrie. L'étude repose sur la valorisation des ressources naturelles locales en innovant un mélange binaire combinant le mécanisme de coagulation biologique de l'extrait de graines de Moringa et le mécanisme de sédimentation et d'adsorption de l'argile, comme alternative efficace aux méthodes traditionnelles coûteuses.

La dose optimale de traitement a été déterminée à 25 mg d'argile additionnée de 0,5 ml d'extrait végétal pour 25 ml d'eaux usées. Pour évaluer les performances de ce mélange, les expériences ont été réalisées dans deux milieux différents : le milieu intérieur de laboratoire et le milieu extérieur exposé aux facteurs environnementaux naturels (ventilation, température, éclairage). Les résultats ont montré une efficacité élevée du mélange dans l'élimination des polluants organiques, avec des taux d'élimination de la DCO et de la DBO_5 atteignant respectivement 96,4% et 96,2% en milieu extérieur après 180 minutes. Le mélange a également assuré une élimination quasi-totale des métaux lourds et ions (cuivre, zinc, chlorure, cyanure), réduisant le temps de traitement à seulement 30 minutes.

Le test de phytotoxicité sur graines de radis a confirmé le succès du traitement, avec un taux de germination passant de 0% dans les eaux brutes à 70% dans les eaux traitées, démontrant l'absence d'effets toxiques et la sécurité des eaux traitées pour l'irrigation agricole.

Mots-clés : Eaux usées, Adsorption, Coagulation biologique, Argile, Graines de Moringa, Phytotoxicité.

Abstract:

This study aims to develop a sustainable and low-cost environmental solution for wastewater treatment to address the growing challenges of water scarcity, particularly in arid and semi-arid regions, with the possibility of reusing treated water in agriculture and industry. The study relies on valuing local natural resources by developing an innovative binary mixture combining the biocoagulation mechanism of Moringa seed extract with the sedimentation and adsorption mechanism of clay, as an effective alternative to expensive conventional methods.

The optimal treatment dose was determined as 25 mg of clay plus 0.5 ml of plant extract per 25 ml of wastewater. To evaluate the performance of this mixture, experiments were conducted in two different environments: indoor laboratory conditions and outdoor conditions exposed to natural environmental factors (ventilation, temperature, lighting). The results showed high efficiency of the mixture in removing organic pollutants, with COD and BOD_5 removal rates reaching 96.4% and 96.2% respectively in the outdoor environment after 180 minutes. The mixture also achieved near-complete removal of heavy metals and ions (copper, zinc, chloride, cyanide), reducing treatment time to only 30 minutes.

The phytotoxicity test on radish seeds confirmed the success of the treatment, with germination rate increasing from 0% in raw wastewater to 70% in treated water, demonstrating the absence of toxic effects and the safety of treated water for agricultural irrigation.

Keywords: Wastewater , Adsorption, Biocoagulation , Clay, Moringa seeds , Phytotoxicity.

الفهرس

الفهرس:

الاهداء I

الاهداء II

الشكر والعرفان III

الملخص: IV

Résumé : V

Abstract: VI

الفهرس VII

الفهرس: VIII

قائمة الأشكال: XIII

قائمة الجداول: XV

قائمة الاختصارات: XVI

المقدمة العامة 1

الفصل الأول 5

1. مقدمة حول المياه المستعملة: 6

2.المياه المستعملة: 7

1.2. تعريف المياه المستعملة: 7

2.2. مصادر المياه المستعملة: 7

1.2.2. المصادر المنزلية (Domestic Sources): 7

2.2.2. المصادر الصناعية والتجارية(Industrial & Commercial Sources) : 8

3.2.2. الجريان السطحي ومياه الأمطار(Stormwater & Urban Runoff) : 8

4.2.2. المصادر المؤسسية والرعاية الصحية(Institutional & Healthcare Sources) : 8

3.2. خصائص المياه المستعملة:..... 9

1.3.2.الخصائص الفيزيائية(Physical Characteristics) : 9

2.3.2. الخصائص الكيميائية (Chemical Characteristics) : 10

3.3.2. الخصائص البيولوجية(Biological Characteristics) : 12

3. أهمية المياه المستعملة:..... 14

4. أهداف معالجة واستغلال المياه المستعملة: 15

6.تعريف وأضرار بعض المعادن والأيونات في المياه المستعملة :..... 16

7. معالجة المياه المستعملة بالطرق التقليدية:..... 19

1.7. المعالجة التقليدية:..... 19

2.7. أداء المحطة – تقييم كفاءة الإزالة: 22

8. الطرق الحديثة في معالجة المياه المستعملة:..... 22

1.8. عمليات الأغشية:..... 23

2.8.عمليات الأكسدة المتقدمة :..... 24

3.8.المعالجة الكهروكيميائية :..... 26

4.8.العمليات اللاهوائية المتقدمة : 27

5.8.المعالجة باستخدام المواد النانوية :..... 29

9.مقارنة بين الطرق التقليدية والحديثة: 29

10.معايير جودة المياه : 30

1.10.المعايير الدولية لجودة المياه:..... 30

2.10.معايير المعادن الثقيلة لجودة المياه:..... 31

11.الخاتمة:..... 32

الجزء التطبيقي..... 33

الفصل الثاني 34

1.مقدمة :..... 35
2.المواد المستعملة : 35
3.الأدوات والمواد المستعملة: 36
4.تحضير المستحلب: 36
5.تحظير المادة الطينية..... 38
6.طريقة تطبيق المعالجة: 38
1.6.إحضار الماء المستعمل وترشيحه قبل الدراسة: 38
2.6.تطبيق المعالجة باستعمال المادة الطينية : 39
3.6.تطبيق المعالجة باستعمال المستحلب النباتي..... 40
7. التحاليل الفيزيائية الكيميائية:..... 41
1.7.الأس الهيدروجيني (*pH*) : 41
2.7.قياس الناقلية والملوحة : 42
3.7.قياس درجة الحرارة: 42
4.7.قياس الطلب الكيميائي للأكسجين (*DCO*):..... 42
5.7.قياس الطلب الحيوي للأوكسجين(DBO_5) : 43
6.7. تحليل المعادن الثقيلة والأيونات للمياه قبل وبعد المعالجة: 44
8. ظروف التشغيل التجريبية..... 45
الفصل الثالث 46
1.مقدمة الفصل: 47
2.نتائج التحليل قبل المعالجة: 47
1.2. تحليل مطياف فوريه للأشعة تحت الحمراء (*FTIR*) :..... 47
2.2. حيود الأشعة السينية *DRX* :..... 49
3.تقييم كفاءة المعالجة الفردية والمدمجة (قياس DCO): 51

*1.3.*المعالجة بالمادة الطينية : 51

*2.3.*المعالجة بالمادة النباتية (بذور جافة): 52

3.3. المعالجة بالمادة النباتية (مستحلب) : 53

4.3. المزج بين الجرعات المثالية (25 مغ مادة طينية مع 0.5 مل مستحلب) : 53

5.3. مناقشة النتائج:..... 54

4.تأثير زمن المعالجة والوسط البيئي (DCO / DBO_5)..... 55

1.4. التجارب في الوسط الداخلي (المختبر)..... 55

2.4. التجارب في الوسط الخارجي : 56

5.مناقشة النتائج : 57

6. الخصائص الفيزيائية المقاسة (الناقلية، الملوحة، درجة الحرارة ، PH) : 58

*1.6.*مناقشة النتائج الفيزيائية:..... 59

1.1.6. الناقلية الكهربائية : 59

2.1.6.الملوحة : 60

2.6. الاستنتاج العام : 60

7. حركية امتزاز المعادن الثقيلة و الأيونات: 61

1.7. النماذج والعلاقات الرياضية لحساب الحركية والمردود: 61

*2.7.*الأشكال البيانية للحركية :..... 63

3.7. جداول النتائج الرقمية لحركية المعادن الثقيلة و الأيونات : 65

*4.7.*مناقشة نتائج حركية الامتزاز: 67

***8.*استعمالات المادة المترسبة : 69**

1.8. تثبيته واستخدامه في البناء (صلب واستقرار): 69

*2.8.*استخلاص المعادن الثقيلة (استرداد عالي القيمة) 70

9. تقييم السمية النباتية باستخدام بذور الفجل : 71

1.9. بروتوكول التجربة : 71

9.2. نتائج تجربة الفجل : 73

9.3. التوثيق الفوتوغرافي للسمية النباتية ومؤشرات النمو:..... 73

9.4. تحليل وتفسير النتائج المستخلصة :..... *75*

10.خاتمة الفصل:..... 77

الخاتمة 76

المراجع 79

قائمة الأشكال:

الشكل (1):يوضح مصادر التلوث 9
الشكل(2): يوضح الفرق بين DCO وDBO_5 12
الشكل (3): يوضح خصائص المياه المستعملةشكل3 13
الشكل (4): توضيح لاستخدامات المياه المعالجة (الري، الصناعة) 14
الشكل (5): المعادن الثقيلة وتأثيرها على الإنسان 18
الشكل (6): انتقال المعادن الثقيلة في السلسلة..... 18
الشكل (7): تأثير الملوثات على جودة المياه والكائنات الحية..... 18
الشكل (8): مرحلة الغربلة..... 20
الشكل (9): توضح لعملية الترسيبشكل9 20
الشكل (10): توضح عملية المعالجة باستخدام احواض التهوية 21
الشكل (11): يوضح عملية المعالجة باستخدام المفاعلات الحيوية الغشائية 23
الشكل (12): يوضح عملية المعالجة باستخدام التناضح العكسي..... 24
الشكل (13): يوضح عملية المعالجة باستخدام الاوزون 25
الشكل (14): يوضح عملية المعالجة باستخدام عملية فنتون 26
الشكل (15): رسم توضيحي لعملية التخثير 26
الشكل (16): رسم توضيحي لعملية الاكسدة الانودية 27
الشكل (17): رسم توضيحي لإحدى العمليات اللاهوائية المتقدمة باستخدام مفاعل طبقة الحمأة اللاهوائية المتدفقة لأعلى (UASB)..... 28
الشكل (18): رسم توضيحي لإحدى العمليات اللاهوائية المتقدمة باستخدام المفاعلات الحيوية الغشائية اللاهوائية(ANMBR) 28
الشكل (19): بذور المور ينجا 37
الشكل (20): مخطط يمثل خطوات تحظير المستحلب النباتي 37

الشكل (21): يوضح تحليل FTIR وDRX للمادة الطينية..... 38
الشكل (22): يوضح ترشيح الماء المستعمل 39
الشكل (23): مخطط يمثل خطوات المعالجة بالمادة الطينية..... 40
الشكل (24): مخطط يمثل خطوات المعالجة بالمستحلب النباتي 41
الشكل (25): جهاز متعدد القياسات (الملوحةPH. T.CE) 42
الشكل (26): الأجهزة المستعملة في قياس DCO..... 43
الشكل (27): توضيح لعملية قياس DBO_5..... 43
الشكل (28): توضيح لعملية إجراء تحليل الامتصاص 45
الشكل (29): منحنى يمثل نتائج تحليل FTIR للمادتين 48
الشكل (30): منحنى يمثل نتائج تحليل DRX للمادة الطينية 50
الشكل (31): منحنى بياني يمثل تركيز DCOللمادة الطينية..... 52
الشكل (32): منحنى بياني يمثل تركيز DCO للمادة النباتية (بذور)..... 52
الشكل (33): منحنى بياني يمثل تركيز DCO للمستحلب النباتي..... 53
الشكل (34): منحنى بياني يمثل تركيز DCO/DBO_5 للجرعة المثلى في الوسط الداخلي بدلالة الزمن.. 56
الشكل (35): منحنى بياني يمثل تركيز DCO/DBO5 للجرعة المثلى في الوسط الخارجي بدلالة الزم 57
الشكل (36): يوضح تغير الناقلية للجرعة المثالية بدلالة زمن الخلط..... 59
الشكل (37): يوضح تغير الملوحة للجرعة المثالية بدلالة زمن الخلط 60
الشكل (38): منحنى بياني يمثل qt (mg/g) بدلالة الزمن للمعادن الثقيلة والأيونات 63
الشكل (39): منحنى بياني يمثل (t/qt) بدلالة الزمن للمعادن الثقيلة والأيونات (نموذج الدرجة الثانية) .. 64
الشكل (40): منحنى بياني يمثل log(qe−qt) بدلالة الزمن للمعادن الثقيلة والأيونات (نموذج الدرجة الأولى) 64
الشكل (41): توضح التوثيق الفوتوغرافي للسمية النباتية ومؤشرات النمو 74

قائمة الجداول:

الجدول (1): مقارنة بين الطرق التقليدية والحديثة للمعالجة..... 29
الجدول (2): المعايير الدولية لجودة المياه 30
الجدول (3): المعايير الدولية للحد المسموح به من المعادن..... 31
الجدول (4): يوضح الأدوات والمواد المستعملة..... 36
الجدول (5) : يوضح نتائج تركيز DCO للمادة الطينية 51
الجدول (6) : يوضح نتائج تركيز DCO للمادة النباتية (بذور) 53
الجدول (7): يوضح نتائج تركيز DCO للمستحلب النباتي 53
الجدول (8): يوضح نتائج تركيز DCO للمزيج 53
الجدول (9): يوضح نتائج تركيز DCO/DBO_5 للجرعة المثلى في الوسط الداخلي بدلالة الزمن..... 55
الجدول (10): يوضح نتائج تركيز DCO/DBO5 للجرعة المثلى في الوسط الخارجي بدلالة الزمن... 56
الجدول (11): نتائج القياسات الفزيائية 59
الجدول (12): يمثل نتائج امتصاص المعادن الثقيلة والايونات بدلالة الزمن 61
الجدول (13): النتائج المتحصل عليها من دارسة حركية المعادن الثقيلة والأيونات خلال المعالجة في الوسط الداخلي 65
الجدول (14): النتائج المتحصل عليها من دارسة حركية المعادن الثقيلة والأيونات خلال المعالجة في الوسط الخارجي 66
الجدول (15): يوضح المواد والأدوات المستخدمة 71
الجدول (16): يوضح تصميم التجربة 72
الجدول (17): يوضح القياسات المسجلة بعد 20 يوما 74

قائمة الاختصارات:

الرمز	الأجنبية	العربية
TS	Total Solids	إجمالي المواد الصلبة
SS / MES	Suspended Solids	المواد الصلبة العالقة
T	Temperature	درجة الحرارة
TSS	Total Suspended Solids	إجمالي المواد الصلبة العالقة
TDS	Total Dissolved Solids	إجمالي المواد الصلبة الذائبة / الأملاح الكلية الذائبة
PH	Potential of Hydrogen	درجة الحموضة
OD	Oxygen Demand	الطلب على الأكسجين
BOD_5 / DBO_5	Biochemical Oxygen Demand	الطلب البيوكيميائي على الأكسجين
COD / DCO	Chemical Oxygen Demand	الطلب الكيميائي على الأكسجين
EC	Electrical Conductivity	التوصيل الكهربائي
CB	Coliform Bacteria	البكتيريا القولونية
AMR	Antimicrobial Resistance	مقاومة مضادات الميكروبات
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction	مكتب الأمم المتحدة للحد من مخاطر الكوارث
PST	Primary Sedimentation Tank(s)	أحواض الترسيب الأولي
ASP	Activated Sludge Process	عملية الحمأة المنشطة
TF	Trickling Filters	المرشحات التقاطرية
AL	Aerated Lagoons	أحواض التهوية
MBR	Membrane Bioreactors	المفاعلات الحيوية الغشائية
OH•	Hydroxyl Radicals	جذور الهيدروكسيل
UV	Ultraviolet Radiation	الأشعة فوق البنفسجية
PPCPs	Pharmaceuticals and Personal Care Products	المستحضرات الصيدلانية ومنتجات العناية الشخصية
BDD	Boron-doped Diamond	ألماس مشبع بالبورون
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor	مفاعل طبقة الحمأة اللاهوائية المتدفقة لأعلى

ANMBR	Anaerobic Membrane Bioreactor	المفاعل الحيوي الغشائي اللاهوائي
RO	Reverse Osmosis	التناضح العكسي
AOPs	Advanced Oxidation Processes	عمليات الأكسدة المتقدمة
WHO	World Health Organization	منظمة الصحة العالمية
FAO	Food and Agriculture Organization	منظمة الأغذية والزراعة
US EPA	United States Environmental Protection Agency	وكالة حماية البيئة الأمريكية
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه
DRX	X-ray Diffraction	حيود الأشعة السينية
NH	Imide/Amine Group	مجموعة أمينية
EDTA	Ethylenediaminetetraacetic Acid	حمض الإيثيلين ديامين رباعي الأسيتيك

المقدمة العامة

المقدمة العامة:

تعدّ مشكلة تلوث المياه من أكبر التحديات البيئية التي تواجه البشرية في القرن الحادي والعشرين. فمع تزايد السكان، والتوسع الحضاري السريع، والنمو الصناعي المتسارع، تتزايد كميات المياه المستعملة الملوثة التي تُصرف يومياً في البيئة دون معالجة كافية. وتشير التقديرات الدولية إلى أن أكثر من 80% من مياه الصرف الصحي في العالم تعود إلى البيئة دون أي معالجة [1]، مما يؤدي إلى تلوث المسطحات المائية السطحية والجوفية، وانتشار الأمراض المائية، واختلال النظم الإيكولوجية، وفقدان التنوع البيولوجي [2، 3]. وتتفاقم هذه الأزمة في المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث تعاني هذه المناطق من ندرة حادة في الموارد المائية، مما يجعل إعادة استخدام المياه المعالجة خياراً استراتيجياً لا غنى عنه لتحقيق الأمن المائي والتنمية المستدامة [4، 5]

للتغلب على هذه المشكلة، تم تطوير العديد من تقنيات معالجة المياه المستعملة على مر السنين، منها الطرق التقليدية كالترسيب والترشيح والحمأة المنشطة [2، 3]، والطرق الحديثة كعمليات الأغشية والأكسدة المتقدمة والمعالجة الكهروكيميائية [6، 7، 8]. ومع ذلك، فإن معظم هذه التقنيات تعاني من عيوب جوهرية، أبرزها التكلفة الاستثمارية والتشغيلية المرتفعة، والاستهلاك الكبير للطاقة، والحاجة إلى صيانة متخصصة، وإنتاج كميات كبيرة من الحمأة التي تشكل بدورها مشكلة تلوث ثانوية [6، 9،10]. كما أن بعض هذه التقنيات تستخدم مواد كيميائية خطرة قد تلوث البيئة، أو تكون غير فعالة في إزالة الملوثات الناشئة كبقايا الأدوية والهرمونات والمعادن الثقيلة [11، 12] .

وفي هذا العمل، تم الاعتماد على استخدام مزيج من مواد طبيعية محلية منخفضة التكلفة وصديقة للبيئة لمعالجة المياه المستعملة، تمثلت في المادة الطينية والمستحلب النباتي المستخلص من بذور المورينجا، وذلك للاستفادة من خصائصهما في الامتزاز والتخثير، مع دراسة التأثير التآزري بينهما.

تأتي هذه الدراسة لتقدم حلاً مبتكراً وفعالاً ومنخفض التكلفة لمعالجة المياه المستعملة، من خلال تطوير مزيج ثنائي يدمج بين مادتين طبيعيتين محليتين: المادة الطينية الغنية بالسميكتيت وأكاسيد السيليكا والألومينا [13، 14]، والمستحلب النباتي المستخلص من بذور المورينجا المعروف بخصائصه المخثرة الحيوية [15، 16]. وتتمثل أبرز نقاط قوة هذه الدراسة في اعتمادها على توصيف هيكلي دقيق للمواد باستخدام تقنيات FTIR وDRX ، وفي مقارنة أداء المعالجة بين وسط داخلي مخبري وآخر خارجي يتعرض للعوامل البيئية الطبيعية، وفي دراسة حركية الامتزاز وفق نماذج رياضية، وفي إجراء اختبار عملي للسمية النباتية لضمان السلامة البيولوجية للمياه المعالجة، وأخيراً في اقتراح آفاق لتثمين الرواسب الناتجة في قطاع البناء ضمن مقاربة الاقتصاد الدائري [17].

يتكون هذا العمل من ثلاثة فصول رئيسية، وهي كالتالي:

الفصل الأول (الإطار النظري): يعرف المياه المستعملة ومصادرها وخصائصها، ويستعرض طرق معالجتها التقليدية والحديثة، مع دراسة حالة لمحطة كوينين ومعايير الجودة الدولية.

الفصل الثاني (المواد والطرق التجريبية): يصف المواد الطبيعية المستخدمة (الطين والمورينجا)، وطرق تحضيرها، وخطوات تطبيق المعالجة في الوسطين الداخلي والخارجي، والأجهزة والتحاليل المعتمدة.

الفصل الثالث (النتائج والتجارب): يعرض نتائج تحليل FTIR وDRX، وكفاءة المعالجة الفردية والمدمجة، وتأثير الزمن والوسط، وحركية امتزاز المعادن الثقيلة، ونتائج اختبار السمية النباتية.

