



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الكيمياء



مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي في الكيمياء

تخصص كيمياء تحليلية

شعبة علوم المادة

من اعداد الطلبة:

عريف إبراهيم

بن الزوخ فاطمة

بعنوان

استخلاص الأسمدة العضوية والوقود الحيوي (بيوديزل  
وبيوغاز) والمعادن الثقيلة والغازات الحيوية والماء  
المقطر  $H_2O_{(L)}$  من مياه الصرف الصحي

نوقشت علنا يوم: 2026/06/17 أمام لجنة المناقشة:

رئيسا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذة التعليم العالي	زروقي حياة
مناقشا	المدرسة العليا للأساتذة بورقلة	أستاذ التعليم العالي	لزهر بن مبروك
مؤطر	المدرسة العليا للأساتذة بورقلة	أستاذ التعليم العالي	موساوي ياسين
مساعد مؤطر	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ التعليم العالي	معمور حسين

الموسم الجامعي 2026/2025

قَالَ تَعَالَى: ﴿قُلْ هَلْ يَسْتَوِي  
الَّذِينَ يَعْلَمُونَ وَالَّذِينَ لَا يَعْلَمُونَ﴾

(الزمر ٩: ٣٩)



# Congratulation

2026



## اهداء

قال الله تعالى: ﴿يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ۗ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ﴾  
[المجادلة: 11]

أتقدم بأسمى آيات الشكر والتقدير والعرفان بالجميل لكل من ساندني ودعمني في مسيرتي العلمية هذه حتى رأى هذا العمل نور. أهدي ثمرة جهدي هذا بكل حب وإجلال إلى من كانا لي نعم السند والعون ولديا العزيزين أمي الغالية التونسي مسعودة وأبي الغالي محمد فدعواتكم الصادقة وحكم اللامحدود كان لي وقودا لا ينضب وإلى إخواني وأخواتي الذين شاركوني فرحة النجاح والتحدي وكانوا لي خير رفاق الدرب لا خواتي بالخضر وعبد الرحمان وأخواتي الغاليات خيرية ونور اليقين ودعاء. وإلى فضيلة والمرحومة رحاب، وإلى أصدقائي الأعمام ورفاقي الأوفياء محمد وعز الدين عبد الجواد، أصدقاء العمر اسلام خنيفر وإسماعيل، كما أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى جميع أساتذة قسم الكيمياء وإلى كل من ساعدنا بشكل مباشر أو غير مباشر في إنجاز هذا العمل.

الطالب عريف إبراهيم



## اهداء

2026

قال الله تعالى (رَبِّي أُوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَى وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ) [سورة النمل - آية 19]

الى من كانوا النور في طريقي الى أولئك الذين أمنوا بي حتى عندما مللت من الايمان بنفسي الى كل قلب قدم لي دعوة أو كلمة دعم أو صبر في أصعب اللحظات الى أمي العزيزة خضرة بوخيرة التي علمتني أن الأحلام لا تحقق الا بالصبر الى والدي العزيز عمر الذي كان الأمان الذي أتكى عليه كلما ثقلت عليّ تجارب الحياة إلى جدتي الحبيبة المرحومة التي كانت ينبع الحنان، جدتي العزيزة فاطنة ثليب إلى إخوتي وأخواتي محمد بدر الدين ونذير وسيف إلى صديقتي وأختي العزيزة بسمة إلى أحبائي الصغار ساريناد روان و رزان الذين كانوا النور الذي يرشدني في طريقي إلى أخوالي الأعزاء الذين كانوا سندي الدائم خالي العزيز منير خالي حسين وبوجمعة وعلي إلى أساتذتي العزيزتين اللتان كانتا قدوة لي طوال رحلتي الجامعية و كانتا بمثابة شريان الحياة بالنسبة لي، الى أساتذتي حياة زروقي وأستاذتي دقموش مسعودة، هذا النجاح ليس لي وحدي؛ هذا النجاح لكم جميعا وأتقدم بجزيل وعميق الامتنان لقسم الكيمياء من أساتذة و عمال .

الطالبة بن الزوخ فاطمة



## شكر وعرفان

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والصلاة والسلام على معلم البشرية الخير. أتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى الأستاذ المشرف الفاضل موساوي ياسين، والأستاذ المساعد حسين معمور، كما أتوجه بالشكر الجزيل للأستاذة حياة زروقي والأستاذ الفاضل لزه بن مبروك، والأستاذة دقموش مسعودة والأستاذة بن باية أمينة، على كل ما قدموه لنا من دعم وتوجيه ومساندة. كما أتقدم ببالغ التقدير إلى القائمين على محطة تصفية المياه بغرداية، وإلى الطاقم التقني بمخبر تثمين وترقية الموارد الصحراوية **VPRS** و على رأسهم رئيس المخبر البروفسيور بالفار محمد لاخضر و الأرضية التقنية للتحاليل الفيزيوكيميائية **CRAPC** نظرا لتسهيلاتهم ولمساعدتهم القيمة في الجانب التطبيقي لهذا البحث. والشكر موصول إلى أساتذتي الكرام في القسم الذين نهلت من علمهم طيلة مشواري الدراسي، وإلى جميع موظفي وعمال القسم والإدارة الذين نلوا لنا الصعاب برقي تعاملهم وإخلاصهم إلى كل هؤلاء، أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع.

# الفهرس

رقم الصفحة	
I	اهداء
II	اهداء
III	شكر و عرفان
IV	الفهرس
V	قائمة الاختصارات
VI	قائمة الأشكال
VII	قائمة الجداول
1	مقدمة عامة
4	الفصل الأول : استخلاص الأسمدة العضوية و الوقود الحيوي (بيو ديزل و بيو غاز) والمعادن الثقيلة و الغازات الحيوية و الماء المقطر من مياه الصرف الصحي
5	I. معلومات عامة عن المياه الملوثة
5	I-1 تعريف المياه الملوثة
5	I-2 مصادر تلوث المياه
5	I-3 أنواع تلوث المياه
6	I-4 مياه الصرف الصحي
6	I-4-1 تعريف مياه الصرف الصحي
9	I-4-3 المعايير و التركيزات المسموح بها في إطار حماية البيئة و الصحة العامة
10	I-5 - معالجة مياه الصرف الصحي
10	I-5-1 تعريف معالجة مياه الصرف الصحي
10	I-5-2 الهدف من معالجة مياه الصرف الصحي
11	I-5-3 مراحل معالجة مياه الصرف الصحي
11	I-5-3-1 طرق معالجة مياه الصرف الصحي
11	I-5-4-1-1 المعالجة الفيزيائية (المرحلة الأولى)
13	I-5-4-3-1 المعالجة البيولوجية
14	I-5-4-4-1 المعالجة الثالثة
15	تمهيد
15	I-6-1 معالجة الحمأة و استخلاص الأسمدة العضوية (المرحلة الأولى)
15	I-6-1-1 تعريف حمأة مياه الصرف الصحي و أنواعها
15	I-6-2-1 أنواعها
16	I-6-3-1 خصائص الحمأة
18	I-6-4-1 طرق معالجة الحمأة
19	I-6-5-1 تعريف الاسمدة
19	I-6-6-1 استخلاص الأسمدة العضوية من الحمأة

20	7-I- إنتاج الوقود الحيوي (المرحلة الثانية)
20	7-I-1- تعريف الوقود الحيوي
21	7-I-2- إنتاج الوقود الحيوي من الدهون والزيوت المسترجعة
21	7-I-3- إنتاج الغاز الحيوي
21	7-I-4- المقارنة بين الوقود الحيوي والوقود الأحفوري
21	8-I- فصل المعادن الثقيلة (المرحلة الثالثة)
21	8-I-1- تعريف المعادن الثقيلة
22	9-I-3- مكونات خلية التحليل الكهربائي للماء (الالكتروليز)
23	9-I-5- المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)
24	9-I-6- آلية عمل المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)
26	الفصل الثاني: الأجهزة والأدوات المستخدمة
27	تمهيد
27	II-1- تقديم منطقة الدراسة:
27	II-1-1- تعريف منطقة الدراسة (غرداية)
27	II-2-1- الموقع الجغرافي:
27	II-3-1- الموقع الفلكي:
27	II-2- نبذة تاريخية عن المحطة:
27	II-1-2- تقديم محطة التنقية بالقرارة – غرداية
30	II-4-2- الخصائص الفيزيوكيميائية لعينة المرجعية (الماء المقطر) المستعملة:
30	II-5-2- الخصائص الفيزيوكيميائية المقاسة:
41	الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها
42	III-1- نتائج التحاليل الفيزيوكيميائية
42	III-2- النتائج التجريبية لترشيح العينة بواسطة الزيوليت
42	III-3- النتائج التجريبية لترشيح النهائي لعينة
43	III-4- النتائج التجريبية لقياس المعادن الثقيلة
44	III-5- مناقشة نتائج اختبار الحرق للوقود الحيوي
45	III-6- نتائج التحاليل المورفولوجية
45	III-6-1- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة الزيوليت
46	III-6-2- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة نشارة الخشب
47	III-6-3- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة الكربون النشط
49	III-6-4- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة المادة النانوية المغناطيسي $Fe_3O_4(s)$
50	III-6-5- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة الرمل
52	III-7- نتائج التحاليل الطيفية
52	III-7-1- نتائج التحليل الطيفي الذري
60	الخلاصة
62	الملخص
63	المراجع
64	الملاحق
72	الكلمات المفتاحية

قائمة الاختصارات

باللغة الأجنبية (الإنجليزية)	باللغة العربية	الاختصار والرمز
Molar concentration unit	وحدة التركيز المولي	<b>g/mol</b>
Temperature unit	وحدة درجة الحرارة	<b>°C</b>
Global Health Organization	منظمة الصحة العالمية	<b>WHO</b>
The intensity of the transmitted light radiation	شدة الاشعاع الضوئي النافذ	<b>I</b>
The intensity of incident light radiation	شدة الاشعاع الضوئي الساقط	<b>I<sub>0</sub></b>
Absorbency	الامتصاصية	<b>A</b>
Molar concentration	التركيز المولي	<b>C</b>
Absorption coefficient	معامل الامتصاص	<b>ε</b>
Atomic absorption device	جهاز الامتصاص الذري	<b>SAA</b>
Scanning electron microscope	المجهر الالكتروني الماسح	<b>MEB</b>
Nitric acid	حمض النيتريك	<b>HNO<sub>3</sub></b>
Hydrochloric acid	حمض الهيدروكلوريك	<b>HCL</b>
US Environmental Protection Agency	وكالة حماية البيئة الأمريكية	<b>EPA</b>
	اتفاقية الأمم المتحدة	<b>UNCLOS</b>

قائمة الأشكال

رقم الصفحة	عنوان الشكل أو المخطط	الرقم
7	الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لمياه الصرف الصحي	الشكل (1-1)
16	مراحل معالجة مياه الصرف الصحي وتولد أنواع الحمأة المختلفة	الشكل (4-1)
23	مكونات خلية التحليل الكهربائي	الشكل (8-1)
25	المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)	الشكل (9-1)
25	الية عمل المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)	الشكل (10-1)
28	الموقع الجغرافي لولاية غرداية – الجزائر	الشكل (1-2)
29	محطة التصفية بالقرارة – غرداية	الشكل (2-2)
32	جهاز pH متر	الشكل (6-2)
32	جهاز قياس الناقلية الكهربائية (Ec) والأملاح الذائبة الكلية (TDS)	الشكل (7-2)
33	التركيب التجريبي لترشيح العينة	الشكل (8-2)
34	قياس حجم نشارة الخشب وحببيبات الرمل بواسطة عملية الغربلة	الشكل (9-2)
35	مرشح الفحم النشط	الشكل (10-2)
35	مكونات مرشح الزيوليت	الشكل (11-2)
35	قياس المعادن الثقيلة بواسطة الشرائط اللونية	الشكل (12-2)
37	التركيب التجريبي لعملية التقطير	الشكل (13-2)
38	الوقود الحيوي المنتج تجريبيا	الشكل (14-2)
39	جهاز الامتصاص الذري SAA	الشكل (15-2)
40	عينات المجموعة الأولى	الشكل (16-2)
41	عينات المجموعة الثانية	الشكل (17-2)
42	المجهر الالكتروني الماسح MEB	الشكل (18-2)
46	الأس الهيدروجيني pH المقاس للماء المقطر المستخلص (pH = 7)	الشكل (5-3)
47	نتائج اختبار الحرق للوقود الحيوي	الشكل (6-3)
47	صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لعينة الزيوليت	الشكل (7-3)
47	طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة الزيوليت	الشكل (8-3)
48	صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لعينة نشارة الخشب	الشكل (10-3)
47	طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة نشارة الخشب	الشكل (11-3)

48	صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لعينة الكربون النشط	الشكل (3-13)
49	طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة الكربون النشط	الشكل (3-14)
50	صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لعينة مادة النانو المغناطيسي	الشكل (3-16)
50	طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة مادة النانو المغناطيسي	الشكل (3-17)
52	صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لعينة حبيبات الرمل	الشكل (3-19)
53	طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة حبيبات الرمل	الشكل (3-20)
54	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (0) المرجعية	الشكل (3-22)
54	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (1).	الشكل (3-23)
55	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (2).	الشكل (3-24)
55	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (3).	الشكل (3-25)
55	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (4).	الشكل (3-26)
56	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (5).	الشكل (3-27)
57	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (6).	الشكل (3-28)
57	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (7).	الشكل (3-29)
57	منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (8).	الشكل (3-30)
59	قيم تراكيز وشدة الامتصاص الذري (SAA) لعنصر الزئبق (Hg) بدلالة عينات المجموعتين الأولى والثانية مقارنة بالعينة المرجعية brahim0.	الشكل (3-31)

قائمة الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	الجدول
10	معايير تصنيف الملوثات للجريدة الرسمية الجزائرية [18]	الجدول (2-1)
11	المراحل الرئيسية لمعالجة مياه الصرف الصحي	الجدول (3-1)
17	الخصائص الفيزيائية للحمأة وأهميتها [34]	الجدول (5-1)
17	الخصائص الكيميائية للحمأة [34]	الجدول (6-1)
22	تصنيف المعادن الثقيلة	الجدول (7-1)
29	المواد والكواشف الكيميائية المستخدمة	الجدول (3-2)
30	التجهيزات والأجهزة الدقيقة المستخدمة	الجدول (4-2)
30	الأدوات والزجاجيات المخبرية المستخدمة	الجدول (5-2)
44	الخصائص الفيزيائية المقاسة بعد ترشيح العينة بالزبوليت	الجدول (1-3)
45	الخصائص الفيزيائية المقاسة بعد الترشيح النهائي للعينة	الجدول (2-3)
45	القيم التجريبية للمعادن الثقيلة الموجودة في العينة بعد الترشيح النهائي	الجدول (3-3)
46	الخصائص الفيزيائية المقاسة للماء المقطر المستخلص	الجدول (4-3)
48	التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة الزبوليت	الجدول (9-3)
49	التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة نشارة الخشب	الجدول (12-3)
50	التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة الكربون النشط	الجدول (15-3)
52	التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة مادة النانو المغناطيسي	الجدول (18-3)
53	التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة حبيبات الرمل	الجدول (21-3)
72	القيم الحدية الأقصى لمعايير مياه الصرف الصحي المعالجة الموجهة (الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية 2012).	الجدول (32-3)

# مقدمة عامة

بسم الله القائل في محكم تنزيله: ﴿وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ﴾ (الأنبياء: 30)، والصلاة والسلام على من بعث رحمة للعالمين وبعد يواجه العالم في مطلع الألفية الثالثة تحديات مصيرية تتشابك فيها أبعاد البيئة والاقتصاد والسياسة، وتتصدر أزمة المياه والطاقة قائمة هذه التحديات كأبرز عائق أمام التنمية المستدامة. فمع النمو السكاني المتسارع والتوسع الصناعي المهول، أصبح استنزاف الموارد الطبيعية يهدد التوازن البيئي، مما أدى إلى ظهور فجوة طاقة حادة وشح في الموارد المائية العذبة. وفي ظل هذا الواقع، بات من الضروري التوقف عن النظر إلى المخلفات والنفايات بمنظور "التخلص" والبدء بالنظر إليها بمنظور "الاستثمار"، تجسيدا لمبدأ عمارة الأرض الذي أمرنا الله به في قوله: ﴿هُوَ أَنشَأَكُم مِّنَ الْأَرْضِ وَاسْتَعْمَرَكُمْ فِيهَا﴾ (هود: 61)، حيث يقتضي الاستثمار هنا أعمال العقل لابتكار الوسائل التي تحافظ على نعم الله وتنميتها. إن مياه الصرف الصحي، التي طالما اعتبرت عبئاً بيئياً ومصدراً للتلوث، أصبحت اليوم في طبيعة الحلول المبتكرة ضمن ما يعرف بـ الاقتصاد الدائري. فهي ليست مجرد مياه عادمة، بل هي "منجم سائل" يزخر بالعناصر الكيميائية والطاقة الكامنة. وفي الوقت الذي يشهد فيه العالم سباقاً دولياً محمواً نحو إنتاج "الهيدروجين الأخضر" باعتباره وقود المستقبل والركيزة الأساسية للتحول الطاقوي العالمي، تبرز مياه الصرف الصحي كخيار استراتيجي واعد؛ حيث تسعى الدول الكبرى لامتلاك ناصية هذه التكنولوجيا لضمان أمنها الطاقوي وتقليل بصمتها الكربونية [1]. ومن هنا تنبثق إشكالية هذا البحث، التي تتمحور حول كيفية تطوير التقنيات الحديثة لتحويل هذه النفايات السائلة إلى موارد استراتيجية ثقيلة وطاقة نظيفة. فالسؤال الجوهرى هو: كيف يمكننا استخلاص حزمة من الموارد المتكاملة (أسمدة عضوية، وقود حيوي، هيدروجين أخضر، أوكسجين، وماء مقطر) من مصدر واحد، وضمن عملية تقنية تحقق الاستدامة البيئية والجوى الاقتصادية؟ تكمن الأهمية العلمية والعملية لهذه الدراسة في مواكبتها للتوجهات العالمية نحو "المصافي الحيوية" (Biorefineries) وتتجلى أهداف الدراسة في محاور رئيسية: أولها استخلاص الأسمدة العضوية الغنية بالعناصر المغذية لدعم التربة، وثانيها الدخول في معترك الطاقة البديلة عبر إنتاج الوقود الحيوي وغاز الهيدروجين لدعم مسار الانتقال الطاقوي، وثالثها استعادة غاز الأوكسجين والماء المقطر عالي النقاوة لاستخدامات صناعية وتقنية دقيقة. إن هذا البحث لا يسعى فقط لتقديم حلول تقنية، بل يطمح لترسيخ ثقافة "تصنيف النفايات"، حيث تصبح المخرجات الملوثة مدخلات لإنتاج مواد حيوية. وبناءً على ذلك، تنطلق الدراسة من فرضيات علمية تقترح أن الإدارة المتكاملة لمياه الصرف الصحي تتيح استرجاع موارد ذات جودة عالية تنافس المصادر التقليدية، وأن دمج إنتاج الهيدروجين والأوكسجين في عملية المعالجة يرفع من القيمة الاقتصادية للمشروع، مما يجعله مواكباً للتنافس العالمي في مجال الطاقة الخضراء.