الجزء النظري

الفصل الأول

1. مقدمة حول المياه المستعملة:

تُعدّ المياه من أهم الموارد الطبيعية التي تعتمد عليها الحياة البشرية والأنظمة البيئية، حيث تلعب دورًا أساسيًا في مختلف الأنشطة اليومية والاقتصادية، مثل الاستهلاك المنزلي، الزراعة، والصناعة. ومع التزايد المستمر في عدد السكان والتوسع العمراني والتطور الصناعي، شهد العالم ارتفاعًا ملحوظًا في الطلب على المياه، مما أدى في المقابل إلى زيادة حجم المياه المستعملة الناتجة عن هذه الأنشطة. [1]

تُعرّف المياه المستعملة بأنها المياه التي تعرضت لتغير في خصائصها الفيزيائية أو الكيميائية أو البيولوجية نتيجة استعمالها، مما يجعلها غير صالحة للاستخدام المباشر دون معالجة. [3] وتنقسم هذه المياه إلى عدة أنواع، من أهمها: المياه المنزلية، الصناعية، والزراعية، حيث تختلف مكوناتها حسب مصدرها، لكنها غالبًا ما تحتوي على مواد عضوية، عناصر مغذية (كالنيتروجين والفوسفور)، مواد كيميائية سامة، وكائنات دقيقة ممرضة. [2]

يشكل تصريف المياه المستعملة دون معالجة تهديدًا خطيرًا للبيئة والصحة العامة، إذ يؤدي إلى تلوث المسطحات المائية السطحية والجوفية، ويساهم في انتشار الأمراض المنقولة عبر المياه. [3] كما يؤثر سلبًا على التوازن البيئي من خلال الإخلال بالنظم الإيكولوجية المائية. [1]

تُعتبر معالجة المياه المستعملة من الركائز الأساسية لتحقيق التنمية المستدامة، حيث تهدف إلى إزالة الملوثات وتحسين نوعية المياه باستخدام تقنيات متعددة تشمل المعالجة الفيزيائية، الكيميائية، والبيولوجية. [18]

كما أن إعادة استخدام المياه المعالجة أصبحت خيارًا استراتيجيًا، خاصة في المناطق التي تعاني من ندرة الموارد المائية مثل الجزائر، إذ يمكن استغلالها في الري الزراعي والصناعة. [4]

في هذا السياق، تندرج هذه الدراسة ضمن الجهود الرامية إلى تحسين تقنيات معالجة المياه المستعملة والحد من آثارها البيئية، من خلال التركيز على معالجة المياه المستعملة باستخدام مواد طبيعية بواسطة تقنية الامتزاز

التي تعتبر اقل تكلفة وتأثير على البيئة، وذلك بهدف تطوير حلول فعالة ومستدامة لمعالجة الملوثات وتحسين جودة المياه.

2.المياه المستعملة:

1.2. تعريف المياه المستعملة:

تُعرّف المياه المستعملة بأنها مزيج معقد من المياه والمواد الملوثة الناتجة عن الأنشطة البشرية المختلفة، وقد تغيرت صفاتها الطبيعية نتيجة لهذه الاستخدامات. [19] يقدم الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية تعريفاً موسعاً في "كتابه الذهبي"، حيث تعرف المياه المستعملة بأنها "مصطلح عام يصف النفايات السائلة والمُرشحات والمواد المنضَبة التي تدخل إلى البيئة الطبيعية". [20]

وتجدر الإشارة إلى أن مفهوم المياه المستعملة أوسع من مفهوم مياه الصرف الصحي، حيث يشمل هذا الأخير المياه العادمة الناتجة عن المجتمعات السكنية فقط، بينما تمتد المياه المستعملة لتشمل أيضاً المياه الصناعية والزراعية ومياه الجريان السطحي. [21]

2.2. مصادر المياه المستعملة:

يمكن تصنيف مصادر المياه المستعملة وفقاً لنوع النشاط البشري المولد لها، ويشكل هذا التصنيف الأساس لأي دراسة بيئية أو هندسية تهدف إلى معالجة هذه المياه أو إعادة استخدامها. [22]

1.2.2. المصادر المنزلية (Domestic Sources):

تعتبر المصادر المنزلية من أهم مصادر المياه المستعملة من حيث الحجم والانتشار. تشمل هذه المصادر المياه الناتجة عن الاستخدامات اليومية في المساكن والمباني السكنية، مثل دورات المياه والحمامات والمطابخ وغسالات الملابس والأطباق. [23]

2.2.2. المصادر الصناعية والتجارية(Industrial & Commercial Sources) :

تشمل المياه المستعملة الناتجة عن عمليات التصنيع والإنتاج في المنشآت الصناعية، وكذلك المياه الناتجة عن الأنشطة التجارية المختلفة. تختلف خصائص هذه المياه اختلافاً كبيراً تبعاً لنوع الصناعة، فقد تشمل مخلفات صناعة الأغذية والمشروبات، ومياه تبريد الآلات، والمياه الناتجة عن عمليات التنظيف في محطات الوقود وورش إصلاح السيارات، ومياه صالونات التجميل والمغاسل التجارية. [24]

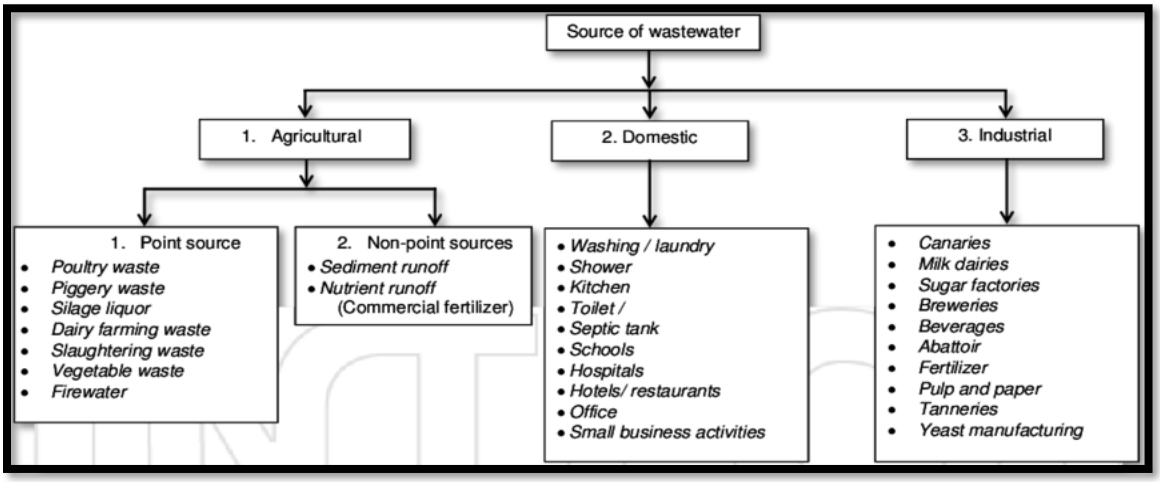
3.2.2. الجريان السطحي ومياه الأمطار(Stormwater & Urban Runoff) :

يمثل جريان مياه الأمطار والرياح فوق الأسطح المختلفة أحد المصادر المهمة للمياه المستعملة، حيث تلتقط هذه المياه أثناء جريانها الملوثات المتراكمة على الأسطح. تشمل مصادر الجريان السطحي أسطح المنازل والحدائق والطرق والممرات والمزاريب، بالإضافة إلى الأراضي الزراعية. [25] تحمل هذه المياه معها الرمال والمواد البترولية من المركبات، وأملاح إذابة الثلوج، والأسمدة والمبيدات من الأراضي الزراعية، والمواد العضوية، كما قد تحتوي على مسببات الأمراض من روث الحيوانات. [26]

4.2.2. المصادر المؤسسية والرعاية الصحية(Institutional & Healthcare Sources) :

تشمل هذه الفئة المياه المستعملة الناتجة عن المؤسسات العامة كالمدارس والجامعات والمستشفيات والسجون والمكاتب الحكومية. [27] تعتبر مياه المستشفيات من أخطر أنواع المياه المستعملة نظراً لاحتمال احتوائها على مسببات أمراض مقاومة للمضادات الحيوية، وبقايا الأدوية، والمركبات الصيدلانية، والمواد الكيميائية المستخدمة في التشخيص والعلاج. أما المياه الناتجة عن المؤسسات التعليمية فقد تتشابه في خصائصها مع المياه المنزلية ولكنها قد تظهر قيماً مرتفعة للمواد الصلبة العالقة والطلب البيوكيميائي للأكسجين نتيجة للأنشطة المختلفة داخل الحرم الجامعي. [28]

تم تلخيص هذه المصادر في المخطط التالي:



الشكل (1): يوضح مصادر التلوث

3.2. خصائص المياه المستعملة:

تتنوع خصائص المياه المستعملة بتنوع مصادرها، ويمكن تصنيف هذه الخصائص إلى ثلاثة أبعاد رئيسية: فيزيائية، وكيميائية، وبيولوجية. [29]

1.3.2.الخصائص الفيزيائية(Physical Characteristics) :

أ. درجة الحرارة(T) :

تكون درجة حرارة المياه المستعملة عادة أعلى من درجة حرارة المياه العذبة الطبيعية نتيجة للاستخدامات المنزلية والصناعية التي تضفي حرارة على الماء. تؤثر درجة الحرارة على قابلية ذوبان الأكسجين في الماء والنشاط الأيضي للكائنات الحية الدقيقة. [11]

ب. المواد الصلبة(Solids) :

تمثل المواد الصلبة أحد أهم المؤشرات الفيزيائية لنوعية المياه المستعملة، وتنقسم إلى [12]:

- **إجمالي المواد الصلبة (TS)** : وهو مجموع المواد الصلبة العالقة والذائبة. أظهرت دراسة أجراها Adugnaوزملاؤه (2024) أن قيم إجمالي المواد الصلبة في مياه مصنع جعة بلغت 1107.92 ملغم/لتر. [24]
- **إجمالي المواد الصلبة العالقة (TSS)** : وتشمل الجسيمات التي يمكن إزالتها بالترشيح. تراوحت قيمها في المياه المنزلية والمؤسساتية بين 35–256 ملغم/لتر وفقاً لدراسة Hamal و Pandit (2025).[30]
- **إجمالي المواد الصلبة الذائبة (TDS)** : وهي المواد التي تمر عبر مرشح قياسي، وتشمل الأملاح الذائبة والعناصر المعدنية. سجل Adugna وزملاؤه (2024) قيمة 848.88 ملغم/لتر لمياه مصنع الجعة. [24]

ج. العكارة (Turbidity) واللون والرائحة :

تتميز المياه المستعملة الخام بدرجات متفاوتة من العكارة واللون (الذي يتراوح بين الرمادي والبني الغامق) والرائحة الكريهة الناتجة عن تحلل المواد العضوية (غازات كبريتيد الهيدروجين والأمونيا والمركابتانات). ترتبط شدة الرائحة بشكل مباشر بمحتوى المياه من المواد العضوية المتعفنة. [11]

د. درجة الحموضة(PH) :

تتراوح قيمة الرقم الهيدروجيني للمياه المستعملة عادة بين 6.5 و 8.5، مما يعكس قلوية خفيفة إلى متوسطة. سجل Adugna و زملاؤه (2024) قيمة pH بلغت 8.06 لمياه الصرف الصناعي ، [24] بينما سجل Hamal و Pandit (2025) قيمة 8.3 ± 0.63 لمياه المؤسسات التعليمية. [30]

2.3.2. الخصائص الكيميائية (Chemical Characteristics) :

أ. الطلب الأكسجين(OD) :

يعد الطلب الأكسجيني من أهم المؤشرات الكيميائية لتقييم "قوة" المياه المستعملة، ويتفرع إلى نوعين رئيسيين [12] :

1) الطلب البيوكيميائي للأكسجين(BOD_5) :

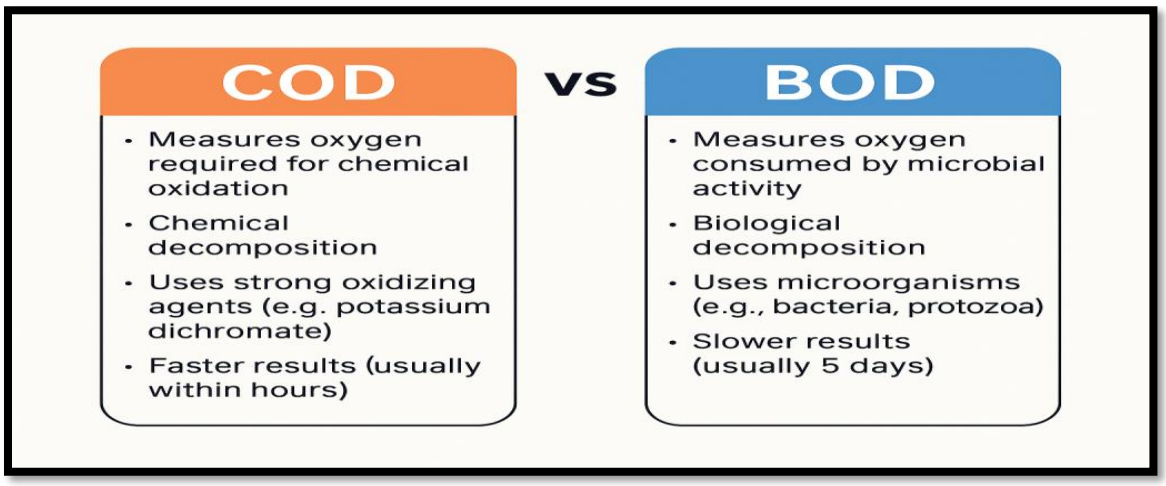
وهو كمية الأكسجين التي تستهلكها الكائنات الحية الدقيقة لتحليل المواد العضوية القابلة للتحلل بيولوجياً خلال 5 أيام عند درجة حرارة 20 مئوية. تراوحت القيم المسجلة في الدراسات بين 12.29 ملغم/لتر للمياه الصناعية المعالجة جزئياً (حسب دراسة Adugna 2024) [24] و213 ± 24 ملغم/لتر للمياه المؤسساتية الخام (حسب دراسة Hamal و Pandit 2025).[30]

2) الطلب الكيميائي للأكسجين(COD) :

وهو كمية الأكسجين اللازمة لأكسدة جميع المواد العضوية (القابلة والغير قابلة للتحلل بيولوجياً) باستخدام عامل مؤكسد كيميائي قوي. سجل Hamal و Pandit (2025) قيمة COD بلغت 453 ± 37 ملغم/لتر، [30] بينما سجل Adugna وزملاؤه (2024) قيمة 628.34 ملغم/لتر. [24]

3) نسبة BOD/COD :

تعكس هذه النسبة قابلية المياه المستعملة للمعالجة البيولوجية. تشير النسبة التي تزيد عن 0.5 إلى قابلية جيدة للمعالجة البيولوجية. سجلت دراسة Hamal و Pandit (2025) نسبة 0.46 ± 0.03 لمياه الصرف المؤسساتي. [30]



الشكل(2): يوضح الفرق بين DCO وDBO_5

ب. المغذيات(Nutrients) :

تحتوي المياه المستعملة على كميات متفاوتة من عناصر النيتروجين والفسفور. تشمل أشكال النيتروجين الأمونيا (NH_3–N)والنتريت (NO_2^-) والنترات (NO_3^-) والنيتروجين العضوي والنيتروجين الكلي.[31]

أظهرت دراسة Adugna وزملاؤه (2024) تركيزات منخفضة للفوسفات بلغت 0.29 ملغم/لتر وللنيتروجين الكلي 2.26 ملغم/لتر في المياه الصناعية. [24]

ج. العناصر الثقيلة والأملاح (Heavy Metals & Salts) :

قد تحتوي المياه المستعملة الصناعية على معادن ثقيلة مثل الرصاص (Pb) والكادميوم (Cd) والنحاس (Cu) والزنك (Zn) والحديد (Fe) والمنجنيز (Mn) بتركيزات قد تتجاوز الحدود المسموحة للري أو التصريف البيئي. [32] كما تقاس ملوحة المياه عادة بالتوصيل الكهربائي (EC)، حيث سجلت دراسة Adugna وزملاؤه (2024) قيمة 1253.42 ميكروسيمنز/سم [24]

3.3.2. الخصائص البيولوجية(Biological Characteristics) :

أ. الكائنات المسببة للأمراض(Pathogens) :

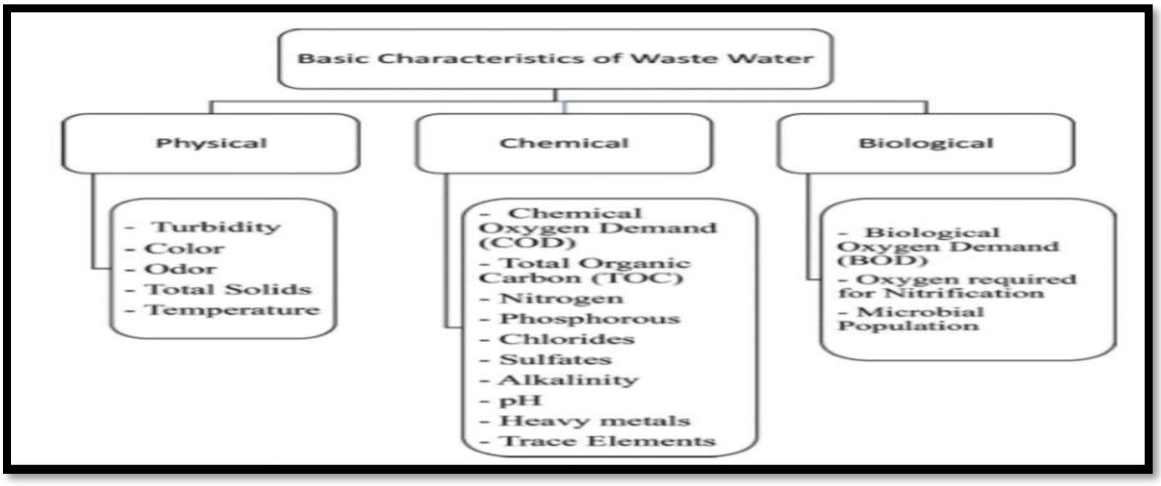
تمثل الكائنات الحية الدقيقة المسببة للأمراض أخطر الملوثات البيولوجية في المياه المستعملة، خاصة في المياه المنزلية ومياه المستشفيات. تشمل هذه الكائنات البكتيريا والفيروسات والطفيليات .[33] يُستخدم قياس البكتيريا القولونية (Coliform bacteria) كمؤشر رئيسي للتلوث البرازي [34].

ب. الملوثات الناشئة(Emerging Contaminants) :

تشير الأبحاث الحديثة إلى وجود أنواع جديدة من الملوثات في المياه المستعملة ، وتشمل:

- **بقايا الأدوية والمضادات الحيوية** :تساهم هذه الملوثات في تنامي ظاهرة مقاومة مضادات الميكروبات (AMR)، وفقاً لتقرير UNDRR (2023) .[35]
- **المركبات الصيدلانية ومنتجات العناية الشخصية** :مثل حبوب منع الحمل والهرمونات ومستحضرات التجميل والعطور. [36]
- **الملوثات البلاستيكية الدقيقة** :وهي جسيمات بلاستيكية دقيقة ناتجة عن تحلل المنتجات البلاستيكية الأكبر. [37]

وتم تلخيص هذه الخصائص في المخطط التالي:



الشكل (3): *يوضح خصائص المياه المستعملة*

3. أهمية المياه المستعملة:

تتجلى أهمية المياه المستعملة بشكل خاص في المجال الزراعي، إذ يمكن استخدام المياه المعالجة في الري، مما يساهم في استدامة الإنتاج الزراعي وتقليل استهلاك المياه العذبة. [5] كما أن احتواء هذه المياه على بعض المغذيات الأساسية يعزز من خصوبة التربة ويقلل من الاعتماد على الأسمدة الكيميائية، وهو ما ينعكس إيجابًا على البيئة والاقتصاد. [38]

إضافة إلى ذلك، تلعب معالجة المياه المستعملة دورًا حاسمًا في حماية البيئة، حيث تساهم في الحد من تصريف الملوثات إلى الأوساط الطبيعية، مما يساعد على الحفاظ على التوازن البيئي والجودة المائية. [3] كما تساهم في الحد من المخاطر الصحية المرتبطة بالكائنات الدقيقة الممرضة والمواد السام. [39]

من ناحية أخرى، تمثل المياه المستعملة موردًا اقتصاديًا واعدًا، حيث يمكن استغلالها في العديد من القطاعات مثل الصناعة، وإنتاج الطاقة الحيوية، وإعادة الاستخدام الحضري، مما يعزز من مفهوم الاقتصاد الدائري ويحقق الاستدامة. [1] وبالتالي، فإن تثمين المياه المستعملة وإدماجها في استراتيجيات التسيير المائي يُعدّ خيارًا ضروريًا لمواجهة التحديات البيئية والمائية المعاصرة.

كما هو موضح في الصور التالية:

الشكل (4): توضيح لاستخدامات المياه المعالجة (الري، الصناعة)

4. أهداف معالجة واستغلال المياه المستعملة:

تسعى معالجة المياه المستعملة إلى تحقيق جملة من الأهداف الأساسية التي تندرج ضمن إطار الإدارة المستدامة للموارد المائية. ومن أبرز هذه الأهداف **الحد من التلوث البيئي**، حيث تسمح عمليات المعالجة بإزالة الملوثات العضوية والكيميائية والبيولوجية قبل تصريف المياه في الوسط الطبيعي. [40]

كما تهدف هذه العمليات إلى **تقليل المخاطر الصحية** الناتجة عن المياه الملوثة، من خلال القضاء على الكائنات الحية الدقيقة الممرضة والمواد السامة، وبالتالي حماية صحة الإنسان والمجتمع. [17] وفي نفس السياق، تُعدّ **إعادة استخدام المياه المعالجة** أحد الأهداف الرئيسية، وهو ما يساهم في ترشيد استهلاك المياه العذبة وتحقيق الأمن المائي. [41]

ومن الأهداف المهمة أيضًا **تثمين الموارد المسترجعة** من المياه المستعملة، حيث يمكن استغلال الحمأة لإنتاج الطاقة (كالبيوغاز) أو استخدام العناصر المغذية في تحسين التربة، مما يعزز من كفاءة استخدام الموارد ويقلل من النفايات. [42] إضافة إلى ذلك، تساهم معالجة المياه المستعملة في **دعم السياسات البيئية والتنموية** من خلال الامتثال للمعايير الدولية وتحقيق أهداف التنمية المستدامة المرتبطة بالمياه والصحة والبيئة.[43]

وعليه، فإن تطوير تقنيات فعالة لمعالجة المياه المستعملة يُعدّ ضرورة ملحة لمواجهة التحديات البيئية وضمان استغلال أمثل للموارد المائية في المستقبل.