الجانب النظري

الفصل الأول

استخلاص الأسمدة العضوية  
والوقود الحيوي ( بيوديزل  
وبيوغاز ) والمعادن الثقيلة و  
الغازات الحيوية والماء المقطر  
من مياه الصرف الصحي

## تمهيد

فرض الارتفاع المتزايد في استهلاك المياه في وقتنا الراهن الناتج عن النمو السكاني وتحسن مستويات المعيشة، إضافة إلى توسع الأنشطة الزراعية والصناعية والسياحية ضرورة البحث عن موارد بديلة. ومن هنا برز الاهتمام بمياه الصرف الصحي كعنصر جوهري في الميزانية المائية للعديد من الدول، مما يستوجب استغلالها بكفاءة. وفي هذا السياق، يسعى هذا الفصل إلى تحديد مفهوم تلوث المياه ومصادره، مع استعراض أبرز الملوثات الفيزيوكيميائية والبيولوجية. كما يتناول المعايير المنظمة (الدولية والجزائرية)، ويقدم شرحاً مفصلاً لأنماط شبكات التطهير ومراحل معالجة مياه الصرف المعتمدة في مختلف المحطات.

## I. معلومات عامة عن المياه الملوثة

## I-1 تعريف المياه الملوثة

## ➤ التعريف العام (المنظور البيئي)

تلوث المياه هو أي تغير فيزيائي أو كيميائي في نوعية المياه، بطريقة مباشرة أو غير مباشرة، يؤثر سلباً على الكائنات الحية، أو يجعل المياه غير صالحة للاستخدامات المنشودة [2].

## ➤ التعريف الإجرائي (المنظور القانوني)

يُعرف التلوث بأنه إدخال الإنسان، بطريقة مباشرة أو غير مباشرة، لمواد أو طاقة في البيئة المائية، مما يترجم إلى آثار ضارة مثل الأذى بالموارد الحية، وتأثر صحة الإنسان، وإعاقة الأنشطة المائية بما في ذلك صيد الأسماك [3].

## I-2 مصادر تلوث المياه

هي متعددة ويمكن تقسيمها إلى:

- مصادر طبيعية وتشمل الغلاف الجوي والمعادن الذائبة وتحلل المواد النباتية والجريان السطحي للأملح والمواد الكيميائية.
- مصادر زراعية وتشمل تعرية التربة وفضلات الحيوانات المواشي والدواجن والأسمدة الكيماوية ومياه الري.
- مياه الصرف وتشمل الصرف الصحي، الصرف الصناعي مركبات البحرية والحوادث البحرية
- مصادر أخرى متنوعة مثل أنشطة البناء والمناجم والمياه تحت الأرض وأماكن تجمع القمامة، وأماكن إنتاج الإسمنت [4].

## I-3 أنواع تلوث المياه

يعد تلوث المياه أحد أكثر أنواع التلوث انتشاراً، حيث يؤثر على جميع أنواع الأسطح المائية. تختلف أنواع تلوث المياه حسب المصدر. فيما يلي بعض الأنواع الشائعة لتلوث المياه:

## ● التلوث الميكروبيولوجي

يحدث بسبب وجود كائنات حية دقيقة مثل البكتيريا (مثل E. coli)، الفيروسات، والبروتوزوا. المصدر الرئيسي هو مياه الصرف الصحي غير المعالجة أو تسرب مياه الصرف إلى المياه الجوفية [5].

## ● التلوث الطبيعي (Natural Pollution)

هو التلوث الذي لا دخل للإنسان فيه، ويحدث نتيجة تغير خصائص الماء بفعل الطبيعة، مثل زيادة ملوحة المياه الجوفية، أو تغير لون ورائحة الماء بسبب سقوط أوراق الأشجار وتحللها، أو جرف التربة (العكارة) بفعل السيول [6].

#### • التلوث الفيزيائي (Physical Pollution)

يشمل التغيرات في الخصائص الفيزيائية للماء كاللون، الطعم، الرائحة، ودرجة العكارة. وينتج غالباً عن المواد الصلبة العالقة أو الجسيمات البلاستيكية (Microplastics) التي تؤثر على نفاذية الضوء في الماء [7].

#### • التلوث الحراري (Thermal Pollution)

يتمثل في ارتفاع أو انخفاض درجة حرارة المسطحات المائية نتيجة تفريغ مياه التبريد للمنشآت الصناعية ومحطات توليد الطاقة. يؤدي ذلك إلى انخفاض مستويات الأكسجين المذاب وصدّات حرارية للأحياء المائية [8].

#### • التلوث الإشعاعي (Radioactive Pollution)

ينتج عن وصول مواد مشعة (مثل الراديوم، واليورانيوم) إلى المصادر المائية، سواء من مخلفات المناجم، أو المحطات النووية، أو الاستخدامات الطبية. هذه المواد لها القدرة على التراكم الحيوي في أنسجة الكائنات الحية [9].

#### • التلوث النفطي (Oil Pollution)

يحدث نتيجة تسرب البترول أو مشتقاته إلى البحار والمحيطات بسبب حوادث الناقلات أو عمليات التنقيب البحرية. يشكل النفط طبقة عازلة تمنع التبادل الغازي بين الماء والهواء وتسبب نفوقاً واسعاً للطيور والأحياء البحرية [10].

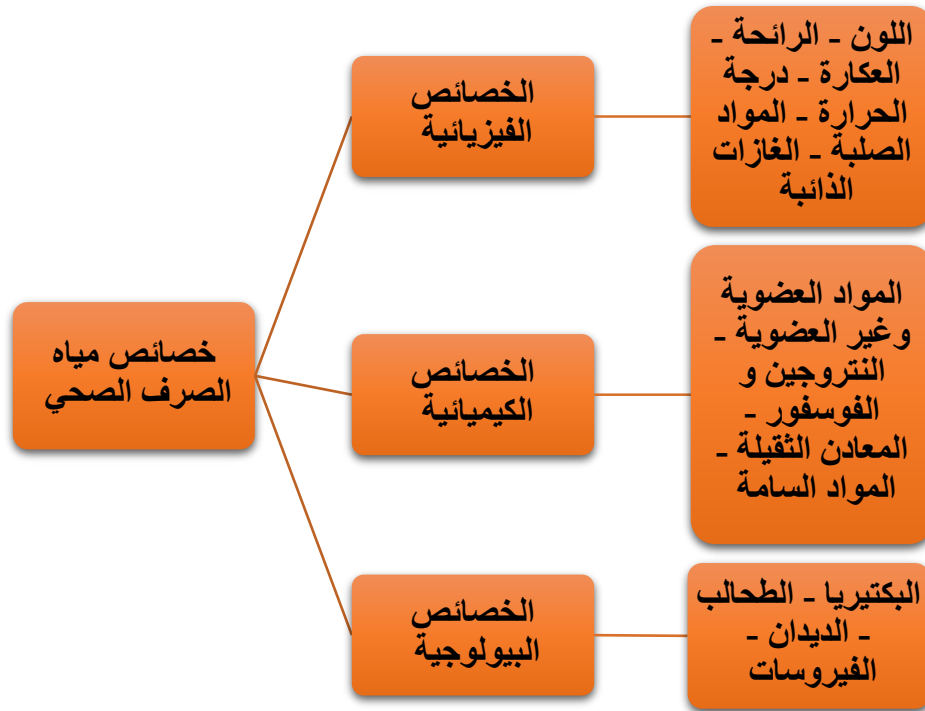
### I-4- مياه الصرف الصحي

#### I-4-1- تعريف مياه الصرف الصحي

تُعرّف المياه المستعملة المنزلية بأنها تلك المياه الناتجة عن الأنشطة اليومية داخل المنازل، والتي تشتمل بصفة أساسية على المخلفات البشرية. ويؤدي اختلاطها بالمواد والأجسام الغريبة إلى تغير جذري في خصائصها الفيزيائية والكيميائية، مما يحولها إلى مياه ملوثة وغير صالحة للاستخدام في الأغراض التي كانت مخصصة لها في الأصل [11].

#### I-4-2- خصائص ومقاييس تصنيف مياه الصرف الصحي

تحدد نوعية مياه الصرف الصحي حسب خصائصها الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية وهي مبينة فالمخطط التالي:



الشكل (1-1): الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لمياه الصرف الصحي .

- درجة الحرارة (T)

تعد درجة الحرارة عاملاً فيزيولوجياً مؤثراً في استقلاب ونمو الكائنات الحية الدقيقة المائية؛ إذ تؤدي دوراً حيوياً في تحديد قابلية ذوبان الأملاح والغازات (لا سيما الأوكسجين المذاب)، بالإضافة إلى تأثيرها المباشر على قيمة الأس الهيدروجيني (pH) وسرعة التفاعلات الكيميائية [12].

- الرقم الهيدروجيني (pH)

وهو لو غار يتم مقلوب تركيز أيون (شاردة) الهيدروجين في المياه المستعملة ويدل على طبيعة المياه من حيث كونها حمضية (pH<7) أو قاعدية (pH>7) أو معتدلة (pH=7) والهدف الرئيسي من قياس PH معرفة ما إذا كانت المياه تشكل وسط مناسب لنمو الحيوي حيث أن كل مجموعة حيوية تملك مجالاً محدداً من ال PH وتحسب بالعلاقة التالية [13].

$$pH = - \text{Log} [ H^+ ]$$

- العكارة (TM)

تُعرّف العكارة بأنها وجود سحابة أو شوائب داخل السائل ناتجة عن أجسام معلقة دقيقة، غالباً ما تكون غير مرئية بالعين المجردة. وتُقاس هذه الخاصية باستخدام جهاز خاص يعمل عبر تسليط أشعة ضوئية لاحتساب وحدة العكارة (NTU)، حيث يتم وضع العينة في أنبوب الجهاز وقراءة النتيجة بشكل مباشر ودقيق. [14].

- الأوكسجين المنحل ( O<sub>2</sub> diss )

إضافة لدوره في عملية التنقية الذاتية للوسط المائي ينحل الأوكسجين في الماء نتيجة عملية التبادل القائمة وبين الطور الغازي (الهواء) والطور السائل (الماء) ويتأثر هذا التبادل بعدة عوامل هي الضغط الجوي وضغط البحار درجة الحرارة وملوحة الماء نظراً لعدم تغير العامل الأول بشكل كبير وارتباط العامل الثاني بدرجة الحرارة فإن العاملين الأخيرين يحددان الكمية المنحلة من الأوكسجين في الماء [13].

#### - المواد العالقة (MES)

تعدّ هذه المواد هي العوالق المرئية في مياه الصرف، وتتنوع بين مخلفات طبيعية كالرمل والحصى، وأخرى بشرية وصناعية كالأوراق والأخشاب والنفايات الصلبة. وتتميز هذه الشوائب بإمكانية فصلها بفعالية عن الوسط المائي عبر طرق فيزيائية أو كيميائية بسيطة، كالترسيب الذي يعتمد على الجاذبية أو الترشيح الذي يحجز الأجسام الصلبة، مما يمهد الطريق لتنقية المياه وتصفيته [15].

#### - الطلب البيوكيميائي للأوكسجين ( $DBO_5$ )

هو كمية الأوكسجين لازمة لتفكيك (أكسدة) المواد العضوية الذائبة عن طريق البكتيريا لتحويلها إلى مركبات بسيطة وفي شروط ثابتة كدرجة الحرارة  $20^\circ$  ولمدة 5 أيام كوسط ملائم للبكتيريا وارتفاع قيمة  $DBO_5$  يدل على تركيز المواد العضوية المنحلة عن طريق البكتيريا ومن نواتج أكسدة الغاز والماء [13].

#### - الطلب الكيميائي للأوكسجين (DCO)

يساوي كمية الأوكسجين اللازمة لأكسدة الكيميائية (ليست حيوية) للمواد العضوية الموجودة في المياه المستعملة وتحويلها إلى مركبات بسيطة وذلك بواسطة مادة كيميائية مؤكسدة وهذا معيار ذو قيمة أكبر عادة من قيمة  $DBO$  لأن جزء من المادة الصلبة القابلة لأكسدة الموجودة في المياه المستعملة لا يمكن تفكيكه (أكسدته) بالفعل الحيوي (أي بتأثير الكائنات العضوية المجهرية) وإنما يجب إضافة مركب مؤكسد إليه لإنجاز عملية الأكسدة وهذا يحدث عادة حين التعامل مع المياه المستعملة الصناعية الواردة في العديد من المراكز الصناعية [13].

#### - الأمونيوم ( $NH_4^+$ )

تُشكّل شوارد الأمونيوم عنصراً رئيسياً في دورة النيتروجين؛ حيث يُعدّ وجودها بتركيز مرتفعة في المياه السطحية مؤشراً واضحاً على حدوث تلوث بيئي ناتج عن تصريف مياه الصرف الصحي في المجاري المائية [16].

#### - شوارد النترات ( $NO_3^-$ )

هي مركب كيميائي يحتوي على ذرة نيتروجين وثلاث ذرات أوكسجين وهي من العناصر الغذائية الأساسية للنباتات توجد في التربة والمياه لكن تركيزها قد يرتفع بسبب الأنشطة البشرية مثل الزراعة والصناعة مما يؤدي إلى مشاكل صحية مثل متلازمة الطفل الأزرق [17].

#### - شوارد النتريت ( $NO_2^-$ )

تمثل شوارد النتريت مرحلة انتقالية من شوارد النتريت وشوارد الأمونيوم ضمن عملية الأكسدة والإرجاع لهما وذلك فإن شوارد النتريت المتواجدة في الوسط المائي ناتجة عن إرجاع النتريت أو

عن أكسدة شوارد الأمونيوم ولا يوجد مصدر طبيعي للنترت (الحايك؛ 1989؛ 2015؛ ABED) [13].

#### - شوارد الفوسفات ( $PO_4^{3-}$ )

هو أيون يتكون من ذرة فوسفور مرتبطة بأربع ذرات أكسجين ويعد من الأيونات السالبة الأكثر شيوعا في الطبيعة يدخل الفوسفات في العديد من العمليات الكيميائية والبيولوجية و قد يرتفع تركيزه بسبب الأنشطة البشرية مما يشكل خطرا على البيئة والكائنات الحية [17].

#### - الناقلية الكهربائية (Ec)

تتضمن المياه الطبيعية نسباً منخفضة من الأملاح المعدنية المتشردة التي تسهم جميعها في تحديد الناقلية الكهربائية للماء؛ وتنتج الناقلية المرتفعة في الوسط المائي إما عن عوامل طبيعية مرتبطة بطبيعة الصخور، أو عن أنشطة بشرية ناتجة عن تصريف مياه الصرف الصحي في المجاري المائية [16].

#### - المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS):

المواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) هي كمية الأملاح المعدنية والمواد العضوية الذائبة في الماء. تقاس TDS بوحدات ملغ/لتر (mg/l) أو جزء في المليون (ppm) وهي مؤشر على جودة المياه وصالحيتها لاستخدامات المختلفة [17].