5. أنواع الملوثات في المياه المستعملة:

تحتوي المياه المستعملة على مجموعة متنوعة من الملوثات التي تختلف في طبيعتها وتركيزها حسب مصدرها، ويمكن تصنيفها إلى عدة أنواع رئيسية هي:

- **الملوثات الفيزيائية:** وتشمل المواد الصلبة العالقة، العكارة، والرواسب، التي تؤثر على المظهر العام للمياه وتعيق عمليات المعالجة اللاحقة. [44]

- **الملوثات الكيميائية:** والتي تضم المركبات العضوية وغير العضوية مثل الزيوت، المنظفات، المبيدات، والمعادن الثقيلة (كالرصاص والزئبق والكادميوم)، وتُعدّ من أخطر الملوثات بسبب سميتها وقدرتها على التراكم في الكائنات الحية. [45] كما تشمل هذه الفئة أيضًا المغذيات مثل النيتروجين والفوسفور، التي قد تؤدي إلى ظاهرة التخثث (Eutrophication) في المسطحات المائية. [46]
- **الملوثات البيولوجية (الميكروبية)** : وتشمل البكتيريا، الفيروسات، الطفيليات، والفطريات، وهي مسؤولة عن نقل العديد من الأمراض المعدية، خاصة في حال غياب المعالجة الفعالة للمياه. [47]
- **الملوثات الناشئة(Emerging Contaminants)** : وهي مركبات حديثة نسبيًا مثل بقايا الأدوية، الهرمونات، ومستحضرات التجميل، والتي يصعب إزالتها باستخدام تقنيات المعالجة التقليدية، وتشكل تحديًا بيئيًا متزايدًا. [48]
- **الملوثات الحرارية:** الناتجة عن تصريف المياه الساخنة من الأنشطة الصناعية، والتي تؤثر على درجة حرارة الوسط المائي وتؤدي إلى اضطراب التوازن البيئي للكائنات الحية. [44]

6.تعريف وأضرار بعض المعادن والأيونات في المياه المستعملة:

تُعدّ المعادن الثقيلة وبعض الأيونات غير العضوية من أبرز مكونات التلوث في المياه المستعملة، نظرًا لخطورتها على البيئة وصحة الإنسان. ومن أهم هذه العناصر:

- **الكادميوم (Cadmium)** : معدن ثقيل سام يوجد غالبًا نتيجة الأنشطة الصناعية مثل الطلاء وصناعة البطاريات. يتميز بقدرته على التراكم في الجسم، مما قد يؤدي إلى أمراض خطيرة مثل تلف الكلى وهشاشة العظام. [49]
- **النيكل (Nickel)** : عنصر معدني يستخدم في الصناعات المعدنية والسبائك، ويمكن أن يسبب التعرض له حساسية جلدية ومشاكل تنفسية، كما يُعتبر سامًا عند تركيزات مرتفعة. [50]

- **الكروم (Chromium)** : يوجد في المياه المستعملة خاصة من الصناعات الجلدية، ويكون في حالتين رئيسيتين، حيث يُعد الكروم سداسي التكافؤ (Cr^{+6}) شديد السمية وقد يسبب أمراضًا سرطانية. [51]

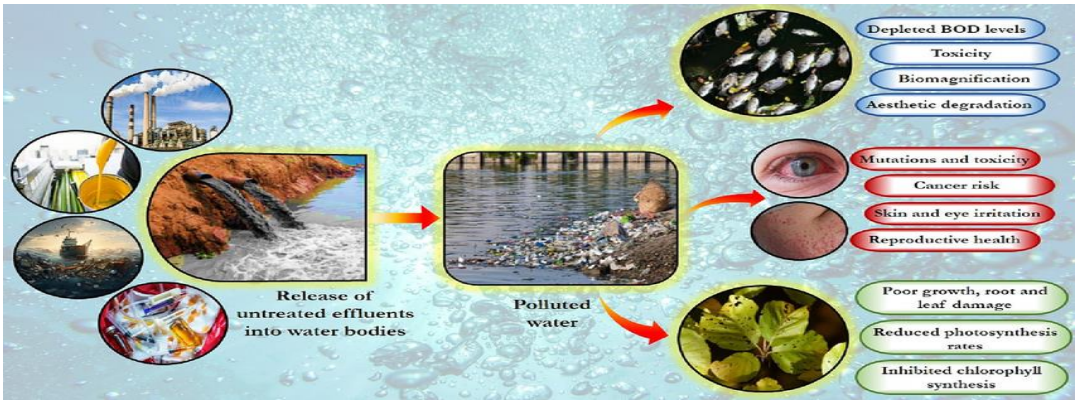
- **النحاس (Cuivre)** : معدن ضروري بكميات ضئيلة، لكنه يصبح سامًا عند ارتفاع تركيزه، حيث يمكن أن يؤدي إلى اضطرابات في الجهاز الهضمي وتلف الكبد [52]
- **الزنك (Zinc)** :عنصر أساسي للكائنات الحية، إلا أن زيادته في المياه قد تؤدي إلى تأثيرات سامة على الأحياء المائية واختلال التوازن البيئي. [53]
- **الرصاص (Plomb)** : من أخطر المعادن الثقيلة، حيث يسبب تأثيرات خطيرة على الجهاز العصبي خاصة لدى الأطفال، وقد يؤدي إلى مشاكل في النمو والتعلم. [49]
- **الحديد (Fer)** : معدن شائع في المياه، لا يُعد سامًا بشكل كبير، لكنه يؤثر على لون وطعم المياه وقد يسبب ترسبات تؤثر على الأنظمة المائية. [50]
- **الكبريتات (Sulfate)** : أيون غير عضوي يوجد بشكل طبيعي أو نتيجة تصريف صناعي، وقد يسبب مشاكل في الجهاز الهضمي عند تركيزات مرتفعة. [51]
- **الكلوريد (Chlorure)** : من الأيونات الشائعة في المياه، وزيادته تؤدي إلى ملوحة المياه وتآكل الأنابيب، كما تؤثر على صلاحية المياه للاستخدام الزراعي. [52]

بصفة عامة، فإن وجود هذه العناصر في المياه المستعملة بكميات مرتفعة يشكل خطرًا بيئيًا وصحيًا، مما يستدعي معالجتها باستخدام تقنيات فعالة قبل إعادة استخدامها أو تصريفها في البيئة.

كما توضحه الاشكال أسفله:

الشكل (5): المعادن الثقيلة وتأثيرها على الإنسان

الشكل (6): انتقال المعادن الثقيلة في السلسلة



الشكل (7): تأثير الملوثات على جودة المياه والكائنات الحية

7. معالجة المياه المستعملة بالطرق التقليدية:

❖ دراسة حالة لمحطة معالجة كوينين (الوادي – الجزائر):

تمثل معالجة المياه المستعملة عملية حيوية تهدف إلى استعادة جودة المياه من خلال إزالة الملوثات والحفاظ على المغذيات الدقيقة فيها، وذلك قبل إعادة إطلاقها إلى البيئة أو إعادة استخدامها في أغراض مختلفة. [54]

وفي إطار هذه الدراسة، تم اعتماد دراسة حالة تطبيقية لمحطة معالجة كوينين الواقعة في منطقة الوادي جنوب شرق الجزائر. [55]

1.7. المعالجة التقليدية:

يمكن تقسيم معالجة المياه المستعملة التقليدية إلى أربعة مستويات رئيسية متتالية، يهدف كل منها إلى إزالة نوع محدد من الملوثات. [57,56]

أ. المعالجة الأولية:

تمثل المعالجة الأولية المرحلة التمهيدية في عملية معالجة المياه المستعملة، وتهدف إلى إزالة المواد الصلبة الكبيرة، والمعادن، والدهون والزيوت. [54]

تشمل هذه المرحلة عمليات إزالة الحصى والنفايات الكبيرة مثل الخرق والعصي والحطام العائم. [58]

على الرغم من أن المعالجة الأولية لا تحقق إزالة كبيرة للمواد العضوية الذائبة، إلا أنها تعتبر شرطاً أساسياً لنجاح العمليات اللاحقة.[59]

الشكل (8): مرحلة الغربلة

ب. المعالجة الأولية الثانوية:

بعد الانتهاء من مرحلة المعالجة الأولية، تنتقل المياه إلى نظام المعالجة الأولية الثانوية، الذي يفصل المواد الصلبة فيزيائياً عبر عمليات الغربلة وإزالة الحصى والترسيب.[54] تعتمد هذه المرحلة بشكل أساسي على خزانات الترسيب الابتدائية(PST) ، حيث تسمح بترسيب المواد الصلبة العالقة التي تتراوح كثافتها النوعية بين 1.1 و1.2. [60] تتم في هذه المرحلة إزالة ما بين 50–70% من المواد الصلبة العالقة(TSS) ، وما بين 25–40% من الطلب البيوكيميائي للأكسجين (BOD_5) .[61]

الشكل (9): توضح لعملية الترسيب

ج. المعالجة الثانوية:

تمثل المعالجة الثانوية القلب البيولوجي لمحطات المعالجة التقليدية، حيث تعتمد على الكائنات الحية الدقيقة لتحليل المواد العضوية الذائبة والعالقة. [56] تتضمن التقنيات الرئيسية المستخدمة في هذه المرحلة:

- **عملية الحمأة المنشطة (ASP)** :تعتمد على الهضم الهوائي للمواد العضوية بواسطة البكتيريا، حيث يتم تهوية المياه في أحواض التهوية لتزويد الكائنات الحية الدقيقة بالأكسجين. تصل نسبة إزالة BOD_5 إلى أكثر من 85–90% في الظروف التشغيلية المثلى. [62]
- **المرشحات التقاطرية (Trickling Filters)** : تقنية من نوع النمو الملتصق ، حيث تتدفق المياه المستعملة عبر طبقة ثابتة من وسائط الترشيح المغطاة بغشاء حيوي.[63]
- **أحواض التهوية (Aerated Lagoons)** : أحواض ضحلة يتم فيها إدخال الأكسجين بواسطة مهويات ميكانيكية أو هواء منفوخ لتحفيز النشاط البكتيري [64]

الشكل (10): *توضح عملية المعالجة باستخدام احواض التهوية*

د. المعالجة الثالثية:

تمثل المعالجة الثالثية مرحلة متقدمة تهدف إلى رفع جودة المياه المعالجة إلى مستويات تسمح بإعادة استخدامها. تشمل عمليات الترشيح والتطهير (بالكلور أو الأشعة فوق البنفسجية أو الأوزون) وإزالة المغذيات (النيتروجين والفسفور). [65]

2.7. أداء المحطة – تقييم كفاءة الإزالة:

أظهرت نتائج الدراسة الشهرية للمعلمات التالية: المواد الصلبة العالقة(SS) ، الطلب الكيميائي للأكسجين (COD)، والطلب البيوكيميائي للأكسجين (BOD_5) النتائج التالية. [55]

1) معدلات الإزالة المحققة:

- **الطلب البيوكيميائي للأكسجين**بلغ **(BOD_5)** : متوسط نسبة الإزالة 77.76%.
- **الطلب الكيميائي للأكسجين (COD)** : بلغ متوسط نسبة الإزالة 74.10%.
- **المواد الصلبة العالقة (SS)** : بلغ متوسط نسبة الإزالة 80%. [55]

2) مؤشر القدرة على المعالجة البيولوجية نسبة COD/BOD_5 :

تم حساب متوسط نسبة COD/BOD_5 لتقييم قابلية المياه للمعالجة البيولوجية. أشارت النتائج إلى أن هذه النسبة تراوحت بين 1.5 و2.5، مما يعكس قابلية جيدة للمياه المستعملة للمعالجة البيولوجية في محطة كوينين. [55]

8. الطرق الحديثة في معالجة المياه المستعملة:

مع تزايد الضغوط على الموارد المائية العالمية وتشديد المعايير البيئية لتصريف المياه المعالجة، ظهرت الحاجة إلى تطوير تقنيات معالجة تتجاوز قدرات الطرق التقليدية. [54] تتميز الطرق الحديثة في معالجة المياه المستعملة

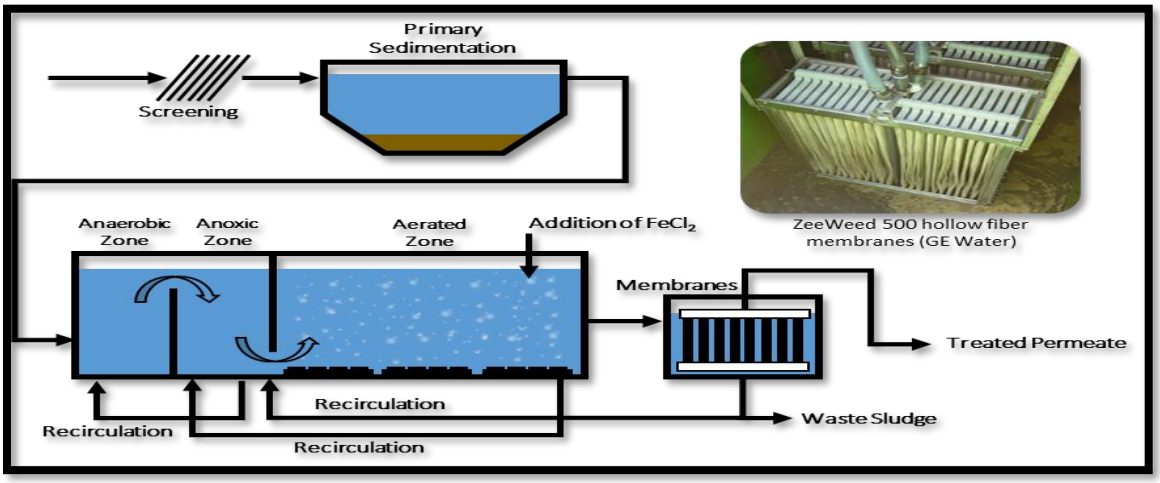
بكفاءة أعلى في إزالة الملوثات، واستهلاك أقل للمساحات، وقدرة على معالجة الملوثات الناشئة (Emerging Contaminants)التي لا تستطيع الطرق التقليدية إزالتها بشكل كافٍ. [12,11].

1.8. عمليات الأغشية:

أ. المفاعلات الحيوية الغشائية (MBR):

تجمع تقنية MBR بين المعالجة البيولوجية (الحمأة المنشطة) وفصل الأغشية (الترشيح الغشائي) في وحدة واحدة متكاملة.[6] تستخدم هذه التقنية أغشية غروية دقيقة أو أغشية فوق ترشيح بدلاً من أحواض الترسيب الثانوية التقليدية. [7]

- **المميزات** :جودة عالية جداً للمياه المعالجة، مساحة أقل بنسبة 30–50% مقارنة بالمحطات التقليدية، إنتاج حمأة أقل. [66,6]
- **العيوب** :تكلفة استثمارية وتشغيلية عالية، التلوث الغشائي الذي يتطلب تنظيفاً دورياً. [10,7]

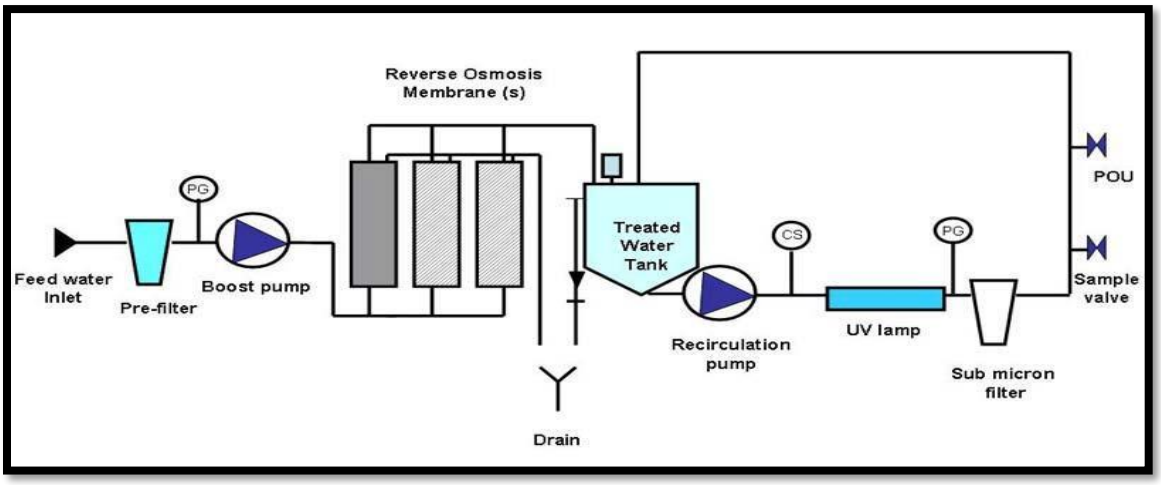


الشكل (11): *يوضح عملية المعالجة باستخدام المفاعلات الحيوية الغشائية*

ب. التناضح العكسي:

يعتبر التناضح العكسي من أكثر تقنيات الترشيح الغشائي تقدماً، حيث يستخدم أغشية شبه نافذة تسمح بمرور جزيئات الماء فقط وتمنع مرور الأملاح الذائبة والمعادن الثقيلة والمواد العضوية الدقيقة. [8]

- **المميزات** :إزالة تصل إلى 99% من الأملاح الكلية الذائبة (TDS) والملوثات الدقيقة. [9]
- **العيوب** :استهلاك عالي للطاقة، الحاجة إلى معالجة أولية متقدمة لحماية الأغشية، مشكلة المياه الراجعة التي تحتاج إلى معالجة خاصة. [67,8]



الشكل (12): *يوضح عملية المعالجة باستخدام التناضح العكسي*

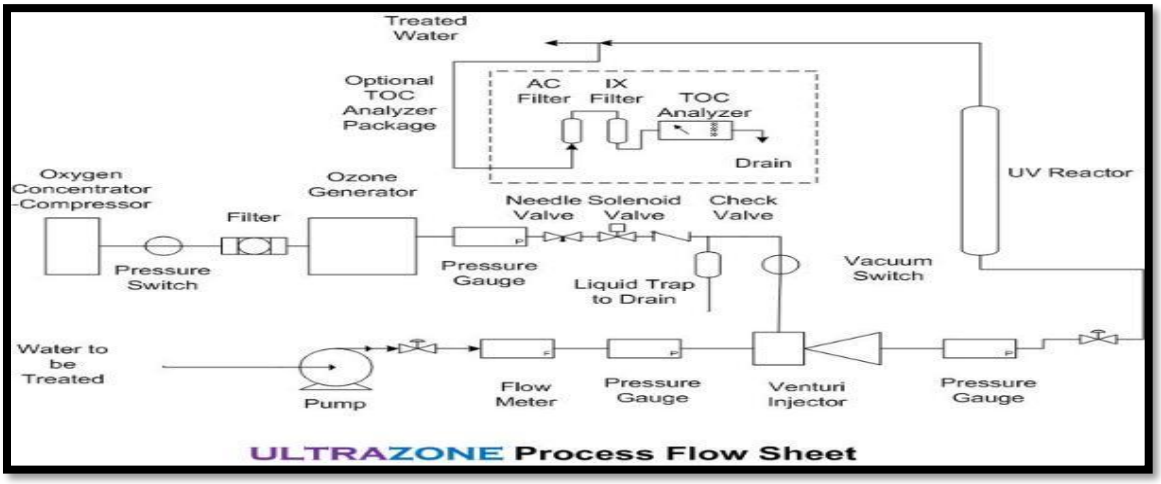
2.8.عمليات الأكسدة المتقدمة:

تعتمد عمليات الأكسدة المتقدمة على توليد جذور الهيدروكسيل(•OH) ، وهي من أقوى العوامل المؤكسدة المعروفة (جهد أكسدة 2.8 فولت)، لقدرتها على أكسدة وتفكيك الملوثات العضوية المقاومة إلى جزيئات بسيطة غير ضارة. [69,68]

أ. الأوزون:

يستخدم غاز الأوزون كمادة مؤكسدة قوية لتكسير الملوثات العضوية وتطهير المياه من الكائنات الحية الدقيقة. [70]

- **المميزات** :يزيل الروائح والألوان بشكل فعال، لا يترك بقايا كيميائية ضارة. [71,68]



الشكل (13): يوضح عملية المعالجة باستخدام الاوزون

ب. الأكسدة الضوئية:

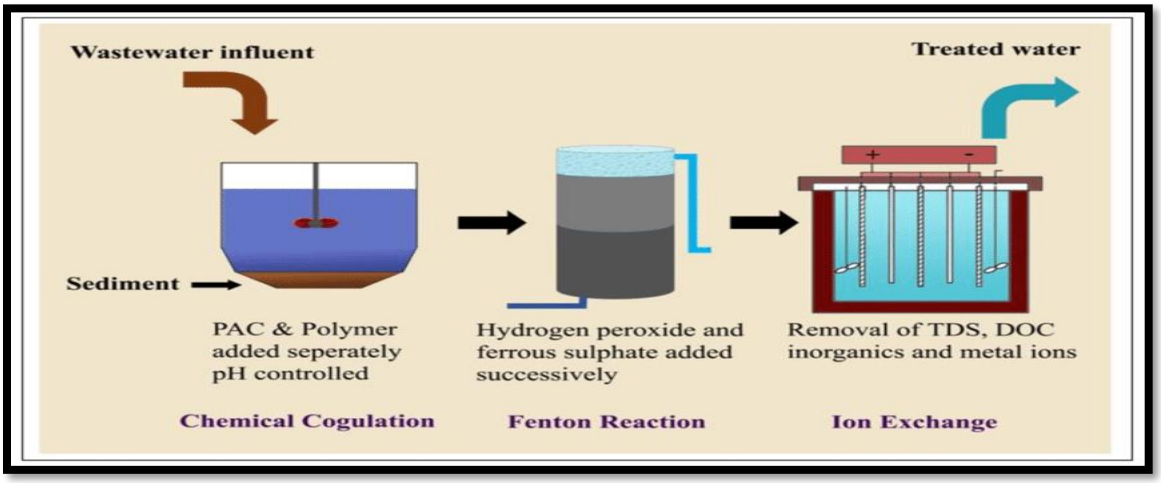
تستخدم أشعة فوق البنفسجية (UV) مع محفز ضوئي مثل ثنائي أكسيد التيتانيوم (TiO_2) لتوليد جذور الهيدروكسيل. [72,73]

- **المميزات** :فعال في إزالة بقايا الأدوية والمبيدات والمركبات الصيدلانية (PPCPs). [72].
- **العيوب** :ارتفاع تكلفة المحفزات الضوئية، الحاجة إلى وحدات UV عالية الطاقة. [69]

ج. عملية فنتون (Fenton) :

تعتمد على تفاعل بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) مع ايونات الحديد الثنائي (Fe^{2+}) لتوليد جذور الهيدروكسيل في وسط حمضي. [73]

- **المميزات** :فعالة لمعالجة المياه الصناعية عالية التلوث، تكلفة تشغيل منخفضة نسبياً. [74,73]



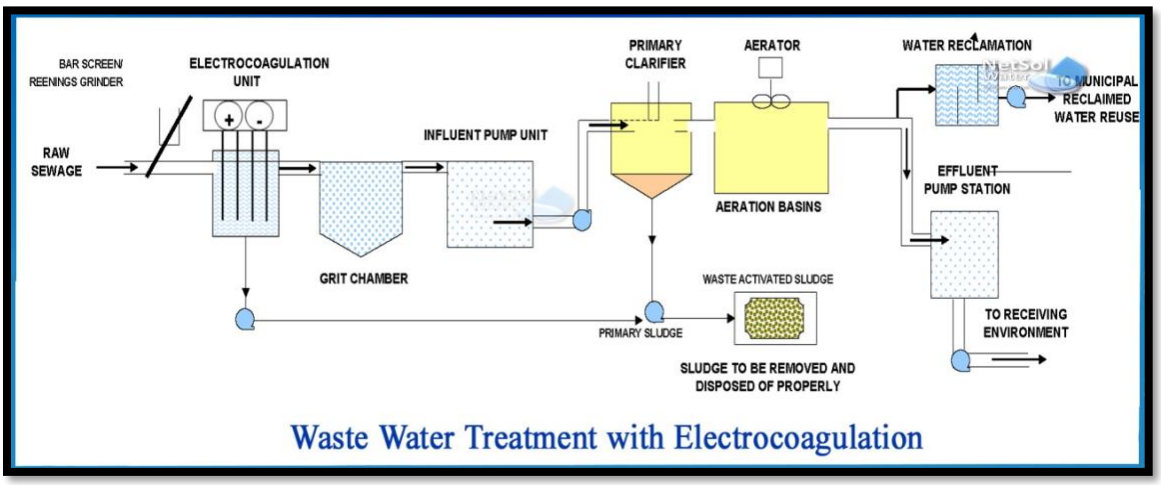
الشكل (14): يوضح عملية المعالجة باستخدام عملية فنتون

3.8.المعالجة الكهروكيميائية :

أ. التخثير الكهربائي:

تعتمد على تمرير تيار كهربائي بين أقطاب معدنية (عادة ألومنيوم أو حديد) داخل المياه المستعملة، مما يؤدي إلى إطلاق أيونات معدنية تعمل كمخثرات لترسيب المواد العالقة والملوثات. [76,75]

- **المميزات** :لا يحتاج إلى إضافة مواد كيميائية خارجية، إنتاج حمأة قليلة، سهولة التشغيل. [76,75]

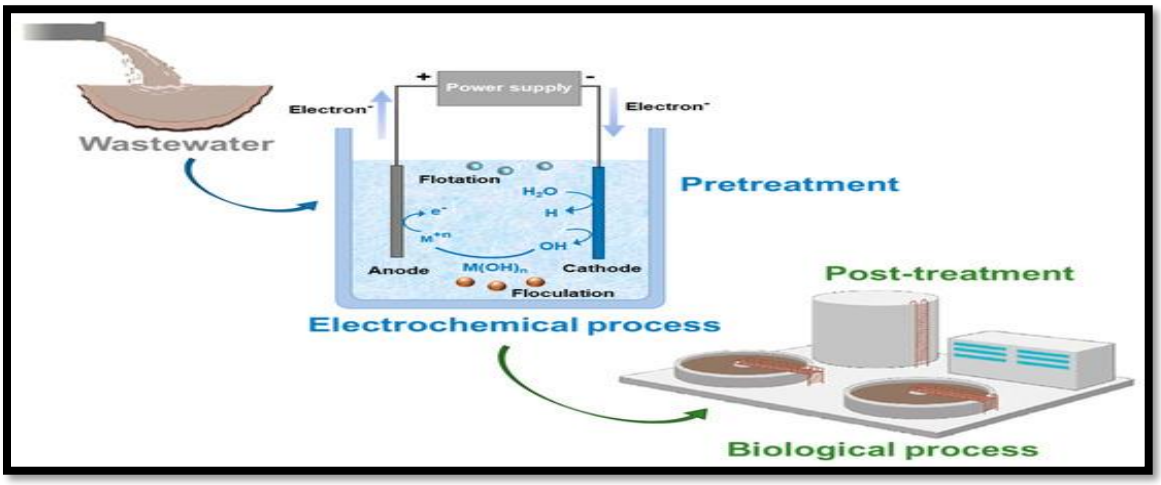


الشكل (15): *رسم توضيحي لعملية التخثير*

ب. الأكسدة الأنودية:

يتم فيها تمرير المياه المستعملة عبر خلية كهربائية ذات أقطاب (عادة ألماس المشبع بالبورونBDD) لتوليد جذور الهيدروكسيل على سطح الأنود. [77]

- **المميزات** :قدرة عالية على أكسدة الملوثات العضوية المقاومة. [77]



الشكل (16): رسم توضيحي لعملية الاكسدة الانودية

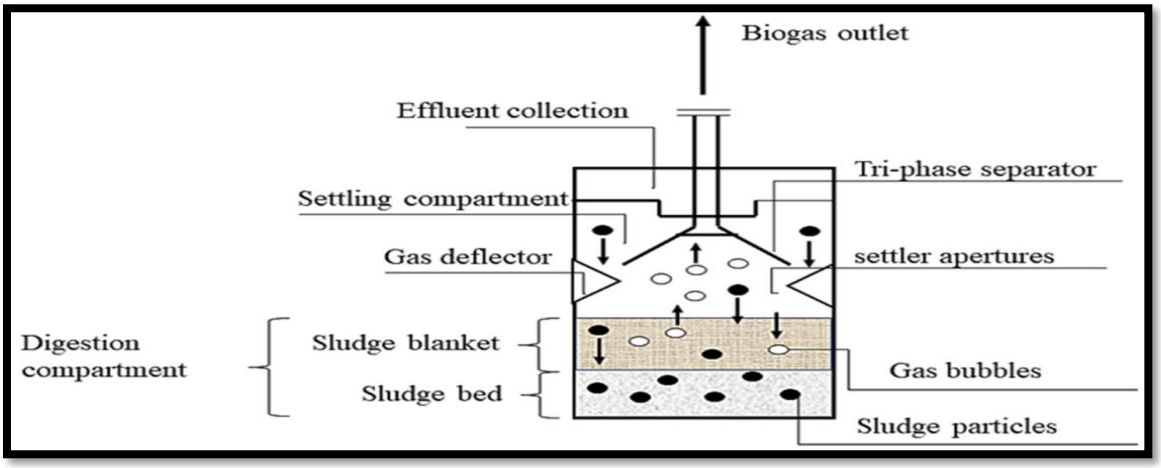
4.8. العمليات اللاهوائية المتقدمة :

تستخدم الكائنات الحية الدقيقة اللاهوائية لتحليل الملوثات العضوية في غياب الأكسجين، مع إنتاج غاز الميثان (CH_4)الذي يمكن استخدامه كمصدر للطاقة المتجددة. [79,78]

أ. مفاعل طبقة الحمأة اللاهوائية المتدفقة لأعلى (UASB) :

يعتبر من أكثر التقنيات اللاهوائية كفاءة، حيث تتشكل طبقة من الحمأة المحببة (Granular Sludge) في قاع المفاعل، وتمر المياه لأعلى عبرها. [80]

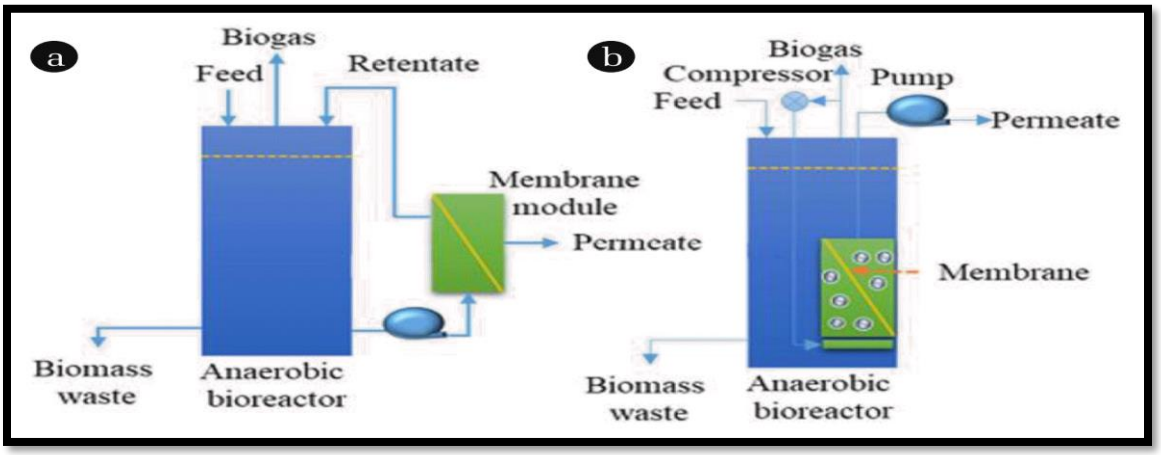
- **المميزات** :استهلاك طاقة منخفض جداً، إنتاج حمأة قليل، توليد طاقة من غاز الميثان. [80,79]



الشكل (17): رسم توضيحي لإحدى العمليات اللاهوائية المتقدمة باستخدام مفاعل طبقة الحمأة اللاهوائية المتدفقة لأعلى (UASB)

ب. المفاعلات الحيوية الغشائية اللاهوائية (ANMBR) :

تجمع بين تقنية UASB وعمليات الأغشية (MBR) لتحقيق فصل كامل للحمأة وإنتاج مياه عالية الجودة مع استرداد للطاقة.[81]



الشكل (18): رسم توضيحي لإحدى العمليات اللاهوائية المتقدمة باستخدام المفاعلات الحيوية الغشائية اللاهوائية(ANMBR)

5.8.المعالجة باستخدام المواد النانوية :

تستفيد هذه التقنيات من الخصائص الفريدة للمواد النانوية (كثافة السطح العالية، التفاعلية الكيميائية العالية) لإزالة الملوثات. [82.81]

أ. جسيمات أكسيد الحديد النانوية:

تستخدم لإزالة المعادن الثقيلة (الرصاص والزرنيخ والكادميوم) والفسفور والملوثات العضوية من المياه. [82,81]

ب. الأنابيب النانوية الكربونية:

تمتلك مساحة سطحية عالية جداً وقدرة استثنائية على امتصاص الملوثات العضوية والمركبات الصيدلانية. [81,82]

9. مقارنة بين الطرق التقليدية والحديثة:

الجدول (1): مقارنة بين الطرق التقليدية والحديثة للمعالجة

الخاصية	الطرق التقليدية	الطرق الحديثة
كفاءة إزالة BOD/COD	75–90%	95–99% [57]
إزالة الملوثات الناشئة	ضعيفة	عالية جدا [18]
المساحة المطلوبة	كبيرة	صغيرة (حتى 50% أقل) [57]
استهلاك الطاقة	متوسط	مرتفع في RO و AOPS [61]
انتاج الحمأة	مرتفع	منخفض [60]
التكلفة الاستثمارية	منخفضة	مرتفعة [58]

10.معايير جودة المياه :

تعتبر المعايير والقيم الحدية لجودة المياه المعالجة أداة أساسية لضمان حماية الصحة العامة والبيئة عند إعادة استخدام المياه المستعملة أو تصريفها [83]. تختلف هذه القيم باختلاف الغرض من إعادة الاستخدام (ري زراعي، تصريف في المسطحات المائية، إعادة تغذية طبقات المياه الجوفية، أو استعمالات صناعية)، كما تتباين بين الهيئات والمنظمات الدولية [84]. تستند هذه الورقة إلى المعايير الصادرة عن منظمة الصحة العالمية(WHO) ، ومنظمة الأغذية والزراعة(FAO) ، ووكالة حماية البيئة الأمريكية(US EPA) ، بالإضافة إلى معايير دولية أخرى مرجعية. [85, 86]

1.10. المعايير الدولية لجودة المياه:

الجدول (2): المعايير الدولية لجودة المياه [86]

الخصائص	المعيار (OMS)
PH	8.5-6.5
DBO_5	<30mg/l
DCO	<125-90 mg/l
MES	<20mg/l
NH^+_4	<0.5mg/l
NO_2	<1mg/l
NO_3	<1mg/l
P_2O_5	<2mg/l
T°	<30°C
اللون	عديم اللون
الرائحة	عديم الرائحة

2.10. معايير المعادن الثقيلة لجودة المياه:

الجدول (3): المعايير الدولية للحد المسموح به من المعادن

المعادن الثقيلة	الحد المسموح به (mg/l)
الرصاص (Pb)	0,2- 0,1
النيكل(Ni)	1-0,1
الكادميوم(Cd)	0,05-0,01
الزرنيخ(As)	0,05-0,01
الزئبق(Hg)	0,002
الكروم الكلي(Cr)	1-0,1
النحاس(Cu)	1-0,2
الزنك(Zn)	0,5-0,2

11.الخاتمة:

في ختام هذا الفصل، تبين أن المياه المستعملة تمثل مزيجا معقدا من الملوثات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، تختلف باختلاف مصادرها. ورغم كونها مهدداً للبيئة والصحة العامة، فإنها تشكل مورداً استراتيجياً يمكن إعادة استخدامه في الزراعة والصناعة، خاصة في مناطق ندرة المياه كالجزائر.

كما أظهرت دراسة حالة محطة معالجة كوينين أن الطرق التقليدية تحقق كفاءة مقبولة في إزالة الملوثات العضوية (75–80%)، لكنها تبقى محدودة في معالجة الملوثات الناشئة، وتستهلك مساحات كبيرة وتنتج حمأة كثيرة.

أما الطرق الحديثة – كالأغشية، والأكسدة المتقدمة، والتقنيات الكهروكيميائية والنانوية – فتتميز بكفاءة تصل إلى 99%، لكن تحديات التكلفة العالية واستهلاك الطاقة تعيق انتشارها.

وعليه، تبرز معالجة المياه المستعملة باستخدام مواد طبيعية بواسطة تقنية الامتزاز في دراستنا كحل واعد يجمع بين الكفاءة والاقتصاد والصداقة البيئية، وهو ما سيتناوله الفصل الثاني والثالث بالتفصيل.

الجزء التطبيقي

الفصل الثاني

1.مقدمة :

يهدف هذا الفصل إلى تقديم ووصف جميع المواد والتقنيات التي استخدمت في دراسة البحوث التطبيقية لأداء المواد الطبيعية (النباتية والطينية) في معالجة مياه الصرف الصحي. ويحتوي الفصل أيضاً على وصف مفصل لأصول وأساليب تحضير المواد المازة، وبروتوكول العمل في عملية التحضير والمعالجة. بالإضافة إلى تقديم وصف مفصل لأساليب التحليل الكيميائي والفيزيائي للعينات التي تم الحصول عليها.

2.المواد المستعملة :

- ✓ **المادة النباتية:**

هي المور ينجا (Moringa)، شجرة سريعة النمو، بذورها مخثر طبيعي قابل للتحلل الحيوي، لا تغير pH ولا تترك بقايا سامة. [16,15]

- ✓ **المادة الطينية:**

هي عبارة على مادة محلية موجودة في الطبيعة على شكل صخور طينية (حبيبات أقل من2µm من معادن الطين الطباقية. المكون أساسا من السميكتيت (المونتموريلونيت))، تستخدم على نطاق واسع. [13,14]

3.الأدوات والمواد المستعملة:

الجدول (4): يوضح الأدوات والمواد المستعملة

الأدوات		المواد
– 4 بيشرات حجم 100مل	– غربال	– الماء المقطر
– أنبوب اختبار حجم 100مل	– بيشر حجم 200مل	– الماء المستعمل
– هاون	– ماصة مدرجة	– المواد المازة
– ميزان	– انابيب حجم 10مل	
– مخلاط مغناطيسي	– ملعقة	
– زجاجة ساعة	– أوراق ترشيح	

4.تحضير المستحلب:

اختيار تحضير مستحلب المورينجا اعتمد على نتائج قياس الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO) خلال عملية المعالجة، حيث سُجلت قيم مرتفعة للبذور الخام، ثم انخفضت قيم DCO بعد تحضير المستحلب واستعماله خلال مراحل المعالجة، مما يدل على فعاليته في تقليل الحمل العضوي وتحسين خصائص المياه المستعملة.

وقد مرّ تحضير المستحلب بعدة مراحل تمثلت في طحن بذور المور ينجا وغربلتها للحصول على مسحوق ناعما، بعدها خلط المسحوق بكمية 1غ بالماء المقطر 100مل وتحريك المزيج للحصول على مستحلب متجانس قبل استعماله في عملية المعالجة.

الشكل (19): *بذور المور ينجا*

الشكل (20): مخطط يمثل خطوات تحضير المستحلب النباتي

5.تحظير المادة الطينية

خضعت العينة لتحليل الأشعة تحت الحمراء بتحويل فوريه (FTIR) وتحليل حيود الأشعة السينية (DRX) قبل عملية المعالجة، وذلك بهدف تحديد المجموعات الوظيفية والبنية البلورية للمادة الطينية قبل استعماله.

الشكل (21): *يوضح تحليل FTIR وDRX للمادة الطينية*

6.طريقة تطبيق المعالجة:

1.6.إحضار الماء المستعمل وترشيحه قبل الدراسة:

تم اختيار محطة التطهير بكونين الوادي كمصدر رئيسي للمياه المستعملة، وهي مياه مختلطة (منزلية مع صناعية خفيفة). جُمعت العينات من قناة التفريغ الرئيسية قبل أي معالجة.، قصد دراستها ضمن هذه العمل. بعد ذلك، تم ترشيحه لإزالة المواد الصلبة والشوائب العالقة، وذلك باستخدام ورق ترشيح مخبري، بهدف الحصول على عينة أكثر تجانساً تمثل المياه المستعملة بدقة وتحسين موثوقية النتائج خلال مراحل المعالجة.

قبل الترشيح

خلال الترشيح

بعد الترشيح

الشكل (22): *يوضح ترشيح الماء المستعمل*

2.6.تطبيق المعالجة باستعمال المادة الطينية :

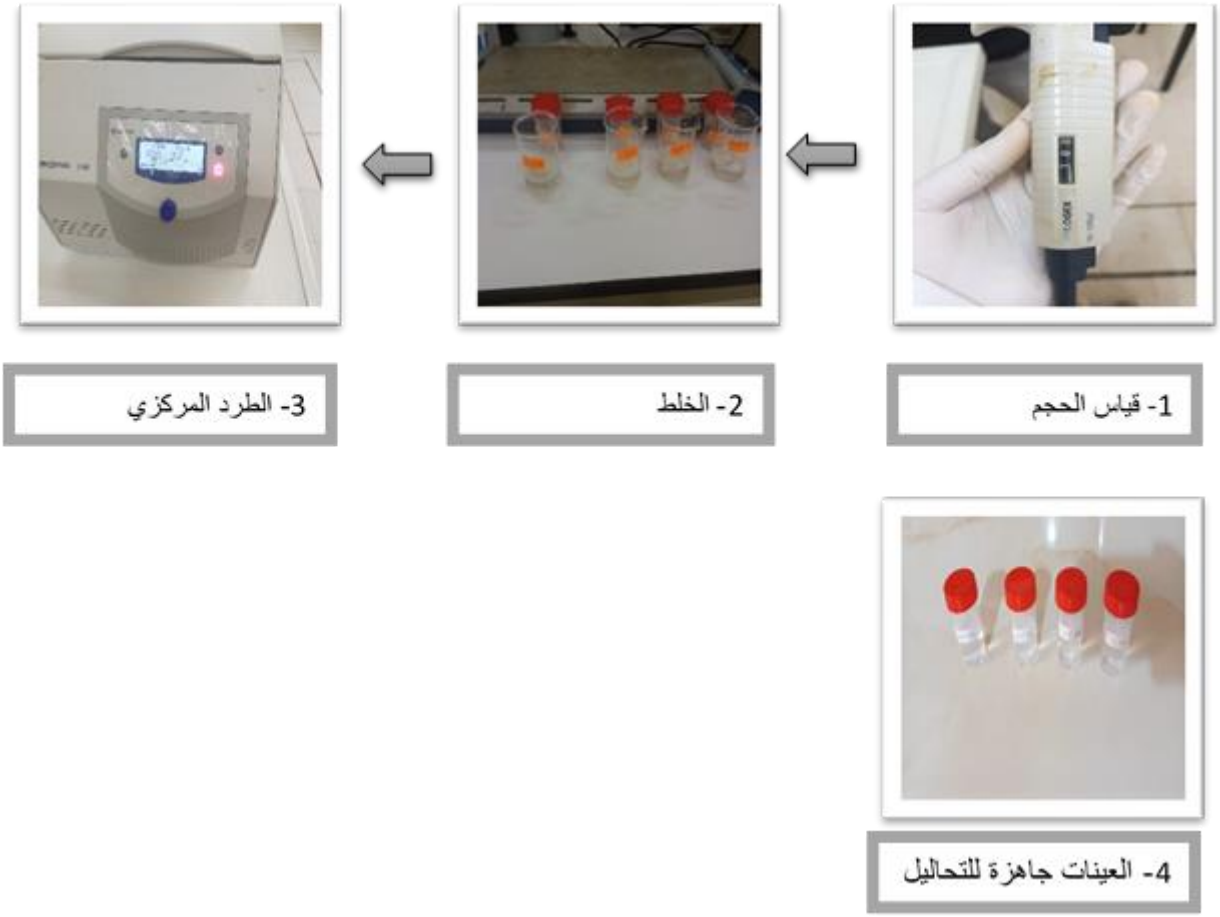
بعد غسل الحجر الطيني وتجفيفه قمنا بطحنه وغربلته للحصول على مسحوق ناعما، بعدها تم وزن أربع كتل مختلفة قدرها 5، 10، 20 و25 مغ. بعد ذلك، أضيفت كل كتلة على حدة إلى عينات من المياه المستعملة بحجم 25 مل لكل عينة، ثم خضعت العينات لعملية تحريك مستمر لمدة 30 دقيقة.