#### - الكائنات الحية الدقيقة

بعض الصناعات ينتج عنها نوع معين من البكتيريا الممرضة مثل المجازر (المذابح) الآلية والبعض الآخر ينتج عنه طفيليات وفطريات مثل مصانع النشا والخميرة وتحدد الاختبارات البيولوجية على مياه الصرف الصحي وجود البكتيريا الممرضة من عدمه بواسطة اختبار نوع معين من الكائنات المؤشرة وتمثل المعلومات البيولوجية حاجة ملحة لتقييم نوع المعالجة لمياه الصرف الصحي قبل التخلص منها إلى البيئة [13]

#### - المعادن الثقيلة

تعتبر التراكيز الصغيرة لكثير من المعادن مثل النيكل والمنغنيز والرصاص والكروم والكاديوم والزنك والنحاس والحديد بالإضافة للزئبق مكونات ذات أهمية في مياه الصرف الصحي كما أنه يوجد مثل هذه المعادن بكميات مرتفعة سوف تؤثر على تستخدم المياه نظرا لتسميتها لذلك يفضل دائما أن يتم قياس والتحكم في تركيز هذه المواد في المياه (DEGREMONT; 1989) [13].

#### I-3-4 المعايير والتركيزات المسموح بها في إطار حماية البيئة والصحة العامة - المعايير الجزائرية

تعتمد هذه البيانات على الجريدة الرسمية الجزائرية (العدد 41) الصادرة بتاريخ 15 يوليو 2012، والتي تحدد الحدود القصوى للقيم المسموح بها للملوثات في المياه العادمة المعالجة المخصصة لأغراض الري الزراعي، وذلك حفاظا على البيئة والصحة العامة [18].

الجدول(1-2): معايير تصنيف الملوثات للجريدة الرسمية الجزائرية [18].

المقاييس	القيم
درجة الحرارة T	$\leq 30^{\circ}\text{C}$
الرقم الهيدروجيني pH	6.5 – 8.5
المواد العالقة MES	$\leq 30 \text{ mg/L}$
الطلب البيوكيميائي للأكسجين $DBO_5$	$\leq 30 \text{ mg/L}$
الطلب الكيميائي للأكسجين DCO	$\leq 90 \text{ mg/L}$
النيتروجين N	$\leq 30 \text{ mg/L}$
الفوسفات $PO_4^{-3}$	$\leq 02 \text{ mg/L}$
الكروم Cr	$\leq 01 \text{ mg/L}$
المنظفات	$\leq 01 \text{ mg/L}$
الزيوت والدهون	$\leq 20 \text{ mg/L}$
الأوكسجين المذاب	$\leq 5 \text{ mg/L}$
النترتريت $NO_2^-$	$\leq 0.1 \text{ mg/L}$
النحاس Cu	$\leq 5 \text{ mg/L}$
الحديد Fe	$\leq 20 \text{ mg/L}$
المنغنيز Mn	$\leq 10 \text{ mg/L}$
الزنك Zn	$\leq 10 \text{ mg/L}$
المغنيزيوم Mg	$\leq 50 \text{ mg/L}$
الزئبق Hg	$\leq 0.01 \text{ mg/L}$
الرصاص Pb	$\leq 10 \text{ mg/L}$
الكاديوم Cd	$\leq 0.05 \text{ mg/L}$

### 5-I - معالجة مياه الصرف الصحي

#### 1-5-I- تعريف معالجة مياه الصرف الصحي

معالجة مياه الصرف الصحي هي نوع من معالجة مياه الصرف الصحي التي تهدف إلى إزالة الملوثات من مياه الصرف الصحي لإنتاج النفايات السائلة المناسبة للتصريف إلى البيئة المحيطة أو تطبيق إعادة الاستخدام المقصود، وبالتالي منع تلوث المياه من تصريف مياه الصرف الصحي الخام. تحتوي مياه الصرف الصحي على مياه الصرف الصحي من المنازل والشركات وربما مياه الصرف الصحي المعالجة مسبقاً [19].

#### 2-5-I- الهدف من معالجة مياه الصرف الصحي

الهدف العام من معالجة مياه الصرف الصحي هو إنتاج النفايات السائلة التي يمكن تصريفها إلى البيئة مع التسبب في أقل قدر ممكن من تلوث المياه، أو إنتاج النفايات السائلة التي يمكن إعادة استخدامها بطريقة مفيدة ويتم تحقيق ذلك عن طريق إزالة الملوثات من مياه الصرف الصحي. إنه شكل من أشكال إدارة النفايات [20].

#### 3-5-I- مراحل معالجة مياه الصرف الصحي

للمعالجة أربع مراحل رئيسية، تسمى مرحلة ابتدائية ومرحلة أولية (معالجة ميكانيكية)، ومرحلة ثانوية (المعالجة الحيوية) ومرحلة ثالثة (المعالجة الثالثة)

**الجدول(1-3): المراحل الرئيسية لمعالجة مياه الصرف الصحي**

مراحل المعالجة	الهدف من المعالجة
ابتدائية (تمهيدية)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● حماية مرافق المحطة من الأعطال والانسداد عبر الازالة الفيزيائية للعوالق الصلبة والمواد الطافية كالشحوم والرواسب الرملية والعضوية الثقيلة [21] [22].</li> </ul>
أولية (الأساسية)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● تهدف المرحلة الأولية إلى حماية معدات المحطة من التآكل والانسداد عبر تهدئة تدفق المياه وتصفيته ميكانيكياً من الشوائب الصلبة والكبيرة.</li> <li>● إزالة الرمال المترسبة وقشط الزيوت والدهون العائمة، لضمان رفع كفاءة عمليات المعالجة الحيوية والكيميائية اللاحقة</li> </ul>
ثانوية (متممة)	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ تفكيك المواد العضوية المتبقية في المياه العادمة وتحويلها الى مواد بسيطة من خلال استثمار النشاط الحيوي للكائنات الدقيقة المحللة وتوفير الظروف المثالية لعملها [23].</li> </ul>
ثالثية (متقدمة)	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ التخلص من الملوثات الدقيقة والمستعصية كالأملح الثقيلة والنترات والمركبات العضوية التي لم تزلها المراحل السابقة</li> </ul>

**I-5-3- طرق معالجة مياه الصرف الصحي**

تعتمد عملية تصفية مياه الصرف الصحي على تكامل ثلاثة أنماط من المعالجة: الفيزيائية، الحيوية، والكيميائية. وتتنظم هذه العمليات ضمن ثلاثة مراحل متتابعة؛ تبدأ بـ "مرحلة ما قبل المعالجة" والتي تركز أساساً على العمليات الفيزيائية كخطوة مشتركة في كافة الأنظمة. تتبعها المرحلة الثانية التي تعتمد على الوسائط البيولوجية، وصولاً إلى المرحلة الثالثة والختامية التي تُستخدم فيها التقنيات الكيميائية. وتُعد المعالجة الفيزيائية المدخل الأساسي للعملية، حيث تستهدف تحسين الخصائص الأولية للمياه وتقليل عبء الملوثات، مما يضمن رفع كفاءة المراحل اللاحقة داخل المحطة.

**I-5-4-1- المعالجة الفيزيائية (المرحلة الأولى)**

هي أول مراحل المعالجة وتهدف إلى تحسين مواصفات مياه الصرف الداخلة للمحطة وذلك بتقليل المواد الملوثة بها مما يساعد على رفع كفاءة المعالجة لمياه الصرف الصحي [24].

**1-الغزيلة**

تعتبر عملية الغزيلة أولى خطوات معالجة المياه، حيث تهدف إلى التخلص من الأجسام الصلبة الكبيرة والألياف غير الذائبة بنسبة تتراوح بين 20% و30%. تتم هذه المرحلة عبر تمرير المياه في قناة مزودة بحواجز قضبان معدنية تحجز النفايات كالبلستيك والورق، وذلك لضمان تجانس المياه وحماية أجهزة المحطة في المراحل الموالية من أي ضرر أو انسداد [13].

**2-نزع المواد كبيرة الحجم**

تبدأ أولى مراحل المعالجة بعملية فصل ميكانيكي للمواد الطافية والعوالق الصلبة فور تدفق المياه الخام إلى المحطة؛ حيث يتم تمرير المياه عبر منظومة من المصافي المعدنية ذات المسامات

المعايرة بدقة لعزل الأجسام الصلبة كبيرة الحجم. وتُعد هذه الخطوة إجراءً وقائياً حتمياً لضمان سلامة المنشآت الميكانيكية وحمايتها من التآكل أو الانسداد، مما يضمن استمرارية تشغيل وحدات المعالجة اللاحقة بكفاءة [23].

### 3-نزع الرمال والحصى

تتمثل هذه المرحلة من المعالجة الأولية في إزالة الحصى والرمل والجزيئات الصلبة الداخلة مع المياه العادمة، وذلك عبر استخدام أحواض الترسيب المهواة من الأسفل؛ حيث تعتمد آلية عملها على خلق حركة هرمية متداخلة مع تحريك دائري للمياه، مما يضمن فصل الرمال بكفاءة عالية لترسب في القاع ثم تُفرغ وتُنزع بشكل نهائي [25].