بعد انتهاء مرحلة التحريك، تُركت العينات في حالة سكون من أجل السماح بترسيب الجسيمات العالقة، ثم أُجريت لها عملية طرد مركزي لمدة 5 دقائق لفصل المادة الصلبة عن الماء المعالج، ثم وضعها في علب لتصبح جاهزة للتحاليل.

الشكل (23): *مخطط يمثل خطوات المعالجة بالمادة الطينية*

3.6.تطبيق المعالجة باستعمال المستحلب النباتي

أضيفت جرعات مختلفة (0.25، 0.5، 1 و1.5 مل) إلى عينات ماء بحجم 25 مل. بعد ذلك حُرّكت العينات لمدة 30 دقيقة لضمان تجانس المزيج، ثم تُركت للترسيب وأُجري لها طرد مركزي لمدة 5 دقائق لفصل الرواسب عن الماء المعالج، ثم وضعها في علب لتصبح جاهزة للتحاليل.



الشكل (24): *مخطط يمثل خطوات المعالجة بالمستحلب النباتي*

7. التحاليل الفيزيائية الكيميائية:

1.7.الأس الهيدروجيني (pH) :

✓ خطوات القياس:

- التحقق من توازن الجهاز.
- وضع الالكترود في العينة ونتركه إلى أن يثبت.
- بعد الاستقرار نقرأ القيمة الظاهرة على الجهاز.

- غسل الالكترود بعد كل تجربة بالماء المقطر.

2.7.قياس الناقلية والملوحة :

✓ خطوات القياس:

- وضع الالكترود في العينة ونتركه إلى أن يثبت ثم نكتب النتيجة بوحدة ms/cm.
- نضغط على الزر الذي يقوم بتحويل القراءة الناقلية (CE) الى درجة الملوحة.
- نقرأ النتيجة التي تعبر على درجة الملوحة بوحدة (mg/l).

3.7.قياس درجة الحرارة:

الجهاز المستعمل في قياس الناقلية والملوحة هو نفس الجهاز المستعمل في قياس ال PH ودرجة الحرارة.

- نقرأ درجة الحرارة الموجودة على نفس الجهاز.

الشكل (25): جهاز متعدد القياسات (الملوحة .T.CE . PH)

4.7.قياس الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO):

✓ خطوات القياس:

- نقوم برج الأنبوب اختبار (به محلول محول الاختبار) جيدا.
- نضيف عينة من الماء قبل وبعد عملية المعالجة.
- نرج المزيج ونتركه يرتاح مدة 15 دقيقة.
- نضع الأنبوب في Thermo réacteur مدة 2 سا في ($148\ ^0C$).
- نترك الأنبوب يبرد في ($20 - 18\ ^0C$).
- نقوم بالقراءة في Spectrophotomètre .

Thermo réacteur

Spectrophotomètre

الشكل (26): *الأجهزة المستعملة في قياس DCO*

5.7.قياس الطلب الحيوي للأوكسجين(DBO_5) :

✓ خطوات القياس:

- نضع عينة من الماء المعالج في قارورة الجهاز عاتمة اللون نضيف الرجاج المغناطيسي.
- نضع الحامل لبلاستيكي في القارورة ونضع بداخله من 2 حبات من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH).
- نغلق القارورة وذلك بوضع جهاز رقمي بعد ضبطه (la gamme 0−250 mg/l).
- توضع العينة في الثلاجة الخاصة بها مع ضبط درجة الحرارة (20^0C) ونقوم بقراءتها بعد مرور 5 ايام.

الشكل (27): *توضيح لعملية قياس DBO_5*

6.7. تحليل المعادن الثقيلة والأيونات للمياه قبل وبعد المعالجة:

قمنا بقياس تركيزات العناصر والمعادن المستهدفة (الحديد، الزنك، النحاس، الكلوريد، والسيانيد) في العينات المائية بواسطة تقنية الطيف الضوئي للمجال المرئي، وذلك باستخدام أطقم التحليل الرقمية الجاهزة (Hach LCK Cuvette Tests) الموضحة في الشكل (28) ادناه.

تعتمد الطريقة على إضافة حجم محدد من العينة داخل أنابيب تحتوي على كواشف كيميائية مسبقة، وبعد تشكل المعقد الملون قمنا بإدخال الأنبوب في جهاز المطياف الضوئي الذي يتعرف تلقائيا على نوع التحليل عبر نظام الباركود ويضبط الطول الموجي، ثم يقيس الامتصاص الضوئي ويحوله مباشرة إلى تراكيز بوحدة (mg/L) استناداً إلى قانون بير–لامبرت (Loi de Beer–Lambert) التالي:

$$A = \varepsilon \cdot L \cdot C$$

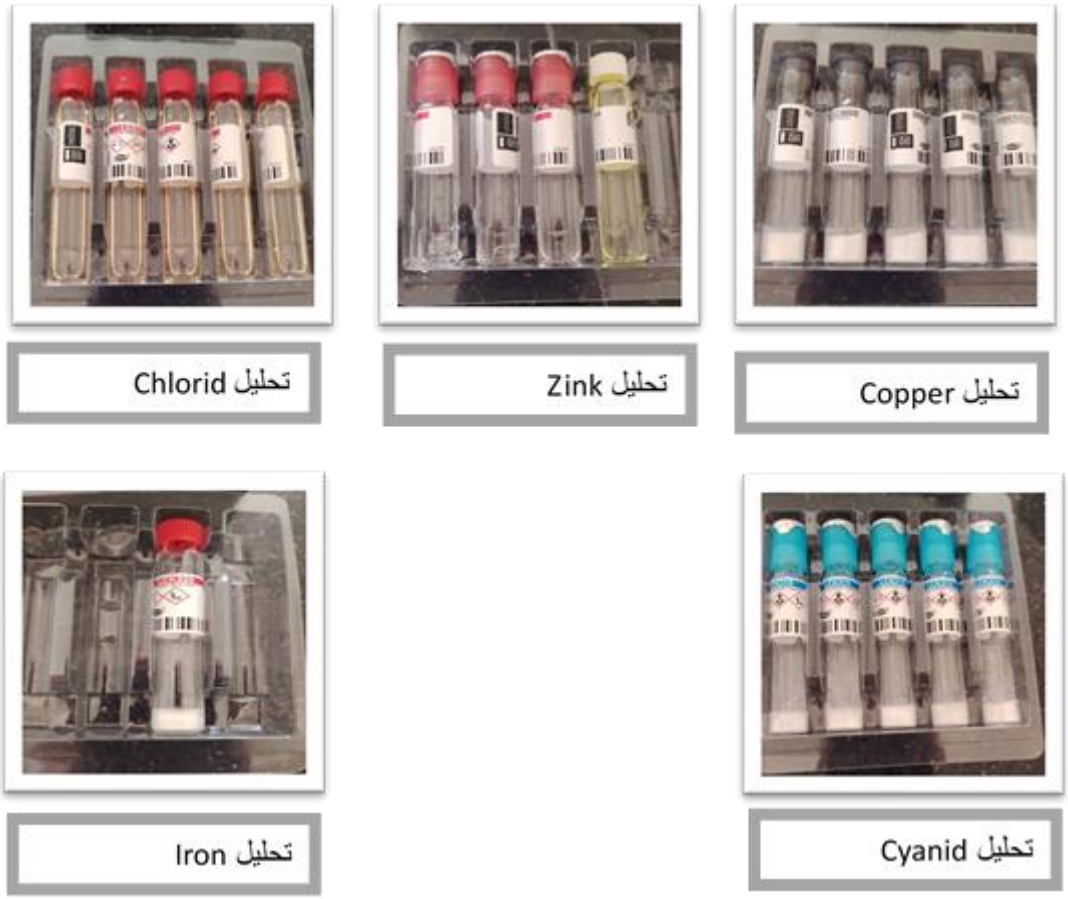
حيث :

A : الامتصاصية المقاسة (Absorbance).

C : تركيز العنصر في المحلول المائي.

ε : معامل الإنطفاء.

L : عرض الكوفيت.



الشكل (28): *توضيح لعملية إجراء تحليل الامتصاص*

8. ظروف التشغيل التجريبية

أُجريت تجارب المعالجة تحت ظروف تشغيل مختلفة لدراسة تأثيرها على فعالية إزالة الملوثات من المياه المستعملة. تم تغيير زمن التماس بين المادة المعالجة والعينة على مراحل زمنية مختلفة، مع إجراء جميع التجارب داخل المخبر (الوسط الداخلي).

كما وُضعت العينات في الظروف البيئية المحيطة (الوسط الخارجي) خلال فترة المعالجة بهدف تقييم تأثيرها على كفاءة العملية. وتم الحفاظ على نفس شروط التحضير والتطبيق في جميع التجارب لضمان دقة النتائج وقابليتها للمقارنة.

الفصل الثالث

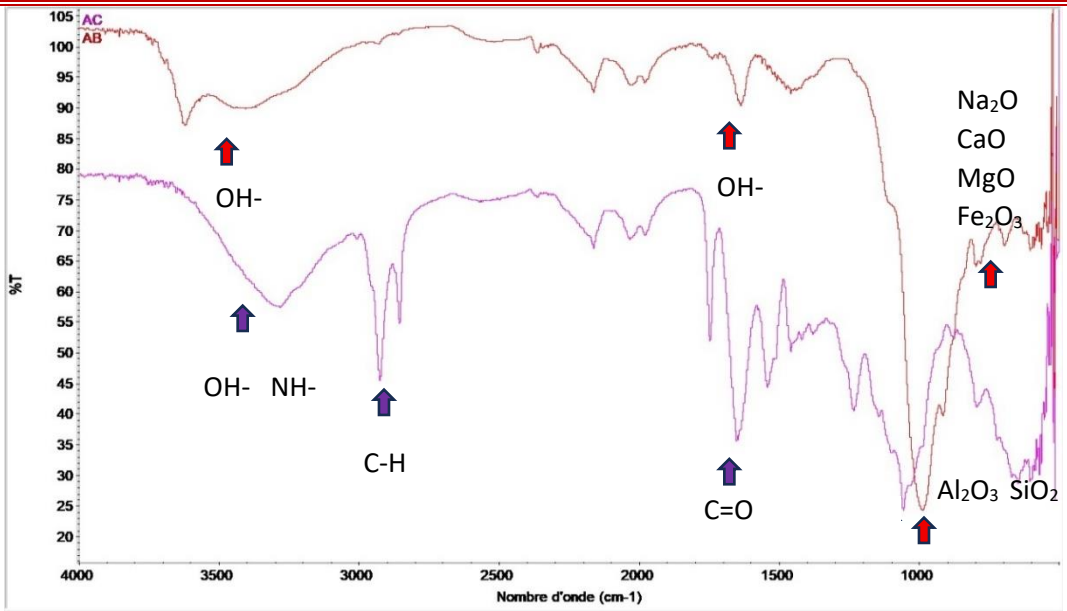
1.مقدمة الفصل:

يهدف هذا الفصل إلى عرض النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها خلال الدراسة، وذلك من خلال سلسلة من التجارب المصممة لتقييم كفاءة المواد المازة (الطينية والنباتية) في معالجة المياه العادمة، سواء بشكل فردي أو مدمج. تم تنظيم النتائج في جداول وأشكال بيانية توضح التغيرات في المؤشرات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للمياه قبل وبعد المعالجة، مثل الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO)، والطلب البيوكيميائي للأكسجين (DBO_5)، والخصائص الفيزيائية (pH، الناقلية، الملوحة، درجة الحرارة)، بالإضافة إلى حركية امتزاز المعادن الثقيلة. كما يتضمن الفصل بروتوكولا تجريبيا لاختبار السمية النباتية باستخدام بذور الفجل، مع عرض النتائج الفعلية التي تم تسجيلها. تم توثيق جميع الظروف التجريبية الأساسية لضمان الشفافية وقابلية التكرار.

2.نتائج التحليل قبل المعالجة:

1.2. تحليل مطياف فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR) :

لدراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد المازة المستعملة وتحديد المجموعات الوظيفية الفعالة فيها، تم إجراء تحليل مطياف فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR) لكلٍّ من المادة النباتية والمادة الطينية. النتائج المتحصل عليها موضحة في الشكل (29)، حيث يمثل المنحنى البنفسجي المادة النباتية، بينما يمثل المنحنى الأحمر المادة الطينية.



الشكل (29): *منحنى يمثل نتائج تحليل FTIR للمادتين*

❖ **مناقشة نتائج تحليل FTIR:**

❖ **المادة الطينية (المنحنى باللون الأحمر):**

يُظهر منحنى تحليل مطيافية FTIR خصائص مميزة لعينة ذات طبيعة معدنية سليكاتية، حيث تدل الذروات الرئيسية على وجود:

- **أكاسيد السيليكا والألومينا (Al_2O_3 , SiO_2):** تظهر بوضوح من خلال الذروة العميقة والحادة في النطاق **1100 – 1000سم$^{-1}$**، وهي تمثل اهتزازات التمدد لروابط Si–O–Si.
- **الأكاسيد المعدنية (Na_2O, CaO, MgO, Fe_2O_3):** وتتمثل في مجموعة الذروات الثانوية المتواجدة في النطاق بين **950 – 500سم$^{-1}$**، والتي تعكس التركيب المعدني المعقد للخامة الطينية.
- **مجموعات الهيدروكسيل المرتبطة (OH–) والرطوبة:** وتستدل من خلال الحزمة العريضة في النطاق **3700 – 3200سم$^{-1}$**، بالإضافة إلى الذروة المتواجدة عند **1650سم$^{-1}$**.

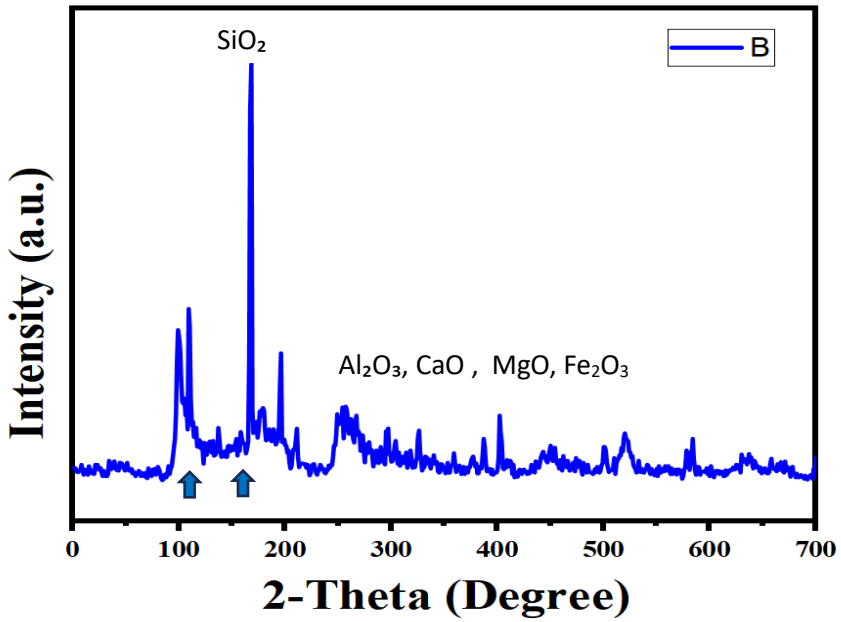
❖ **المادة النباتية (المنحنى باللون البنفسجي):**

يُظهر منحنى تحليل مطيافية FTIR خصائص مميزة لعينة ذات طبيعة عضوية بوليمرية، حيث تدل الذروات الرئيسية على وجود:

- **السلاسل الهيدروكربونية الأليفاتية (C–H)** :وتتمثل في الذروات الحادة والمزدوجة في النطاق **2850 – 2950 سم⁻¹**، وهي مؤشر على وجود الشموع النباتية والأحماض الدهنية.
- **مجموعات الكربونيل :(C=O)** وتظهر من خلال الذروة الحادة عند **1750 سم⁻¹**، والتي تشير إلى وجود الإسترات والأحماض العضوية.
- **روابط السليلوز والهميسليلوز** :وتستدل من خلال الحزمة القوية في النطاق **1100 – 1000سم⁻¹**، الناتجة عن اهتزازات الروابط السكرية (C–O, C–C) المكونة للهيكل النباتي.
- **البروتينات والرطوبة** :وتظهر من خلال المؤشرات في النطاق **3700 – 3200سم⁻¹** (مجموعات OH– ; NH–) والذروة عند **1650 – 1630سم⁻¹**.

2.2. حيود الأشعة السينية DRX :

تم إجراء تحليل حيود الأشعة السينية (DRX) بهدف دراسة التركيب البلوري والأطوار المعدنية للمادة الطينية المستعملة كمازة، وذلك لتحديد المعادن المكونة لها وعلاقتها بقدرتها الامتزازية. النتائج المتحصل عليها موضحة في الشكل (30)، حيث يمثل المنحنى باللون الأزرق المادة الطينية.



الشكل (30): *منحنى يمثل نتائج تحليل DRX للمادة الطينية*

❖ **مناقشة نتائج تحليل DRX:**

يظهر منحنى حيود الأشعة السينية (DRX) للمادة الطينية خصائص مميزة لعينة ذات طبيعة معدنية سيليكاتية متعددة الأطوار، حيث تدل الذروات الرئيسية على وجود:

- الكوارتز (SiO_2 – Quartz): يتمثل في الذروة العميقة والحادة جداً عند زاوية 2-ثيتا حوالي 17–18درجة، وهي أقوى قمة في المنحنى، مما يشير إلى أن الكوارتز يمثل المكون المعدني الرئيسي للمادة الطينية.
- الفلسبار (Feldspar) والكاولينيت (Kaolinite): يتمثلان في الذروة المتوسطة الواضحة عند زاوية 2-ثيتا حوالي 21–20 درجة، وهي من المعادن السيليكاتية الشائعة في الطين والتي تساهم في خصائصه الفيزيائية والكيميائية.

- الأكاسيد المعدنية :يتمثل مجموعة الذروات الثانوية المتواجدة في النطاق بين 65–30 درجة، وخاصة عند الزوايا°35 ، °45، °50، و60°، والتي تعكس وجود أكاسيد الحديد (Fe_2O_3) وأكاسيد الألومنيوم (Al_2O_3)وأكاسيد الكالسيوم (CaO) والمغنيسيوم (MgO) التي تعزز من قدرة المادة الطينية على الامتزاز والتبادل الأيوني.

- الطور غير المتبلور (Amorphous phase) :يتمثل في الارتفاع الملحوظ للخلفية (Background) عند زوايا 2–ثيتا الصغيرة (من 0 إلى حوالي 20 درجة) وفي اتساع بعض القمم، مما يدل على وجود نسبة من المادة غير المتبلورة أو البلورات ذات الحجم النانوي داخل التركيب المعدني للطين.

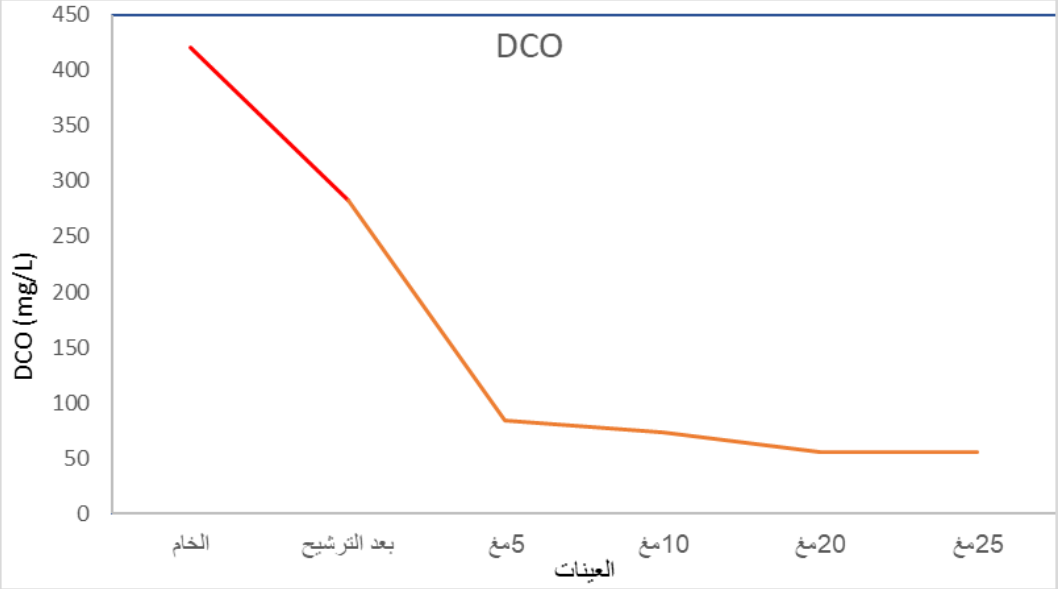
3. تقييم كفاءة المعالجة الفردية والمدمجة (قياس DCO):

تم إجراء التجارب الأولية في ظروف مخبرية عادية، حيث تم تحديد زمن المعالجة لمدة 30 دقيقة.

1.3. المعالجة بالمادة الطينية :

الجدول (5) *: يوضح نتائج تركيز DCO للمادة الطينية*

العينات	الخام	بعد الترشيح	الكتلة 5 مغ	الكتلة 10 مغ	الكتلة 20 مغ	الكتلة 25 مغ
DCO (mg/l)	420	283	84	74	56	55,7

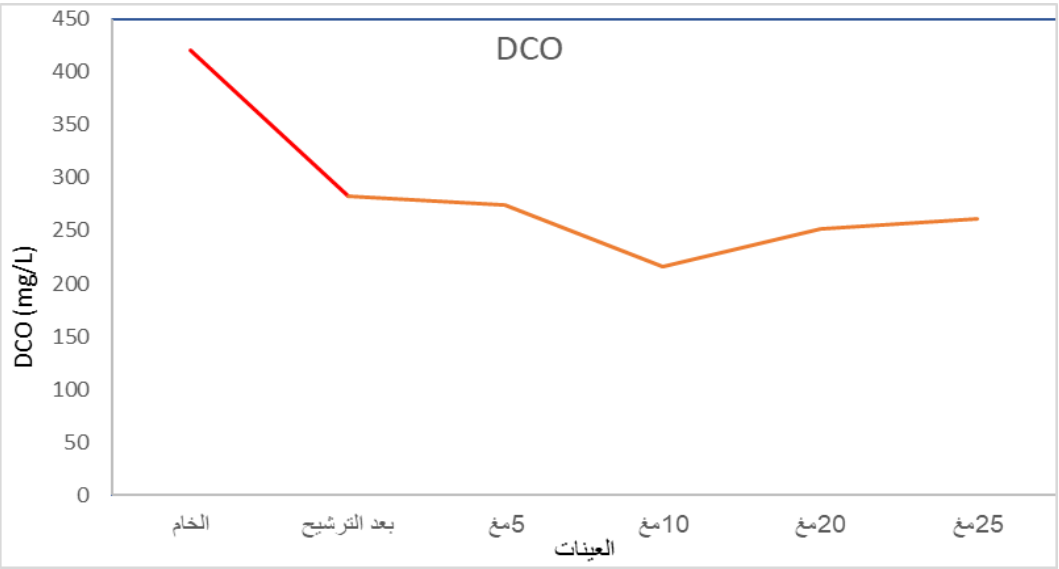


الشكل (31): *منحنى بياني يمثل تركيز DCO للمادة الطينية*

2.3.المعالجة بالمادة النباتية (بذور جافة):

الجدول (6) *: يوضح نتائج تركيز DCO للمادة النباتية (بذور)*

العينات	الخام	بعد الترشيح	الكتلة 5 مغ	الكتلة 10 مغ	الكتلة 20 مغ	الكتلة 25 مغ
DCO (mg/l)	420	283	274	216	252	261

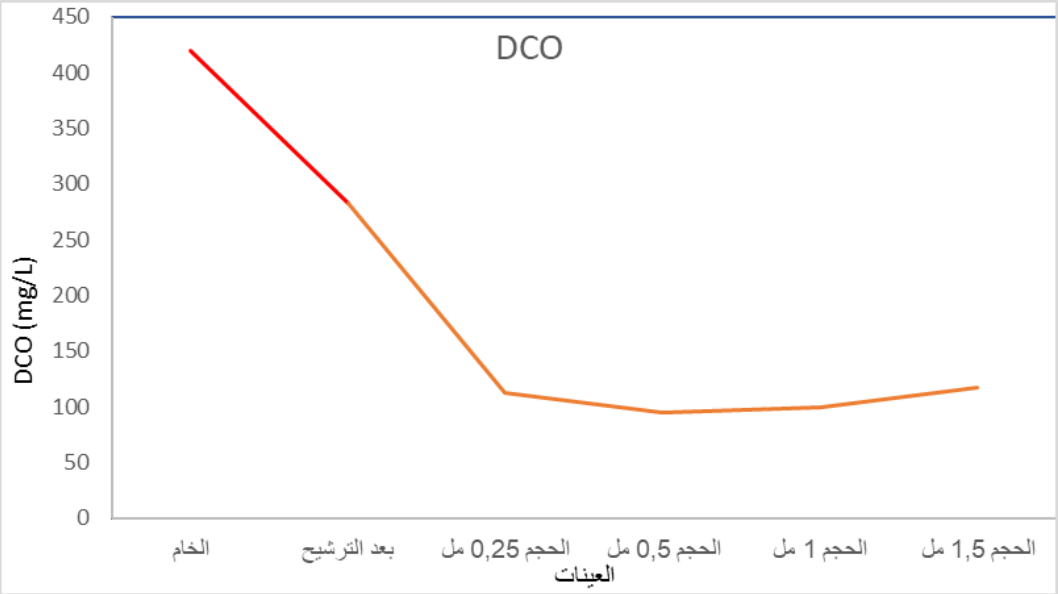


الشكل (32): *منحنى بياني يمثل تركيز DCO للمادة النباتية (بذور)*

3.3. المعالجة بالمادة النباتية (مستحلب) :

الجدول (7): *يوضح نتائج تركيز DCO للمستحلب النباتي*

العينات	الخام	بعد الترشيح	الحجم 0,25 مل	الحجم 0,5 مل	الحجم 1 مل	الحجم 1,5 مل
DCO (mg/l)	420	283	112	94,6	100	117



الشكل (33) : *منحنى بياني يمثل تركيز DCO للمستحلب النباتي*

4.3. المزج بين الجرعات المثالية (25 مغ مادة طينية مع 0.5 مل مستحلب) :

الجدول (8): يوضح نتائج تركيز DCO للمزيج

العينات	الخام	بعد الترشيح	المزيج
DCO (mg/l)	420	283	46

5.3. مناقشة النتائج:

تأثير المعالجة الفردية (المادة الطينية مقابل المادة النباتية) أظهرت النتائج الأولية اختلافا واضحا في كفاءة الإزالة بين المادتين:

المادة الطينية: أظهرت كفاءة عالية في خفض الحمل العضوي، حيث انخفضت قيمة DCO من 420 ملغ/لتر إلى 55.7 ملغ/لتر، بنسبة إزالة بلغت 86.7%. ويرجع ذلك إلى الخصائص المسامية للطين وقدرته العالية على الامتزاز الفيزيائي والكيميائي.

المادة النباتية (على شكل مستحلب): كانت أكثر فعالية من استخدامها على شكل بذور جافة، حيث حققت أفضل أداء عند جرعة 0.5 مل بقيمة DCO 94.6 ملغ/لتر. ويلاحظ هنا وجود "جرعة مثلى"؛ حيث أدت الزيادة في الحجم عن 0.5 مل إلى ارتفاع قيمة DCO مرة أخرى (117 ملغ/لتر)، وهذا ما يفسر علميا أن الزيادة الزائدة في المادة النباتية العضوية تبدأ بالذوبان في العينة، مما يزيد من تعقيدها بدلا من تطهيرها.

التأثير التآزري للخليط الأمثل: عند دمج أفضل جرعة من الطين (25 ملغ) مع الحجم الأمثل للمستحلب (0.5 مل)، سجلت النتائج أدنى قيمة لـ DCO وهي 46 ملغ/لتر بنسبة إزالة إجمالية قدرها 89%.

التفسير العلمي للتآزر: يعزى هذا التفوق إلى التكامل بين آليتين مختلفتين:

التخثير: يعمل المستحلب النباتي كمخثر حيوي بفضل محتواه من البروتينات ومجموعات OH وNH، مما يساعد في تجميع الملوثات الدقيقة والمواد العالقة في المحلول.

الترسيب: تعمل حبيبات الطين لترسيب تلك المواد العالقة، مما يزيد من وزنها وسرعة هبوطها، وبالتالي تؤدي إلى مياه أكثر نقاوة وقيم تلوث أقل مقارنة باستخدام كل مادة على حدة..

4.تأثير زمن المعالجة والوسط البيئي (DCO / DBO_5)

1.4. التجارب في الوسط الداخلي (المختبر)

تم تغيير زمن المعالجة في ظروف عادية داخل المختبر، حيث تم اختيار أربعة أزمنة مختلفة: 30، 60، 120، 180 دقيقة.

❖ يمكن حساب نسبة الازالة لل DBO_5 و DCO بالعلاقة التالية:

$$\boldsymbol{Rt}(\%) = \frac{C_o - C_t}{C_0} * 100$$

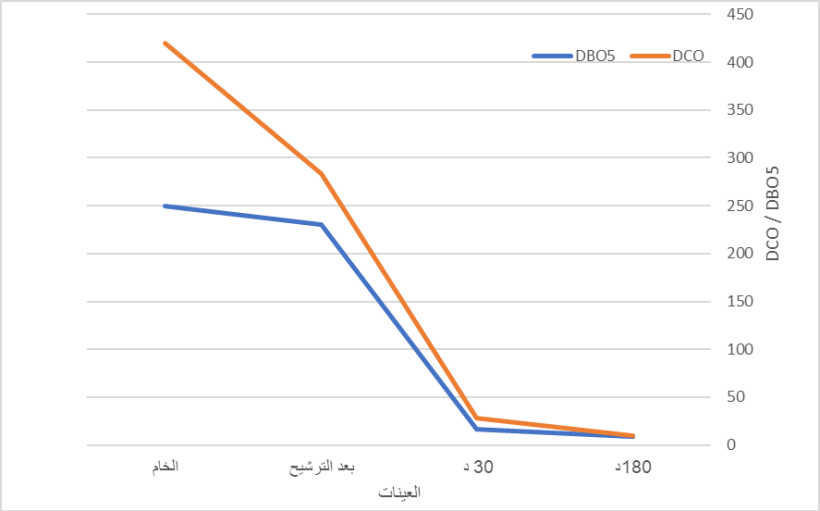
حيث:

C_0 : التركيز الابتدائي.

C_t : التركيز اللحظي.

الجدول (9): *يوضح نتائج تركيز DCO/DBO_5 للجرعة المثلى في الوسط الداخلي بدلالة الزمن*

العينات	الخام	بعد الترشيح	30 دقيقة	60 دقيقة	120 دقيقة	180 دقيقة
DCO(mg/l)	420	283	46	33	22	17
R_t DCO(%)	0	32.6	83.7	88.3	92.9	93.9
DBO_5 (mg/l)	250	230	36	28.3	13.6	11.3
Rt DCO (%)	0	8	84.3	87.6	94	95.09



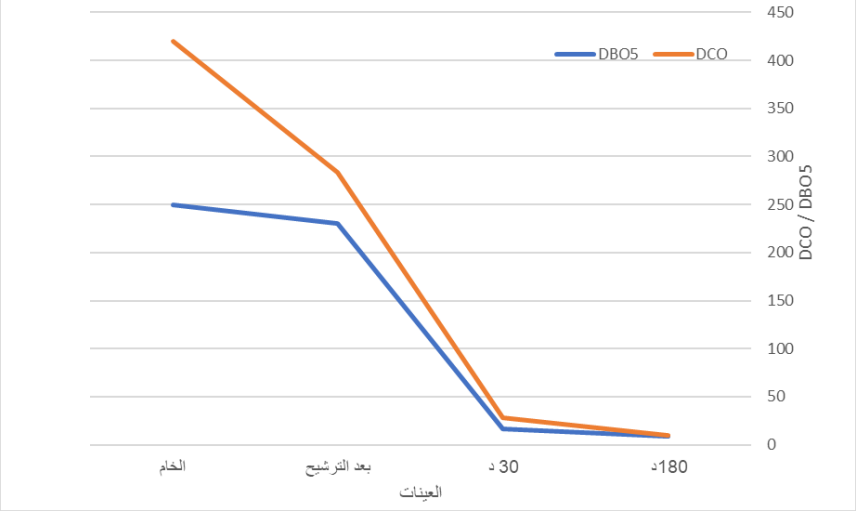
الشكل (34): *منحنى بياني يمثل تركيز DCO/DBO_5 للجرعة المثلى في الوسط الداخلي بدلالة الزمن*

2.4. التجارب في الوسط الخارجي :

تم تغيير زمن المعالجة (30 دقيقة و180 دقيقة) مع تعديل الوسط إلى البيئة الخارجية المحيطة.

الجدول (10): *يوضح نتائج تركيز DCO/DBO5 للجرعة المثلى في الوسط الخارجي بدلالة الزمن*

العينات	الخام	بعد الترشيح	30 دقيقة	180 دقيقة
DCO(mg/l)	420	283	28	10
R_t DCO(%)	0	32.6	90.1	96.4
DBO_5 (mg/l)	250	230	16.5	8.7
Rt DCO(%)	0	8	92.8	96.2



الشكل (35): *منحنى بياني يمثل تركيز DCO/DBO5 للجرعة المثلى في الوسط الخارجي بدلالة الزمن*

5.مناقشة النتائج :

من خلال النتائج المتحصل عليها نلاحظ أنه في العينة الخام تركيز DCOأكبر من DBO_5 وهذا يعني لا تزال وجود مواد قابلة للتحلل البيولوجي.

$$\frac{DBO_5}{DCO} = 0.59 > 0.3$$

كما أظهرت نتائج الدراسة أن الزمن يعتبر من العوامل الأساسية المؤثرة في كفاءة معالجة المياه المستعملة. حيث تم تسجيل انخفاض تدريجي في قيم الطلب الكيميائي للأكسجين (DCO) والطلب البيوكيميائي للأكسجين (DBO_5) مع زيادة زمن المعالجة. في المراحل الأولى من التجربة، لوحظ انخفاض سريع في تراكيز الملوثات، خاصة خلال أول 30 دقيقة، ويُعزى ذلك إلى توفر عدد كبير من المواقع الفعالة على سطح المادة المازة، مما ساهم في امتزاز كمية كبيرة من المواد العضوية والعالقة خلال فترة زمنية قصيرة.

مع زيادة زمن التماس إلى 60 و120 و180 دقيقة، استمرت قيم DCO وDBO_5 في الانخفاض، إلا أن معدل الإزالة أصبح تدريجياً وأقل حدة مقارنة بالمرحلة الأولى. يمكن تفسير ذلك بانخفاض عدد المواقع الفعالة

المتاحة نتيجة تشبع سطح المادة المازة تدريجياً بالملوثات الممتزة، مما يؤدي إلى تباطؤ عملية الامتزاز مع مرور الزمن. ورغم ذلك، فإن استمرار انخفاض القيم يؤكد فعالية المادة المستخدمة وقدرتها على تحسين جودة المياه المعالجة مع زيادة مدة المعالجة.

كما بينت النتائج أن تغيير الوسط من الوسط الداخلي إلى الوسط الخارجي ساهم في تحسين مردود المعالجة، حيث سجلت قيم أقل لكل من DCO وDBO_5 في الوسط الخارجي مقارنة بالوسط الداخلي خلال نفس المدة الزمنية. يحتمل أن يكون ذلك راجعا إلى تأثير العوامل البيئية المحيطة، مثل التهوية الطبيعية ودرجة الحرارة والإضاءة، والتي قد تعزز التفاعلات الفيزيائية والكيميائية والحيوية المسؤولة عن إزالة الملوثات العضوية.

وقد أظهرت النتائج النهائية بعد 180 دقيقة انخفاضًا ملحوظًا في تراكيز DCO وDBO_5، مما يدل على فعالية المزيج المستخدم في تقليل الحمل العضوي للمياه المستعملة.

6. الخصائص الفيزيائية المقاسة (الناقلية، الملوحة، درجة الحرارة ، PH) :

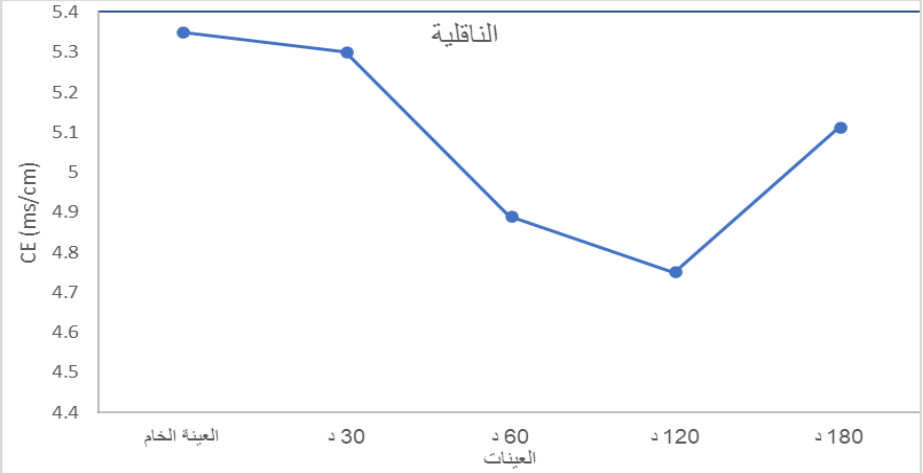
بغية متابعة تغير خصائص المياه المستعملة عند الجرعة المثلى، تم قياس PH ودرجة الحرارة والناقلية الكهربائية والملوحة خلال أزمنة مختلفة وفي الوسطين الداخلي والخارجي.

الجدول (11): نتائج القياسات الفزيائية

المعيار	العينة بعد الترشيح	الوسط الداخلي				الوسط الخارجي	
		30 د	60 د	120 د	180 د	30د	180 د
PH	7.85	8.13	8.54	8.40	8.14	8.07	8.01
CE (ms/cm)	5.35	5.30	4.89	4.75	5.11	5.17	5.55
Salinité (mg/l)	2.7	2.5	2.4	2.3	2.5	2.5	2.8
T °C	20	24.3	24.3	24.4	24.4	24.4	19.1

1.6. مناقشة النتائج الفيزيائية:

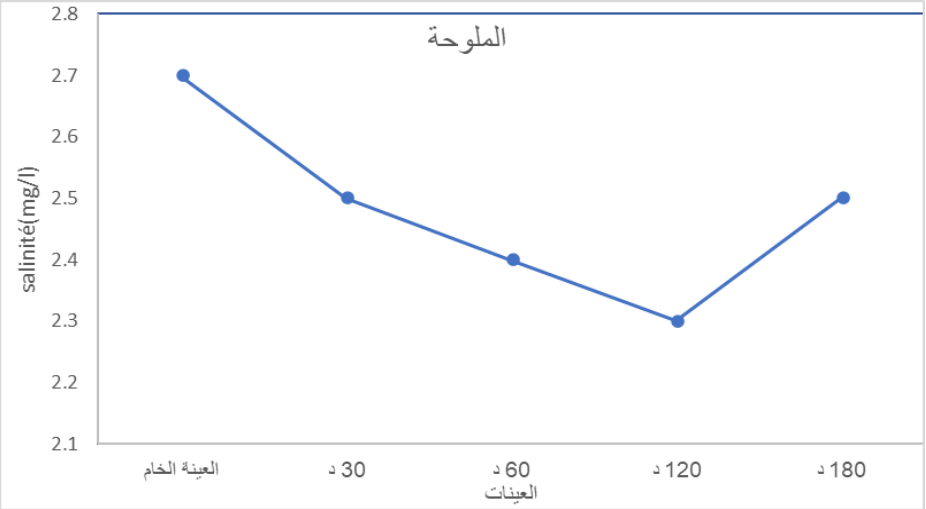
1.1.6. الناقلية الكهربائية :



الشكل (36): يوضح تغير الناقلية للجرعة المثالية بدلالة زمن الخلط

من خلال المنحنى نلاحظ أن الناقلية الكهربائية قليلة التأثر بتركيز الجرعة المثلى، حيث كانت مردودية خفض الناقلية بنسب قليلة، ولهذا نعتبرها مردودية ضعيفة.

2.1.6.الملوحة :



الشكل (37): *يوضح تغير الملوحة للجرعة المثالية بدلالة زمن الخلط*

من خلال المنحنى نلاحظ أن الملوحة قليلة التأثر بالجرعة المثالية، حيث كانت مردودية خفض تركيز الأملاح ضعيفة جدا.

2.6. الاستنتاج العام :

من خلال النتائج المتحصل عليها مما سبق، نستخلص أن الاعتماد على هاتين المادتين في معالجة الملوحة لا يعد حلا فعالا، إذ لم تحقق النتائج انخفاضاً كافيا في نسبة الأملاح، مما يدل على محدودية كفاءتهما في إزالة الملوحة بشكل كامل.

7. حركية امتزاز المعادن الثقيلة و الأيونات:

الجدول (12): *يمثل نتائج امتصاص المعادن الثقيلة والايونات بدلالة الزمن*

المعيار	العينة بعد الترشيح	الوسط الداخلي				الوسط الخارجي
		30 د	60 د	120 د	180 د	30د
CN^- (mg/l)	0.321	0.095	0.039	0.027	0.018	0.007
Cu (mg/l)	1.55	1.15	1.00	0.084	0.069	0.0021
Cl^-(mg/l)	962	111	104	100	95	10
Zn (mg/l)	0.118	0.012	0.009	0.007	0.002	0
Fe (mg/)	1.92	1.37	1.25	1.127	0.119	0.38

1.7. النماذج والعلاقات الرياضية لحساب الحركية والمردود:

لتحديد حركية الامتزاز لأربع معادن ثقيلة وهي (الزنك Zn، الحديد Fe، النحاس Cu) وللأيونات Cl^- و CN^-، في الماء، تمت دراسة العلاقات التالية:

- نموذج الامتزاز من الدرجة الأولى:

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{K_1}{2.303}t$$

- نموذج الامتزاز من الدرجة الثانية:

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{q_e^2\, K_2} + \frac{1}{q_e}t$$

- قمنا بحساب السعة الامتزازية q_t حسب العلاقة التالية:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m}$$

ويمكن تقييم مردود الامتزاز من خلال حساب نسبة إزالة المادة الملوثة من المحلول من خلال العلاقات التالية:

- المردود اللحضي بدلالة q_t:

$$Rt(\%) = \frac{q_t\, m}{C_0 V} * 100$$

- مردود الامتزاز عند التوازن بدلالة qe :

$$Re(\%) = \frac{q_e\, m}{C_0 V} * 100$$

حيث :

qt: السعة الامتزازية (mg/g).

q_e : السعة الامتزازية عند الاتزان (mg/g).

C_0 : التركيز الإبتدائي للمادة الممتزة (mg/l).