### 4-الترسيب

تتمثل الغرض الأساسي من عملية الترسيب في التخلص من أكبر قدر ممكن من المواد العالقة بالاعتماد على قوة الجاذبية؛ حيث تُوجّه المياه عبر أحواض ترسيب أولية تتيح فصل حوالي 50% من المحتوى الصلب لمياه الصرف، وإزالة نسبة تتراوح بين 40% إلى 60% من الجزيئات الصلبة الثقيلة [25].

### I-5-4-2- المرحلة الثانية فصل المكونات الصلبة الدقيقة

#### 1- حوض إزالة الرمال

وهو حوض ذو زمن مكوث قصير لإزالة الرمال الدقيقة والثقيلة الوزن سريعة الترسيب ذات القطر (0.1- 0.2) مم وتصمم الأحواض هذه بحيث تكون سرعة الجريان 0.3 م/ث [13].

#### 2- حوض الترسيب الأولي

خلال هذه المرحلة تمر مياه الصرف الصحي إلى أحواض الترسيب التي تتلقى ترسيب أولى للجزيئات الثقيلة بالجاذبية وهذا الترسيب يسمح بنزع 50% من مجموع المحتوى الصلب لمياه الصرف الصحي ومن 40%-60% من الجزيئات الثقيلة الصلبة [13].

#### 3-نزع الزيوت والدهون

ويتم نزع الدهون والزيوت الطافية بواسطة كاشطات وهي الطريقة المستعملة بكل محطات التنقية على مستوى الوطن [13].

#### ❖ حوض نزع الزيوت

تعتمد عملية إزالة الزيوت والشحوم في محطات المعالجة على نوعين من الأحواض: الساكنة والمهواة، وتعد الأخيرة الأكثر شيوعاً وفعالية في فصل المواد الطافية. وتجرى هذه العملية بطرق متنوعة، أبرزها وأكثرها استخداماً الإزالة الميكانيكية؛ حيث يعتمد هذا النظام على شفرات بلاستيكية تتحرك فوق سطح الحوض في اتجاه معاكس لجريان الماء، مما يضمن تجميع الزيوت والفحوم الهيدروجينية والتخلص منها بدقة وكفاءة عالية [26].

### I-5-4-3- المعالجة البيولوجية

تعتبر هذه المرحلة الركيزة الأساسية في المعالجة البيولوجية، حيث يتم فيها القضاء على المادة العضوية القابلة للتحلل بواسطة الكائنات الحية الدقيقة في وسط هوائي؛ إذ تعمل هذه الأخيرة على

امتصاص المواد العضوية الملوثة وتفكيكها، اعتماداً على النشاط الحيوي للبكتيريا الهوائية التي تحول الملوثات إلى نواتج طبيعية في وجود الأكسجين [25].

### ➤ طرق المعالجة المركزة

#### 1- المعالجة بالمرشحات البيولوجية

تتكون وحدات المرشحات البيولوجية من أحواض ذات جدران و قاع غير منفذة دائرية أو مربعة الشكل مملوءة بالحصى حيث يتم توزيع مياه المجاري بعد خروجها من حوض الترسيب الابتدائي ( بواسطة مواسير مثقبة تدور بسرعة محددة و أثناء دورانها تندفع المياه من الثقوب وتسقط على سطح المرشحات و تتخلل فجوات الحصى مكونة طبقة شبه هلامية على سطح الحصى حيث تحتوي هذه الطبقة الهلامية على الملايين البكتيريا و الكائنات الدقيقة التي تقوم بامتصاص الأكسجين ( الموجود في الهواء المتخلل لمسام الحصى لتؤكسد المواد العضوية و بين فترات و أخرى تفقد المواد الهلامية قدرتها على الالتصاق بحبيبات الحصى و تندفع من الماء مما يستوجب استعمال أحواض ترسيب ثانوية تلي المرشحات لحجز هذه المواد [13].

#### 2- الأقراص البيولوجية

تعتمد هذه التقنية على أقراص دوارة مغمورة جزئياً في مياه الصرف، تعمل كدعامة لنمو كائنات مجهرية تشكل فوق سطحها مجتمعات حيوية قادرة على تنقية المياه. يضمن المحور الذي يربط الأقراص استمرارية المزج والتهوية، مع ضرورة الترسيب المسبق للملوثات السائلة لتفادي انسداد الدعامة المعدنية. وفي المرحلة الختامية، يتم التخلص من الحمأة المنفصلة عن الأقراص عبر عملية التوضيح [27].

#### 3- المعالجة بالحمأة المنشطة

تعد تقنية الحمأة المنشطة من أنجح وأكثر نظم المعالجة البيولوجية الهوائية انتشاراً في مختلف التجمعات السكنية، وهي نظام مستمر يضمن تلامس الكائنات الدقيقة مع المواد العضوية داخل أحواض تهوية صناعية في حالة احتياج مستمر. تعتمد العملية على امتصاص البكتيريا للملوثات وتشكيل كتل حيوية تُعرف بالحمأة المنشطة، والتي يتم فصلها لاحقاً في خزانات الترسيب الثانوي؛ حيث يُعاد تدوير جزء منها لتعزيز النشاط البكتيري في الأحواض، بينما تُجمع الحمأة الزائدة لمعالجتها بالحرق أو إعادة استخدامها في القطاع الزراعي [28].

### ➤ طرق المعالجة الموسعة

#### 1- البحيرات الطبيعية

تعد هذه الطريقة من الحلول البيئية والاقتصادية المستدامة في معالجة المياه، حيث تحاكي عملية التنقية الذاتية الطبيعية عبر التدفق البطيء للماء داخل أحواض متخصصة. وتعتمد العملية بشكل جوهري على الكائنات الحية الدقيقة التي تُحلل المادة العضوية وتحولها إلى عناصر معدنية، مدعومةً بعاملين طبيعيين هما الجاذبية التي تضمن ترسب الملوثات، وضوء الشمس الذي ينشط التركيب الضوئي ويقضي على مسببات المرضية. ورغم كفاءتها العالية التي تصل إلى 90% وكونها غير مستهلكة للطاقة الميكانيكية أو الكهربائية، إلا أنها تظل حساسة للظروف المناخية، مما يجعل فاعليتها محدودة في المناطق الباردة [29].

#### 2- البحيرات المهواة

تُعتبر البحيرات المهواة من الحلول البيولوجية الفعالة لمعالجة مياه الصرف الصحي، خاصة في المناطق الصحراوية، حيث تعتمد تقنياً على مبدأ التدفق الهيدروليكي البطيء للمياه داخل أحواض ذات مساحات شاسعة. وتتم عملية التنقية من خلال نشاط حيوي متكامل يجمع بين البكتيريا والطحالب؛ إذ تقوم البكتيريا بتفكيك الحمل العضوي الملوث عن طريق الأكسدة البيولوجية، مستعينةً بالأكسجين المذاب الناتج عن التهوية وعملية التركيب الضوئي في وجود أشعة الشمس. وتتراوح مدة مكوث المياه داخل هذه المنظومة من يومين إلى ستة أيام أو أكثر، تتبع خلالها مساراً تدريجياً ينتقل من حوض إلى آخر ببطء، مما يضمن تكرار عمليات التحلل والترسيب حتى الوصول إلى أعلى مستويات المعالجة المطلوبة في الأحواض النهائية [30] [31].

### 3- المعالجة باستعمال النباتات

ان المعالجة بالنباتات (الأراضي الرطبة) تعتبر مناسبة لمعالجة المياه في المجمعات الصغيرة والمتوسطة الحجم، ويمكن استخدامها لمعالجة مياه المجاري المنزلية أو الصناعية أو لمعالجة مياه الأمطار أو معالجة المياه الملوثة [13].

#### I-4-4-5- المعالجة الثالثة

تُعدّ المعالجة المتقدمة ضرورة حتمية لتجاوز قصور المراحل الثانوية، التي قد تعجز عن حجز الملوثات الدقيقة والمواد العضوية صعبة التحلل. وتبرز عملية التطهير بالكلور كحل أساسي للقضاء على الكائنات الدقيقة، رغم ما تتطلبه من تركيزات عالية وفترات اتصال طويلة، وما ينتج عنها من سموم مائية تستوجب إجراء عملية نزع الكلور قبل التصريف؛ وذلك لضمان الحصول على مياه نقية ذات محتوى  $DCO_5$  منخفض، تكون آمنة بيئياً وصالحة للاستخدام في المسطحات المائية أو الري الزراعي [26].