C_t : التركيز خلال الزمن للمادة الممتزة (mg/l).

V : حجم المحلول (ml).

m : كتلة المادة المازة (mg).

2.7. الأشكال البيانية للحركية :

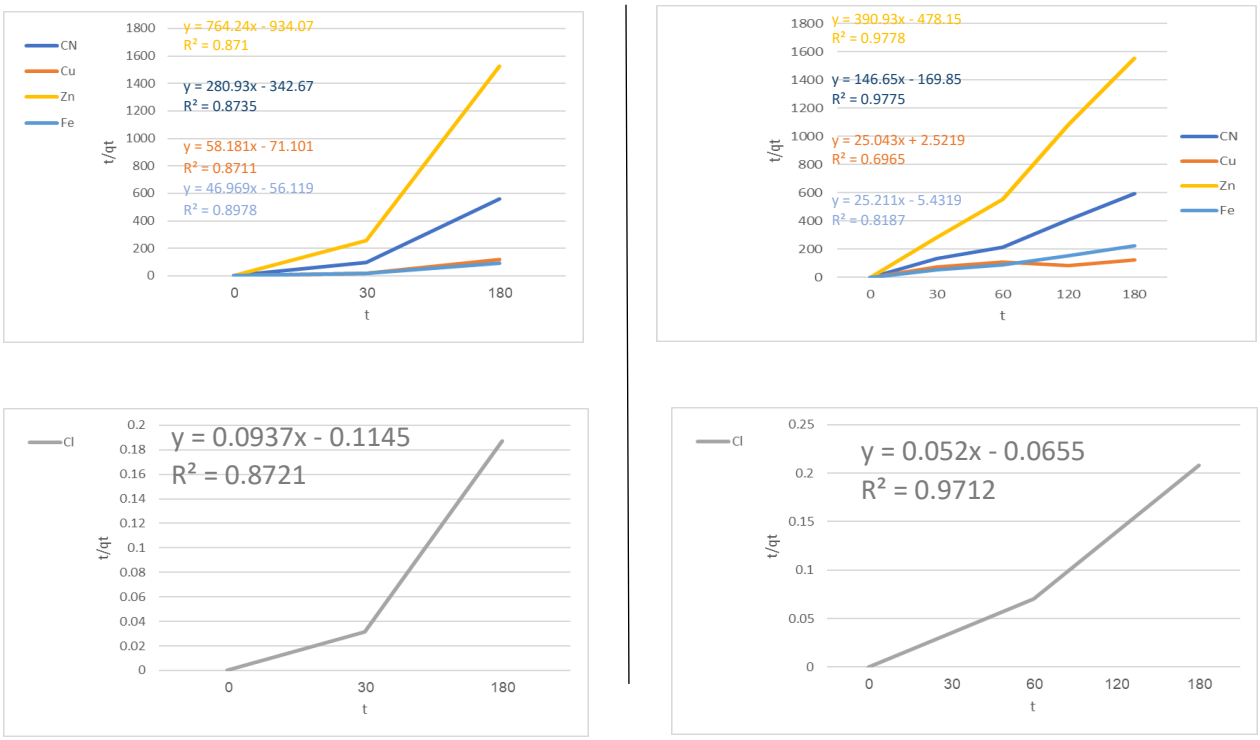
❖ منحنيات qt (mg/g) بدلالة الزمن

الوسط الداخلي: **الوسط الخارجي:**

الشكل (38): *منحنى بياني يمثل qt (mg/g) بدلالة الزمن للمعادن الثقيلة والأيونات*

❖ منحنيات ***(t/qt)*** بدلالة الزمن: (نموذج الدرجة الثانية)

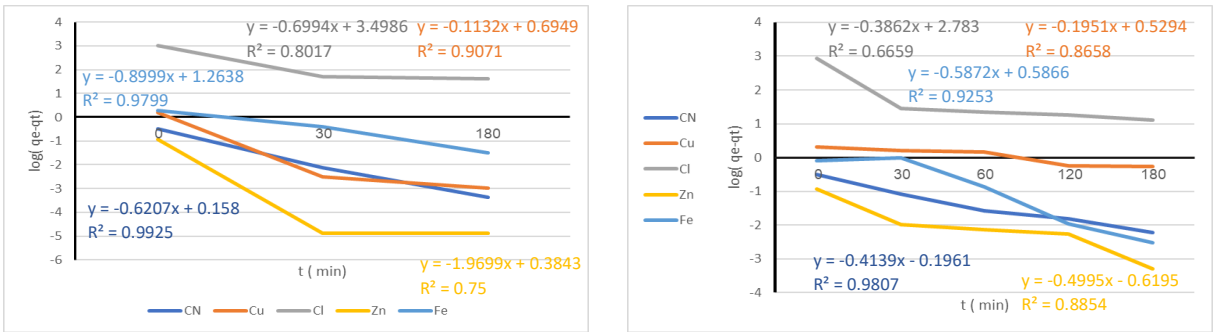
الوسط الداخلي: **الوسط الخارجي:**



الشكل (39): منحنى بياني يمثل (t/qt) بدلالة الزمن للمعادن الثقيلة والأيونات (نموذج الدرجة الثانية)

❖ منحنيات ***log(qe−qt)*** بدلالة الزمن: (نموذج الدرجة الأولى)

الوسط الداخلي: **الوسط الخارجي:**



الشكل (40): *منحنى بياني يمثل (log(qe−qt بدلالة الزمن للمعادن الثقيلة والأيونات (نموذج الدرجة الأولى)*

3.7 جداول النتائج الرقمية لحركية المعادن الثقيلة و الأيونات :

الجدول (13): النتائج المتحصل عليها من دارسة حركية المعادن الثقيلة والأيونات خلال المعالجة في الوسط الداخلي

Cu					
الزمن	0 د	30د	60 د	120 د	180 د
q_t (mg/g)	0	0.3992	0.5489	1.46307	**1.478043912**
q_e (mg/g)	**1.8559976**				
K_1	**0.010133**				
K_2	**0.00722**				
Rt (%)	0	25.81	35.48	94.58	**95.55**
Re (%)	**100**				
Zn					
الزمن	0 د	30د	60 د	120 د	180 د
q_t (mg/g)	0	0.10579	0.10878	0.11078	**0.11577**
q_e (mg/g)	**0.116279**				
K_1	**0.024**				
K_2	**3.665**				
Rt (%)	0	89.83	92.37	94.07	**98.31**
Re (%)	**98.73**				
Fe					
الزمن	0 د	30د	60 د	120 د	180 د
q_t (mg/g)	0	0,548902196	0.66866	0.79142	**0.7994**
q_e (mg/g)	**0.80237**				
K_1	**0.035005**				
K_2	**0.4905**				
Rt (%)	0	28.64	34.89	41.30	**41.72**
Re (%)	**41.87**				
Cl^-					
الزمن	0 د	30د	60 د	120 د	180 د
q_t (mg/g)	0	849.301	856.287	860.279	**865.26946**
q_e (mg/g)	**878.33**				
K_1	**0.0075**				
K_2	**0.00288**				
Rt (%)	0	88.46	89.189	89.60	**90.12**
Re (%)	**91.485**				
CN^-					
الزمن	0 د	30د	60 د	120 د	180 د
q_t (mg/g)	0	0.22555	0.28144	0.29341	**0.3023952**
q_e (mg/g)	**0.30855**				
K_1	**0.020036**				
K_2	**0.6072**				
Rt (%)	0	70.04	87.85	91.58	**94.39**
Re (%)	**96.31**				

الجدول (14): النتائج المتحصل عليها من دارسة حركية المعادن الثقيلة والأيونات خلال المعالجة في الوسط الخارجي

Cu			
الزمن	0 د	30د	180 د
q_t (mg/g)	0	1.54481	1.546906
q_e (mg/g)	1.54798		
K_1	3.6373		
K_2	32.859		
Rt (%)	0	99.86	99.9999
Re (%)	100		
Zn			
الزمن	0 د	30د	180 د
q_t (mg/g)	0	0.117764	0.1177644
q_e (mg/g)	0.117778		
K_1	4.5366		
K_2			
Rt (%)	0	99.999	99.9999
Re (%)	100		
Fe			
الزمن	0 د	30د	180 د
q_t (mg/g)	0	1.536926	1.916168
q_e (mg/g)	1.94704		
K_1	2.07247		
K_2	0.1411		
Rt (%)	0	80.21	99.9999
Re (%)	100		
Cl^-			
الزمن	0 د	30د	180 د
q_t (mg/g)	0	950.0998	960.0798
q_e (mg/g)	1000		
K_1	1.6107		
K_2	0.005		
Rt (%)	0	98.96	99.9999
CN^-			
الزمن	0 د	30د	180 د
q_t (mg/g)	0	0.313373	0.320359
q_e (mg/g)	0.3208		
K_1	3.29559		
K_2	9.619		
Rt (%)	0	97.8	99.999
Re (%)	100		

4. 7 .مناقشة نتائج حركية الامتزاز:

من خلال النتائج المعروضة في الجدولين (13) و(14)، يمكن استخلاص التحليلات التالية:

❖ **تأثير الوسط (داخلي مقابل خارجي) على حركية الامتزاز:**

الوصول إلى التوازن: في الوسط الخارجي، يتم الوصول إلى سعات امتزازية متوازنة (*qe*) بشكل أسرع بكثير (خلال 30 دقيقة) مقارنة بالوسط الداخلي الذي يحتاج إلى 180 دقيقة. هذا يدل على أن الظروف الخارجية (ربما ارتفاع درجة الحرارة، التهوية الطبيعية، أو الاضطراب) ساهمت في تسريع عملية الانتشار والامتزاز.

قيم *qe* (السعة الامتزازية عند التوازن): بالنسبة لمعظم العناصر (مثل CN^-, *Cu*, Cl^-, *Zn*)، نجد أن قيم *qe* في الوسط الخارجي أعلى منها في الوسط الداخلي. على سبيل المثال عند التوازن لـ *0.3208 mg/g:* (CN^-خارجي) مقابل *0.30855 mg/g* (داخلي)

السعة الامتزازية عند التوازن لـ *Cu :1.54798 mg/g* (خارجي) مقابل *1.8559976 mg/g* (داخلي)، هنا كان الداخلي أعلى قليلا.

السعة الامتزازية عند التوازن للأيونات *Cl– :1000 mg/g* (خارجي) مقابل *878.33 mg/g* (داخلي)

هدا يوضح ان الوسط الخارجي حسن من كفاءة الامتزاز لمعظم العناصر، خاصة الأيونات(Cl^-) و (CN^-)، مما يعكس تأثير العوامل البيئية الطبيعية في تعزيز قدرة المواد المازة.

❖ **تحليل ثوابت السرعة (K_1 وK_2):**

قيم K_1 (نموذج الدرجة الأولى) وK_2 (نموذج الدرجة الثانية) في الوسط الخارجي هي أعلى بكثير منها في الوسط الداخلي. على سبيل المثال:

K_1 للـ CN^-: *3.29559* (خارجي) مقابل 0.020036 (داخلي).

K_2 للـ Cu: *32.859* (خارجي) مقابل 0.00722 (داخلي).

هذا يؤكد بشكل قاطع أن سرعة الامتزاز تتسارع بشكل كبير في الظروف الخارجية، مما يجعل العملية أكثر كفاءة من حيث الزمن.

❖ **تحليل مردود الامتزاز (R_t وR_e)**

المردود النهائي (R_e): في الوسط الخارجي، تم الوصول إلى مردود امتزاز مثالي (100%) لجميع المعادن الثقيلة والأيونات باستثناء الحديد (*Fe*) الذي حقق أيضاً 100% حسب الجدول. بينما في الوسط الداخلي، تراوح المردود بين 41.87% (للحديد) و100% (للنحاس). هذا يدل على أن المعالجة في الوسط الخارجي أكثر فعالية في إزالة المعادن الثقيلة والأيونات بشكل شبه كامل.

المردود عند 180 دقيقة (داخلي) مقابل 30 دقيقة (خارجي):

- داخلياً (بعد 180 دقيقة): حقق المزيج مردوداً جيداً لـ *(CN^- (94.39%)*، *Cu (95.55%)*، (Cl^- (90.12%)، و *Zn* (98.31%)، لكنه كان ضعيفاً للحديد (41.72%).
- خارجياً (بعد 30 دقيقة فقط): حقق المزيج مردوداً ممتازاً تجاوز 97% لجميع العناصر (*CN^-: 97.8%*، *Cu: 99.86%*، *Cl^-: 98.96%*، *Zn: 99.99%*) باستثناء الحديد (80.21%)، لكنه وصل إلى 100% عند 180 دقيقة.

من هنا نستخلص ان الوسط الخارجي لم يسرّع العملية فحسب، بل حسّن المردود النهائي بشكل ملحوظ، خاصة للعناصر التي كانت أقل استجابة في الوسط الداخلي مثل الأيونات (Cl^-).

❖ **سلوك الحديد (*Fe*) كحالة خاصة:**

يظهر الحديد (*Fe*) سلوكاً مختلفاً عن البقية:

- في الوسط الداخلي، كان مردود امتزازه منخفضاً (41.72%) مقارنة البقية.
- في الوسط الخارجي، تحسن مردوده بشكل ملحوظ لكنه بقي الأقل نسبياً عند 30 دقيقة (80.21%) قبل أن يصل إلى 100% عند 180 دقيقة.

❖ **خلاصة تحليل حركية الامتزاز:**

يستنتج من التحليل أعلاه أن المزيج (الطين + المستحلب النباتي) يتمتع بكفاءة عالية في إزالة المعادن الثقيلة والأيونات، وأن نموذج الدرجة الثانية يصف الحركية بدقة، مما يؤكد آلية الامتزاز الكيميائي. كما أن العمل في الوسط الخارجي يحسّن بشكل كبير من سرعة وكفاءة الإزالة، حيث تم تحقيق مردود يتجاوز 97% لمعظم العناصر خلال 30 دقيقة فقط، مقابل 180 دقيقة في الوسط الداخلي. يعتبر الحديد (*Fe*) أقل العناصر استجابة، لكن الظروف الخارجية حسّنت أداءه بشكل ملحوظ.

8. استعمالات المادة المترسبة :

1.8. تثبيته واستخدامه في البناء (صلب واستقرار):

هذا يعتبر المسار الأكثر أمانًا والأكثر شيوعًا، حيث يتم تثبيت المعادن الثقيلة بشكل دائم داخل مصفوفة البناء، مما يمنع تسربها:

❖ **صناعة الطوب:**

يمكن استخدام الرواسب كبديل جزئي للمواد الأولية في صناعة الطوب. أظهرت التجارب العملية إمكانية إضافة ما يصل إلى 30% من الحمأة الملوثة إلى خليط الطين المستخدم في صناعة الطوب المحروق دون

التأثير على جودته[88.87] . كما أن إضافة رواسب المياه المعالجة يمكن أن تزيد من قوة الطوب الانضغاطية وتقلل من مساميته وامتصاصه للماء.

❖ **إنتاج الركام الخفيف (الخرسانة):**

يمكن استخدام الرواسب في صناعة ركام خفيف الوزن يستخدم في الخرسانة[89.90] . في هذه العملية، تخلط الرواسب مع مواد أخرى (مثل الصخر الزيتي) ثم تحرق في أفران بدرجات حرارة عالية جدا (تصل إلى 1100 درجة مئوية). هذه الحرارة العالية تعمل على تدمير الملوثات العضوية وتثبيت المعادن الثقيلة داخل بنية الركام الزجاجية المندمجة، مما يجعلها غير قابلة للانطلاق.

❖ **تثبيت التربة في مشاريع الردم:**

يمكن خلط الطين المستعمل مع مواد رابطة مثل الأسمنت أو الجيوبوليمر (*Géopolymère*).[91] هذه العملية ليست فقط لتثبيت المعادن الثقيلة كيميائيًا، بل تعمل أيضًا على تحسين الخواص الميكانيكية للتربة، مما يجعلها مناسبة للاستخدام كطبقات أساسية وأرضيات للمشاريع الصناعية ومدافن النفايات.

2.8. استخلاص المعادن الثقيلة (استرداد عالي القيمة)

وهذا هو الخيار الأكثر تقدمًا والأعلى قيمة اقتصادية، لكنه الأكثر تعقيدًا:

❖ **استعادة المواد القيمة:**

تهدف هذه التقنية إلى استعادة المعادن الثمينة (مثل النحاس والزنك) التي قد تكون موجودة بتركيزات اقتصادية. تتضمن العملية غسل الطين بمحاليل خاصة (مثل *EDTA* التي تلتقط المعادن) لفصل المعادن عنه[92] . يعاد استخدام محلول الغسل نفسه عدة مرات، وفي النهاية يتم الحصول على محلول مركز من هذه المعادن يمكن ترسيبه وبيعه كمواد خام ثانوية، بينما يصبح الطين الناتج أقل تلوثا.

9. تقييم السمية النباتية باستخدام بذور الفجل :

1.9. بروتوكول التجربة :

الهدف هو تقييم التأثير السمي للمياه المعالجة (بالمزيج: طين + مستحلب نباتي) مقابل المياه المرشحة والمياه العادية، وذلك من خلال قياس مؤشرات النمو لنبات الفجل بعد 20 يوما من الري.

❖ **المواد والأدوات المستخدمة:**

الجدول (15): يوضح المواد والأدوات المستخدمة

المادة/الأداة	الكمية/المواصفات
بذور الفجل	*30*بذرة على الأقل
أواني بلاستيكية صغيرة (مثقبة)	*6*أواني
تربة زراعية متجانسة (خالية من الأسمدة والمبيدات)	*1.2*كج
مياه الصرف	*300*مل
مياه الصرف المعالجة بالمزيج المثالي (25 مغ طين + 0.5 مل مستحلب، زمن تماس 180	*300*مل
ماء عادي (شاهد)	*300*مل
مسطرة (دقة 1 مم)	*1*

❖ **تصميم التجربة:**

الجدول (16): *يوضح تصميم التجربة*

المجموعة	نوع ماء الري	عدد المكررات	عدد البذور/وعاء
شاهد سلبي	ماء عادي	2	5
معالجة	مياه صرف معالجة بالمزيج	2	5
غير معالجة	مياه صرف	2	5

❖ **خطوات التنفيذ:**

1. تحضير الأواني والتربة:

- تغسل الأواني جيداً بماء مقطر وتجفف.
- يملأ كل وعاء بـ 150–200 جم من التربة الزراعية.
- تضغط التربة برفق (بدون عصر شديد).

2. الزراعة:

- تحفر 5 حفر صغيرة بعمق 1–1.5 سم في كل وعاء، بتوزيع متساو.
- توضع بذرة واحدة في كل حفرة، ثم تغطى بطبقة رقيقة من التربة.

3. الري الأولي والمتابعة:

- مباشرة بعد الزراعة، تروى جميع الأواني بـ 30 مل من الماء المخصص لكل مجموعة (ضمان بدء إنبات متجانس).

- بعد ذلك، تتم الري كل يومين بمقدار 20–30 مل لكل وعاء (حسب الحاجة للحفاظ على رطوبة التربة دون تشبع).

4. مدة التجربة:

- تستمر التجربة 20 يوما من تاريخ الزراعة.

- في نهاية اليوم 20، تقلع النباتات بحذر

*2.9.*نتائج تجربة الفجل :

❖ **القياسات المسجلة:**

بعد 20 يوما من الري المنتظم للمجموعات الثلاث (ماء عادي، ماء معالج، ماء الصرف)، تم تسجيل النتائج المبينة في الجدول أدناه. ويمكن تقييم مؤشر النمو من خلال العلاقة التالية:

$$GI(\%) = \frac{G_t * L_t}{G_c * L_c} * 100 \quad ; \quad GI(\%) = \frac{70 * 4}{70 * 4.1} * 100 = 97.56\%$$

حيث:

Gt : نسبة الإنبات في مجموعة الشاهد (*Control Germination*).

Gc : نسبة الإنبات في العينة المعالجة (*Treatment Germination*).

Lc *:* متوسط طول النبات في مجموعة الشاهد.

L_t *:* متوسط طول النبات في العينة المعالجة.

الجدول (17): *يوضح القياسات المسجلة بعد 20 يوما*

المؤشر	ماء عادي	ماء معالج	ماء خام
نسبة الإنبات (%)	*70*	*70*	*0*
متوسط طول النبات	*4.1*	*4.0*	*0*
ملاحظات عامة	نمو طبيعي، أوراق خضراء	نمو قريب من الشاهد، لا تسمم	غياب تام للإنبات، سمية عالية

3.9. التوثيق الفوتوغرافي للسمية النباتية ومؤشرات النمو:

اليوم الأول لبداية السقي

اليوم 20 لثلاثة عينات على التسلسل: عادي، معالج، الصوف

متوسط طول النبات المسقي بالماء العادي

متوسط طول النبات المسقي بالماء المعالج

الشكل (41): *توضح التوثيق الفوتوغرافي للسمية النباتية ومؤشرات النمو*

4.9. تحليل وتفسير النتائج المستخلصة:

يعرض الشكل (41) والجدول (17) نتائج اختبار السمية النباتية على بذور الفجل بعد 20 يوماً من الري المنتظم، حيث تمت مقارنة ثلاث مجموعات تجريبية: المجموعة الأولى رويت بالماء العادي (شاهد سلبي)، والثانية رويت بالمياه المعالجة بالمزيج المثالي (25 مغ طين + 0.5 مل مستحلب نباتي)، والثالثة رويت بالمياه الخام غير المعالجة (شاهد موجب).

نلاحظ أن مجموعة الشاهد (الماء العادي) سجلت نسبة إنبات بلغت 70% ومتوسط طول نبات قدره 4.1 سنتيمترات، مع ملاحظات عامة تشير إلى نمو طبيعي وأوراق خضراء. هذه النتائج تؤكد أن الظروف التجريبية (نوع التربة، كمية الري، الإضاءة، درجة الحرارة) كانت مناسبة وملائمة للنمو، وبالتالي يمكن الاعتماد على هذه القيم كمرجع للمقارنة مع المجموعات الأخرى.