### تمهيد

تتحول مياه الصرف الصحي في منظور العلم الحديث من عبء بيئي إلى "منجم سائل" ومورد استراتيجي متكامل؛ حيث تُستخلص منها الأسمدة العضوية الغنية بالفوسفور والنيتروجين لدعم الزراعة، وتُعزل المعادن الثقيلة لاستخدامات صناعية متقدمة، بينما يُؤد "الغاز الحيوي" منها كوقود حيوي يحقق الاكتفاء الذاتي لمحطات المعالجة. ومن خلال تقنيات التحليل الكهربائي المتقدمة باستخدام المياه المعالجة، يتم فصل جزيئات الماء لإنتاج غاز الأكسجين وغاز الهيدروجين الأخضر، مع تنقية المياه لتصل إلى درجة "الماء المقطر" فائق النقاء، وهو ما يضع هذه العملية في قلب سباق دولي محموم للسيطرة على سوق الهيدروجين بوصفه "وقود المستقبل". إذ تسعى القوى العالمية اليوم لضمان أمنها الطاقوي عبر مشاريع الربط الدولي واستغلال مصادر الطاقة المتجددة، مما يجعل استعادة الموارد من مياه الصرف ركيزة أساسية في التحول العالمي نحو الاقتصاد الأخضر والحياد الكربوني.

## I-6- معالجة الحمأة واستخلاص الأسمدة العضوية (المرحلة الأولى)

### I-6-1- تعريف حمأة مياه الصرف الصحي وأنواعها

تُعرف الحمأة (بالإنجليزية: sludge) بأنها خليطٌ عضويٌّ كثيف ولزج، ينتج من المواد العالقة الصلبة المتبقية بعد الانتهاء من عملية المعالجة لمياه الشرب، والمعالجة الهوائية أو اللاهوائية لمياه الصرف الصحي، وتعد الحمأة بحد ذاتها من النفايات التي قد تلحق الأضرار بالبيئة [32].

### I-6-2- أنواعها

يمكن تقسيم أنواع الحمأة لمصدر تولدها والمكان التي ترسبت فيه إلى الأنواع التالية [33].

#### ❖ الحمأة الابتدائية

تُعرف الحمأة الابتدائية (أو الخام) بأنها تلك الرواسب الصلبة الناتجة عن عملية الترسيب الميكانيكي للمواد العالقة داخل أحواض الترسيب الابتدائية؛ وهي مادة تمتاز برائحة منفرة نتيجة طبيعتها العضوية غير المستقرة، كما يتسم تركيبها الفيزيائي بمحتوى مائي مرتفع جداً، حيث تشكل الرطوبة فيها نسبة تتراوح ما بين 95% إلى 97% [33].

#### ❖ الحمأة المنشطة

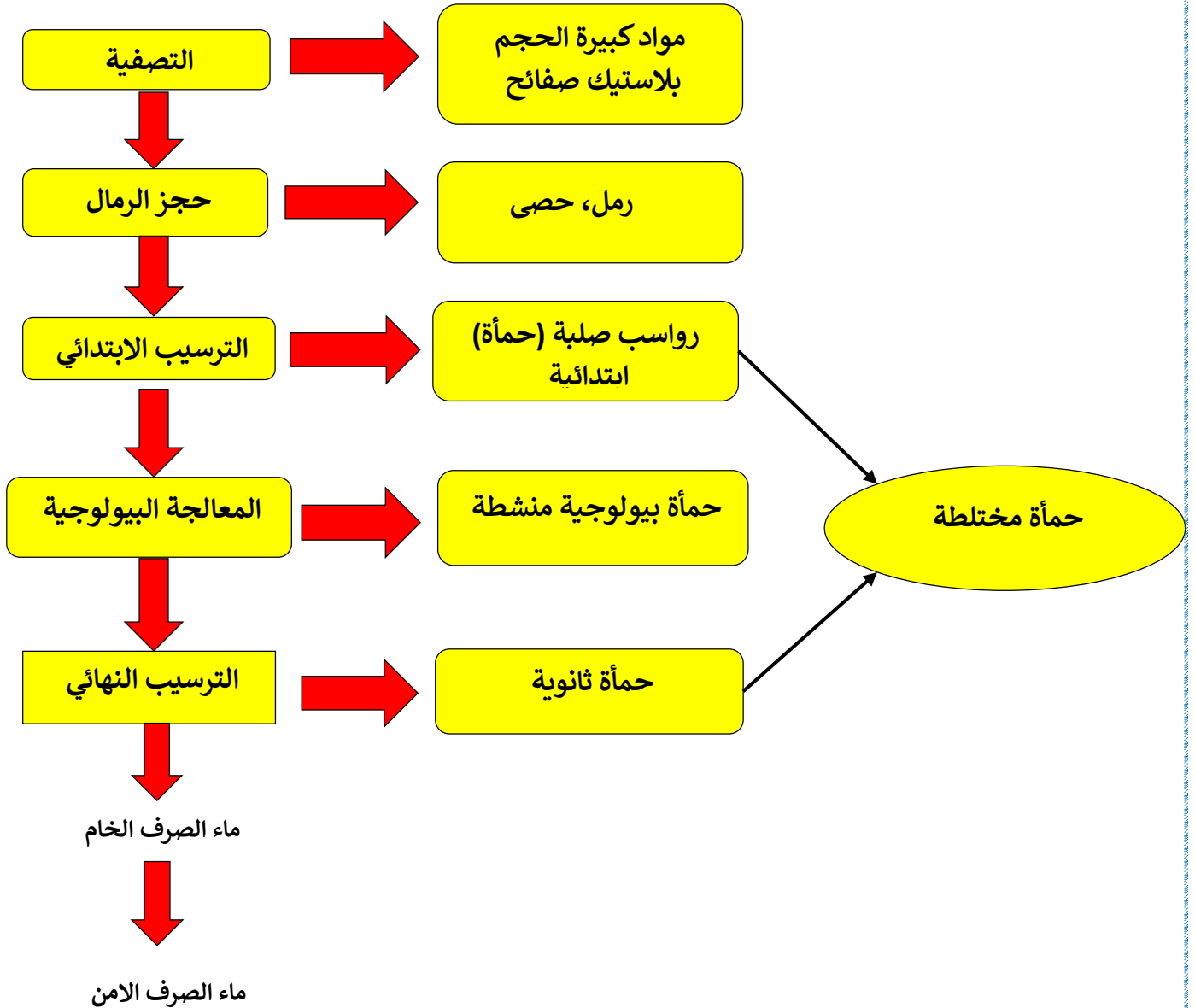
تُعرف الحمأة الناتجة عن أحواض الترسيب النهائية التي تلي المعالجة البيولوجية بالحمأة المنشطة، وهي تتميز بخلوها من الروائح الكريهة نظراً لتعرضها المستمر لعمليات تهوية قوية، إلا أنها تحتوي على نسبة مياه مرتفعة جداً تصل إلى 99% أو أكثر. وبسبب صعوبة فصل الماء عن موادها الصلبة، يُعد تجفيفها مباشرة في الأحواض عملية غير مجدية اقتصادياً؛ لذا يُلجأ إلى تقنيات هضم الحمأة وتخميرها، أو استخدام معالجات كيميائية متخصصة لخفض محتواها المائي وتقليص حجمها إلى قدر مقبول يسهل التعامل معه [33].

#### ❖ الحمأة المترسبة كيميائياً

تُعد العمليات الكيميائية وسيلة فعالة وسريعة لإتمام عملية الترسيب في محطات معالجة مياه الصرف الصحي والصناعي، إلا أن التحدي الرئيسي يكمن في إنتاج حمأة ذات محتوى مائي مرتفع، مما يُصعب من عملية تجفيفها مباشرة في الأحواض المخصصة؛ وهو ما يتطلب إخضاعها لعملية تخمير مسبقة قبل التخلص النهائي منها لضمان كفاءة التعامل مع مخلفاتها [33].

❖ الحمأة المهضومة (المخمرة):

تنتج الحمأة المهضومة عن عمليات تخمر بيولوجية تتم في ظروف لاهوائية (Anaerobic)، حيث تعمل البكتيريا اللاهوائية على تحليل المواد العضوية واستخلاص الطاقة منها دون الحاجة للأكسجين. تهدف هذه العملية إلى أكسدة المواد القابلة للتحلل، وخفض كتلة الحمأة بنسب تتراوح بين (25-47%)، مع تسهيل الفصل التام للمواد الصلبة عن السوائل. وتتسم الحمأة الناتجة بتجانسها ولونها القاتم ورائحتها المحتملة، كما تمتاز بانخفاض محتواها المائي، مما يجعلها مهيأة للتجفيف النهائي في الأحواض المخصصة لذلك [33].



الشكل (1-4): مراحل معالجة مياه الصرف الصحي وتولد أنواع الحمأة المختلفة

I-3-6- خصائص الحمأة

للحمأة مجموعة من الخصائص الفيزيائية الكيميائية والبيولوجية والتي يمكن تلخيصها كمايلي: [34].

➤ الخصائص الفيزيائية

الجدول (5-1): الخصائص الفيزيائية للحمأة وأهميتها [34].