بالنسبة للمجموعة التي رويت بالمياه المعالجة، سجل نفس نسبة الإنبات (70%) ومتوسط طول نبات قدره 4.0 سنتيمترات، مع ملاحظات عامة تشير إلى نمو قريب من الشاهد وغياب تام للتسمم. هذه النتائج متقاربة جداً مع نتائج مجموعة الشاهد، حيث لا يتجاوز الفرق في متوسط طول النبات 0.1 سنتيمتر، وهو فارق ضئيل، مما يدل على أن المياه المعالجة لا تختلف عملياً عن الماء العادي في تأثيرها على نمو النباتات.

أما مجموعة المياه الخام غير المعالجة، فسجل نسبة إنبات صفر (0%) ومتوسط طول نبات صفر، مع ملاحظات عامة تشير إلى غياب تام للإنبات وسمية عالية. هذه النتيجة تعكس مدى خطورة المياه الخام التي تحتوي على تركيزات عالية من الملوثات.

بالتزامن مع الجدول (17)، يوضح الشكل (41) التوثيق الفوتوغرافي لهذه النتائج. ففي الأواني الخاصة بمجموعة المياه الخام، نلاحظ غياباً تاماً لأي نبات أخضر، حيث بقيت التربة عارية دون أي علامة إنبات. بالمقابل، تظهر أواني مجموعة المياه المعالجة نباتات خضراء مورقة ذات نمو طبيعي، لا تختلف في مظهرها عن نباتات مجموعة الشاهد. الصور تؤكد بصرياً ما سجله الجدول من أرقام، حيث تبدو النباتات الثلاثة في مجموعة المياه المعالجة متجانسة في الحجم واللون مع نباتات الشاهد.

يمكن تفسير النتائج المسجلة بالرجوع إلى التحاليل الكيميائية السابقة. فالمياه الخام كانت تحتوي على تركيزات مرتفعة من الملوثات(DCO= 420، DBO_5=250 ملغ/لتر، والمعادن الثقيلة والأيونات (الحديد 1.92 ملغ/لتر، النحاس 1.55 ملغ/لتر، السيانيد 0.321 ملغ/لتر). هذه الملوثات سامة للبذور والنباتات، حيث تمنع إنبات البذور، وهو ما يفسر الغياب التام للإنبات في مجموعة المياه الخام.

أما بعد المعالجة بالمزيج، فقد انخفضت تركيزات هذه الملوثات بشكل كبير: وصل DCO إلى 46 ملغ/لتر، و DBO_5إلى 11.3 ملغ/لتر، كما انخفضت المعادن الثقيلة والأيونات بنسب تراوحت بين 89% و99%. هذا الانخفاض الحاد في الملوثات جعل المياه صالحة لنمو البذور، حيث لم تعد هناك مركبات سامة تمنع الإنبات أو تعيق النمو.

ومنه نستنتج أن المزيج المستخدم (الطين + مستحلب بذور المورينجا) نجح في تحويل مياه الصرف الخام من مياه شديدة السمية (نسبة إنبات 0%) إلى مياه صالحة للري الزراعي (نسبة إنبات 70%، ومتوسط طول 4.0 سم)، بنتائج تكاد تكون مطابقة للماء العادي، مما يثبت أن هذه التقنية الطبيعية يمكن الاعتماد عليها بشكل آمن وفعال.

10.خاتمة الفصل:

أظهرت النتائج التجريبية لهذا الفصل كفاءة عالية للمزيج الثنائي (بذور المورينجا والمادة الطينية) في معالجة المياه المستعملة، حيث بلغت نسب إزالة الملوثات العضوية COD) و (BOD أكثر من 96% في الوسط الخارجي، كما تحقق إزالة شبه تامة للمعادن الثقيلة (النحاس والزنك) والأيونات السامة (الكلوريد و السيانيد) خلال 30 دقيقة فقط، مما يؤكد فعالية هذا المزيج كبديل بيئي ومنخفض التكلفة مقارنة بالطرق التقليدية.

كما أثبت اختبار السمية النباتية باستخدام بذور الفجل خلو المياه المعالجة من أي تأثيرات سامة، حيث ارتفعت نسبة الإنبات من 0% في المياه الخام إلى 70% في المياه المعالجة، وهي نسبة مقاربة للمجموعة الشاهدة. تشير هذه النتائج إلى إمكانية اعتماد هذا الحل المبتكر في المناطق الجافة وشبه الجافة، مع إمكانية تثمين الرواسب الناتجة ضمن مفاهيم الاقتصاد الدائري.

الخاتمة

الخاتمة:

في ختام هذا العمل، يمكن القول إن الهدف الرئيسي من هذه الدراسة تم تحقيقه، والمتمثل في تطوير حل بيئي مستدام ومنخفض التكلفة لمعالجة المياه المستعملة باستخدام مزيج من مواد طبيعية محلية، وذلك لإعادة استخدامها في الري الزراعي والصناعي، وبالتالي المساهمة في مواجهة تحديات ندرة المياه خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة مثل الجزائر.

أثبتت الدراسة أن المزيج الثنائي المبتكر من المادة الطينية والمستحلب النباتي المستخلص من بذور المورينجا حقق كفاءة عالية في معالجة المياه المستعملة، حيث تم تحديد الجرعة المثالية بـ 25 مليغراماً من المادة الطينية مع 0.5 ملليلتر من المستحلب النباتي لكل 25 ملليلتراً من مياه الصرف. كما أظهرت النتائج تفوقاً واضحاً للمعالجة في الوسط الخارجي مقارنة بالوسط الداخلي المخبري، حيث ساهم التعرض للعوامل البيئية الطبيعية كالتهوية ودرجة الحرارة والإضاءة في تحسين كفاءة الإزالة بشكل ملحوظ، واختصار زمن التوازن من 180 دقيقة إلى 30 دقيقة فقط لمعظم الملوثات.

فيما يخص إزالة الملوثات العضوية، بلغت نسبة إزالة الطلب الكيميائي للأكسجين 96.4% والطلب البيوكيميائي للأكسجين 96.2% في الوسط الخارجي بعد 180 دقيقة. وبالنسبة للملوثات غير العضوية، حقق المزيج نتائج متميزة حيث بلغت نسب إزالة المعادن الثقيلة والأيونات 100% لكل من السيانيد والنحاس والزنك والكلوريد في الوسط الخارجي عند 180 دقيقة، مع تسارع كبير في حركية الامتزاز تجاوزت نسب الإزالة 97% خلال 30 دقيقة فقط. كما أظهرت الدراسة الحركية أن عملية الامتزاز تتبع نموذج الدرجة الثانية الزائفة، مما يؤكد الطابع الكيميائي لتفاعل الامتزاز. بينت النتائج أيضاً أن المزيج أظهر كفاءة محدودة جداً في خفض ملوحة المياه والناقلية الكهربائية، مما يستدعي معالجة تكميلية إذا كان الغرض من إعادة الاستخدام يتطلب مياهاً منخفضة الملوحة.

أكد اختبار السمية النباتية على بذور الفجل نجاح المعالجة بيئياً، حيث ارتفعت نسبة الإنبات من 0% في المياه الخام إلى 70% في المياه المعالجة، بمتوسط طول نبات بلغ 4.0 سنتيمترات، وهي نتائج مطابقة تقريباً لمجموعة الشاهد التي رويت بالماء العادي، مما يثبت خلو المياه المعالجة من الآثار السامة وصلاحيتها للاستخدام الآمن في الري الزراعي.

بناءً على هذه النتائج، نوصي بتطبيق المعالجة في الظروف البيئية الطبيعية نظراً لتفوقها في السرعة والكفاءة، وتعميم استخدام هذا المزيج الثنائي في محطات معالجة المياه الصغيرة والمتوسطة خاصة في المناطق الريفية والزراعية، وإضافة مرحلة معالجة تكميلية للأملاح عند الحاجة، وإجراء دراسات مستقبلية على نطاق شبه صناعي لتقييم أداء المزيج في الظروف الحقيقية.

تفتح هذه الدراسة آفاقاً واعدة نحو تثمين الرواسب الناتجة في قطاع البناء كصناعة الطوب والخرسانة والركام الخفيف، واستخلاص المعادن الثقيلة ذات القيمة الاقتصادية كالنحاس والزنك، وتطوير مواد مازة مركبة جديدة، والتوسع في استخدام مواد طبيعية محلية أخرى كقشور الفواكه ونوى التمر، ودمج هذه التقنية مع الطاقات المتجددة كالطاقة الشمسية لتحقيق استقلالية كاملة للمحطة.

في النهاية، نأمل أن تساهم هذه الدراسة في دعم السياسات البيئية والمائية في الجزائر، وفي تشجيع البحث العلمي نحو حلول مستدامة تعتمد على الموارد المحلية، وتحقق أهداف التنمية المستدامة المتعلقة بالمياه النظيفة والصرف الصحي.

المراجع

المراجع:

[1] United Nations, World Water Development Report. New York, NY, USA: United Nations, 2020.

[2] G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, R. Tsuchihashi, and F. Burton, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.

[3] Metcalf & Eddy, Inc., Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.

[4] Food and Agriculture Organization (FAO), Wastewater Reuse in Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper. Rome, Italy: FAO, 2013.

[5] World Bank, Wastewater: From Waste to Resource – The Case for Investment in Wastewater Treatment in the Middle East and North Africa. Washington, DC, USA: World Bank, 2019.

[6] F. Meng, S. Zhang, Y. Oh, Z. Zhou, H. S. Shin, and S. R. Chae, "Fouling in membrane bioreactors: An updated review," Water Research, vol. 114, pp. 151-180, 2017.

[7] L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, and P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges," Water Research, vol. 43, no. 9, pp. 2317-2348, 2009.

[8] Y. Deng and R. Zhao, "Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment," Current Pollution Reports, vol. 1, pp. 167-176, 2015.

[9] D. B. Miklos, C. Remy, M. Jekel, K. G. Linden, J. E. Drewes, and U. Hübner, "Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review," Water Research, vol. 139, pp. 118-131, 2018.

[10] A. Pérez-González, A. M. Urtiaga, R. Ibáñez, and I. Ortiz, "State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates," Water Research, vol. 46, no. 2, pp. 267-283, 2012.

[11] D. B. Adugna, A. A. Ante, M. Aschale, and M. M. Maja, "Characterization of physicochemical and bacteriological properties of Harar Brewery wastewater and its suitability for irrigation," Scientific African, vol. 24, p. e02214, 2024.

[11] S. D. Richardson and T. A. Ternes, "Water analysis: Emerging contaminants and current issues," Analytical Chemistry, vol. 90, no. 1, pp. 398-428, 2018.

[12] Y. Luo et al., "A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment," Science of the Total Environment, vol. 473-474, pp. 619-641, 2014.

[13] Murray, H. H. (2006). Applied Clay Mineralogy. Elsevier.

[14] Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). Handbook of Clay Science. Newnes

[15] Camacho, F. P., et al. (2017). Chem. Eng. Trans., 57, 1489-1494.

[16] Pritchard, M., et al. (2014). J. Environ. Sci. Water Res., 3(7), 191-200.

[17] European Commission, A New Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Brussels, Belgium: European Commission, 2020.

[18] United States Environmental Protection Agency (USEPA), Guidelines for Water Reuse, EPA/625/R-04/108. Washington, DC, USA: U.S. EPA, 2004.

[19] World Health Organization (WHO), Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, vol. 2. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2006.

[20] IUPAC, "waste-water," in IUPAC Compendium of Chemical Terminology - The Gold Book. Research Triangle Park, NC, USA: IUPAC, 2014.

[21] R. W. Crites and G. Tchobanoglous, Small and Decentralized Wastewater Management Systems. Boston, MA, USA: McGraw-Hill, 1998.

[22] A. Morel and S. Diener, Greywater Management in Low and Middle-Income Countries. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 2006.

[23] F. Li, K. Wichmann, and R. Otterpohl, "Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses," Science of the Total Environment, vol. 407, no. 11, pp. 3439-3449, 2009.

[25] L. Metcalf and H. P. Eddy, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.

[26] C. N. Sawyer, P. L. McCarty, and G. F. Parkin, Chemistry for Environmental Engineering and Science, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.

[27] M. Henze, P. Harremoes, J. la Cour Jansen, and E. Arvin, Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes, 3rd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002.

[28] B. Shanmughan, S. Suresh, P. S. Kumar, and G. Rangasamy, "Advancements in characterization techniques, empirical models, and artificial intelligence for comprehensive understanding of heavy metal adsorption on sewage sludge biochar," Waste Management Bulletin, vol. 3, no. 1, pp. 100-115, 2025.

[29] L. Fewtrell and J. Bartram, Water Quality: Guidelines, Standards and Health. London, U.K.: IWA Publishing, 2001.

[30] S. Hamal and S. R. Pandit, "Physicochemical characterization and screening-level treatability assessment of institutional wastewater: A case study of Far Western University, Nepal," Journal of Engineering Technology and Planning, vol. 6, no. 1, pp. 80-87, 2025.

[31] S. C. Edberg, E. W. Rice, R. J. Karlin, and M. J. Allen, "Escherichia coli: the best biological drinking water indicator for public health protection," Journal of Applied Microbiology, vol. 88, no. S1, pp. 106S-116S, 2000.

[32] S. Mohan, V. Manthapuri, and S. Chitthaluri, "Assessing factors influencing greywater characteristics around the world: a qualitative and quantitative approach with a short-review on greywater treatment technologies," Discover Water, vol. 4, no. 1, p. 12, 2024.

[33] T. Asano, F. L. Burton, H. L. Leverenz, R. Tsuchihashi, and G. Tchobanoglous, Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2007.

[34] B. Jiménez and T. Asano, Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs. London, U.K.: IWA Publishing, 2008.

[35] UNDRR, "Wastewater (TL0503)," United Nations Office for Disaster Risk Reduction Terminology, 2023.

[36] UNESCO, Wastewater: The Untapped Resource – The United Nations World Water Development Report 2017. Paris, France: UNESCO Publishing, 2017.

[37] UN-Water, Summary Progress Update 2021: Wastewater Treatment – Global Status and Progress on SDG Indicator 6.3.1. Geneva, Switzerland: UN-Water, 2021.

[38] OECD, Water Quality and Agriculture: Meeting the Policy Challenge. Paris, France: OECD Publishing, 2012.

[39] Centers for Disease Control and Prevention, Global Water, Sanitation, & Hygiene (WASH): Water-Related Diseases and Contaminants. Atlanta, GA, USA: CDC, 2020.

[40] International Water Association, Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs. London, U.K.: IWA Publishing, 2018.

[41] United Nations Environment Programme, A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a Global Assessment. Nairobi, Kenya: UNEP, 2016.

[42] American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. Washington, DC, USA: APHA, AWWA, WEF, 2017.

[43] Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological Profile for Heavy Metals. Atlanta, GA, USA: U.S. Department of Health and Human Services, 2019.

[44] United States Geological Survey, Nutrients in the Nation's Waters: Too Much of a Good Thing? Reston, VA, USA: USGS, 2018.

[45] World Organisation for Animal Health, Waterborne Pathogens and Water Quality Guidelines. Paris, France: OIE, 2016.

[46] European Chemicals Agency, Emerging Contaminants in the Environment: Pharmaceuticals and Personal Care Products. Helsinki, Finland: ECHA, 2021.

[47] World Health Organization, Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed. (Incorporating the First Addendum). Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2017.

[48] Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological Profile for Nickel. Atlanta, GA, USA: U.S. Department of Health and Human Services, 2020.

[49] United States Environmental Protection Agency, Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories. Washington, DC, USA: U.S. EPA, 2012.

[50] Food and Agriculture Organization, Water Quality for Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1. Rome, Italy: FAO, 2014.

[51] European Food Safety Authority, "Scientific opinion on dietary reference values for zinc," EFSA Journal, vol. 13, no. 3, p. 3849, 2015.

[52] United Nations Environment Programme, *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Nairobi, Kenya: UNEP, 2019.

[53] United States Geological Survey, Environmental Effects of Heavy Metals in Aquatic Ecosystems. Reston, VA, USA: USGS, 2016.

[54] Z. U. Rahman and L. Thomas, "Wastewater treatment systems," in Industrial and Environmental Microbiology. London, U.K.: Taylor & Francis, 2026.

[55] A. Khechekhouche and F. Bouchemal, "Performance of a wastewater treatment plant in south-eastern Algeria," Semantic Scholar, 2020.

[56] NIH - National Institutes of Health, "Table 4: Treatment process description and key features," PMC - NCBI, 2016.

[57] NIH - National Institutes of Health, "Fig. 6: Stages of a typical wastewater treatment," PMC - NCBI, 2025.

[58] W. Viessman and M. J. Hammer, Water Supply and Pollution Control, 4th ed. New York, NY, USA: Harper & Row, 1985.

[59] L. K. Wang, N. C. Pereira, and Y. T. Hung, Eds., Biological Treatment Processes, Handbook of Environmental Engineering, vol. 8. Totowa, NJ, USA: Humana Press, 2009.

[60] Seven Seas Water Group, "Types of wastewater treatment plants: Conventional wastewater treatment plants," Seven Seas Water Group, 2024.

[61] H. A. Hawkes, "Biological filters," in Ecological Aspects of Used-Water Treatment, vol. 2. London, U.K.: Academic Press, 1983.

[62] D. D. Mara and H. W. Pearson, "Artificial freshwater environments: Waste stabilization ponds," in Biotechnology, vol. 8. Weinheim, Germany: VCH Verlagsgesellschaft, 1986.

[63] A. Chekima, "Dimensionnement de la station d'épuration de la ville de Kouinine (w. El Oued)," ENSHA - DSpace, 2014.

[64] "Watertable artificial recharge using epurated wastewater El Oued case study (Algeria)," presented at the International Seminar: Water, Climate change, Agriculture and Territorial Development, Setif, Algeria, 2023.

[65] "La bioremédiation des eaux usées par Arthrospira Platensis dans la STEP kouinine," Université of Eloued - DSpace, 2022.

[66] K. P. Lee, T. C. Arnot, and D. Mattia, "A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential," Journal of Membrane Science, vol. 370, no. 1-2, pp. 1-22, 2011.

[67] U. Von Gunten, "Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation," Water Research, vol. 37, no. 7, pp. 1443-1467, 2003.

[68] T. A. Ternes et al., "Ozonation: a tool for removal of pharmaceuticals, contrast media and musk fragrances from wastewater?" Water Research, vol. 37, no. 8, pp. 1976-1982, 2003.

[69] M. N. Chong, B. Jin, C. W. Chow, and C. Saint, "Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review," Water Research, vol. 44, no. 10, pp. 2997-3027, 2010.

[70] J. J. Pignatello, E. Oliveros, and A. MacKay, "Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry," Critical Reviews in Environmental Science and Technology, vol. 36, no. 1, pp. 1-84, 2006.

[71] E. Neyens and J. Baeyens, "A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique," Journal of Hazardous Materials, vol. 98, no. 1-3, pp. 33-50, 2003.

[72] M. Y. A. Mollah, P. Morkovsky, J. A. G. Gomes, M. Kesmez, J. Parga, and D. L. Cocke, "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation," Journal of Hazardous Materials, vol. 114, no. 1-3, pp. 199-210, 2004.

[73] J. N. Hakizimana et al., "Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches," Desalination, vol. 404, pp. 1-21, 2017.

[74] D. T. Moussa, M. H. El-Naas, M. Nasser, and M. J. Al-Marri, "A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges," Journal of Environmental Management, vol. 186, pp. 24-41, 2017.

[75] C. A. Martínez-Huitle and S. Ferro, "Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes," Chemical Society Reviews, vol. 35, no. 12, pp. 1324-1340, 2006.

[76] G. Lettinga, "Anaerobic digestion and wastewater treatment systems," Antonie van Leeuwenhoek, vol. 67, no. 1, pp. 3-28, 1995.

[77] L. Seghezzo, G. Zeeman, J. B. van Lier, H. V. M. Hamelers, and G. Lettinga, "A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors," Bioresource Technology, vol. 65, no. 3, pp. 175-190, 1998.

[78] H. Lin, W. Peng, M. Zhang, J. Chen, H. Hong, and Y. Zhang, "A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives," Desalination, vol. 314, pp. 169-188, 2013.

[79] X. Qu, P. J. Alvarez, and Q. Li, "Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment," Water Research, vol. 47, no. 12, pp. 3931-3946, 2013.

[80] J. Theron, J. A. Walker, and T. E. Cloete, "Nanotechnology and water treatment: Applications and emerging opportunities," Critical Reviews in Microbiology, vol. 34, no. 1, pp. 43-69, 2008.

[81] P. Xu et al., "Use of iron oxide nanomaterials in wastewater treatment: A review," Science of the Total Environment, vol. 424, pp. 1-10, 2012.

[82] M. S. Mauter and M. Elimelech, "Environmental applications of carbon-based nanomaterials," Environmental Science & Technology, vol. 42, no. 16, pp. 5843-5859, 2008.

[83] T. Asano, F. L. Burton, H. L. Leverenz, R. Tsuchihashi, and G. Tchobanoglous, Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2007.

[84] World Health Organization (WHO), Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, vol. 2. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2006.

[85] United States Environmental Protection Agency (USEPA), Guidelines for Water Reuse, EPA/625/R-04/108. Washington, DC, USA: U.S. EPA, 2004.

[86] Food and Agriculture Organization (FAO), Water Quality for Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1. Rome, Italy: FAO, 2014.

[87] "From waste to resource: Cleaner production of geopolymer bricks from sewage sludge via production parameter optimization" (2025)

[88] "Utilization of Sewage Sludge in the Sustainable Manufacturing of Ceramic Bricks" (2025)

[89] "Recycling of sewage sludge ash in cold-bonded artificial lightweight aggregate for sustainable lightweight concrete" (2025)

[90] "Behaviour of sewage sludge based lightweight aggregate in geopolymer concrete" (2024)

[91] "Assessment of geopolymer and cement stabilizers on geotechnical properties of heavy metal-contaminated clay" (2025)

[92] "Removal of toxic metals from sewage sludge by EDTA and hydrodynamic cavitation in a closed-loop process"