أهميتها	الخاصية
لمعرفة كمية الماء اللازمة للمعالجة والتحكم في لزوجة الحمأة أثناء الضخ والتجفيف	المواد الصلبة
لتقييم مقاومة التدفق و تصميم عمليات الضخ و الخلط و نقل الحرارة بشكل صحيح	اللزوجة
لتحديد مدى قدرة الحمأة على الترسيب في الماء	الكثافة النوعية
لمعرفة مقدار الانخفاض في الحجم تحت الضغط لتسهيل عمليات التجفيف	الانضغاطية
لفهم تأثيرها المباشر على كفاءة عمليات الترسيب والترشيح	حجم الجسيمات
للتأكد من قدرة الجزيئات على التجمع مما يضمن نجاح الترسيب والتجفيف	التلبد

➤ الخصائص الكيميائية

ان التركيب للحمأة متنوع ويحدد إمكانية استخدامها بشكل مفيد أو طبيعتها الخطرة وتتميز الحمأة بخائص كيميائية التالية [34].

الجدول (6-1): الخصائص الكيميائية للحمأة [34].

الوصف والتأثير التقني	الخاصية الكيميائية
تمثل الوقود الأساسي لإنتاج الطاقة الحيوية (الميثان) و عنصر رئيسي في التحلل البيولوجي	المواد العضوية
تشكل قيمة سمادية عالية للزراعة لكنها تتطلب رقابة لمنع تلوث المياه السطحية	العناصر الغذائية (N , P)
تضم عناصر كرساوص و الزنك و تركيزها يحدد ما إذا كانت صالحة للزراعة أم نفايات خطيرة	المعادن الثقيلة
يتحكم في سرعة النشاط البكتيري و كفاءة التفاعلات الكيميائية و مدى تآكل المعدات	الرقم الهيدروجيني (PH)
تحمي عملية الهضم اللاهوائية من الانهيار بسبب الأحماض	القلوية
تؤثر على ملوحة التربة عند الاستخدام الزراعي و على نشاط الكائنات الدقيقة في المعالجة	الأملاح غير العضوية
تمثل بقايا الأدوية و البلاستيك الدقيق و هي التحدي الأحداث لضمان السلامة الصحية و البيئية	الملوثات الناشئة

➤ الخصائص البيولوجية

تعد الخصائص البيولوجية ذات أهمية خاصة لفهم مخاطر مسببات الأمراض وفعالية طرق العلاج البيولوجي و من أهم خصائصها البيولوجية ما يلي [34].

- ✓ تحتوي الحمأة على مجموعة مختلفة من الكائنات الدقيقة منها ما هو نافع) يساهم في المعالج البيولوجية) ومنها ما هو ممرض
- ✓ يحدد النشاط الأيضي للميكروبات معدل التحلل و إنتاج الغاز داخل الحمأة

- ✓ تحتوي الحمأة غير المعالجة على تركيزات عالية من الكائنات الدقيقة المسببة للأمراض
- ✓ تهدف عمليات المعالجة الفعالة الى تقليل هذه المسببات المرضية أو القضاء عليها مما يجعل المنتج النهائي امنا للاستخدام والتداول المحتمل

#### I-4-6- طرق معالجة الحمأة

##### ❖ التكثيف (التخين)

عادة ما يكون التخين هو الخطوة الأولى في عملية معالجة الحمأة. تُجمع الحمأة الناتجة من عمليات التنقية الأولية والثانوية (غالبًا بعد إضافة بعض العوامل الكيميائية المُنقية) لتكوين كتلات أكبر وأكثر سرعة في الترسيب. بعد ذلك، تُكثف الحمأة الأولية حتى تحتوي على نحو 10% من المواد الصلبة [35]، بينما تُكثف الحمأة الثانوية حتى تحتوي على نحو 4% من المواد الصلبة. عادة ما تتشابه عوامل التكثيف مع عوامل التنقية لكن بإضافة آلية التقليب. في بعض الحالات، تخضع الحمأة المعالجة التي تحتوي على نسبة أقل من 10% إلى عملية معالجة إضافية، بينما يعود الفائض السميك ليدخل في عملية معالجة أخرى. [36].

##### ❖ التجفيف (نزع المياه)

يُمكن تقليل محتوى الحمأة من الماء عن طريق عمليات الطرد المركزي أو الفلترة أو بالتبخير لتقليل تكلفة النقل أو لتحسين ملاءمتها لعملية التسميد. في بعض الاحيان يكون الطرد المركزي عملية ضرورية لتقليل حجم الحمأة قبل دخولها في عملية الفلترة أو التبخير. يحدث الترشيح من خلال تمرير الحمأة فوق مصارف سفلية تتكون من طبقات من الرمال الجافة، أو من خلال عملية ميكانيكية منفصلة بمكبس فلترة الحزام (أو الآلة الحزامية الأوتوماتيكية للترشيح). يعود السائل المُرشح والمواد الصلبة المُكثفة مرة أخرى للدخول في عملية المعالجة التالية. بعد انتهاء عملية نزع الماء، يُمكن التعامل مع الحمأة كمواد صلبة تحتوي على ما بين 50% إلى 75% من الماء. عادة ما يتم التعامل مع الحمأة عالية الرطوبة التي خضعت لعملية نزع الماء كمواد سائلة [37].

##### ❖ تقنيات المعالجة الجانبية (الفرعية)

ينتج عن تقنيات معالجة الحمأة المستخدمة للتخين أو لنزع المياه من الحمأة مُنتجين: الحمأة المُتخنة أو منزوعة الماء والجزء السائل الناتج عن عملية المعالجة الذي يُسمى سائل معالجة الحمأة. يتطلب هذا السائل المزيد من عمليات المعالجة لاحتوائه على نسبة عالية من النيتروجين والفسفور، خصوصًا إذا تعرضت الحمأة للهضم اللاهوائي. يُمكن أن تحدث عملية المعالجة في محطات الصرف الصحي نفسها (من خلال إعادة تدوير السوائل الناتجة من عملية معالجة الحمأة لتدخل في عملية معالجة جديدة لمزيد من التنقية) أو من خلال عملية معالجة منفصلة [38].

#### 1- الهضم

تُعالج الحمأة باستخدام العديد من التقنيات الهاضمة المختلفة، والتي يكون الغرض منها تقليل كمية المواد العضوية وأعداد الكائنات المجهرية الدقيقة المُسببة للأمراض والموجودة في المواد الصلبة بالحمأة. يُعتبر الهضم اللاهوائي والهضم الهوائي والتسميد أكثر الخيارات شيوعًا في معالجة الحمأة. تُوفر عملية هضم الحمأة العديد من المزايا المادية عن طريق تقليل حجم وكتلة الحمأة إلى نحو 50%، وتوفير الغاز الحيوي كمصدر متاح للطاقة.

#### 1-1-الهضم اللاهوائي:

هو عملية بكتيرية تُنفذ في غياب الأوكسجين. يُمكن أن تُستخدم هذه العملية أيضاً في وجود هضم الحراري، حيث تُخمر الحماة في خزانات تحت درجة حرارة مرتفعة لنحو 55 درجة مئوية، أو تحت درجة حرارة معتدلة لنحو 36 درجة مئوية. على الرغم من أن الهضم الحراري يوفر الكثير من الوقت إلا أنه أكثر تكلفة في استهلاك الطاقة بسبب تسخين الحماة. تتلخص عملية الهضم اللاهوائي في إنتاج غاز الميثان واستخدامه لتوليد طاقة وحرارة تحقق الاكتفاء الذاتي للمحطات، إلا أنها تظل محكومة بعيبي التكلفة المرتفعة والمدة الزمنية الطويلة [39] [40].

### 1-2-الهضم الحراري:

يُعتبر الهضم الحراري المُعتدل وسيلة شائعة لمعالجة الحماة في محطات مياه الصرف الصحي. حيث توضع الحماة في خزانات ضخمة لنحو 12 يوماً لتسمح بحدوث عملية المعالجة على أربع مراحل ضرورية لإتمام عملية الهضم، وهي التحلل المائي وتكوين الحمض وتكوين الأسيتون وتكوين الميثان. في هذه العمليات الأربع، تتفكك السكريات والبروتينات المُعقدة لتكوّن مركبات أبسط مثل الماء وثاني أكسيد الكربون والميثان

### 1-3-الهضم الهوائي:

هو عملية بكتيرية تُنفذ في وجود الأوكسجين كما في عملية الحماة المُنشطة. في ظل الظروف الهوائية، تستهلك البكتيريا المواد العضوية الموجودة في الحماة لتنتج ثاني أكسيد الكربون. بمجرد نفاذ المواد العضوية في الحماة تموت البكتيريا لتتغذى عليها بكتيريا أخرى فيما يُعرف بالتنفس الداخلي-ذاتي المنشأ-. في هذه العملية تُختزل الموا الصلبة الموجودة في الحماة بشكل كبير. دائماً ما تكون التكاليف الرأسمالية للهضم الهوائي أقل من تكاليف الهضم اللاهوائي بسبب إتمام العملية بشكل أسرع من الهضم اللاهوائي. ومع ذلك فإن تكاليف تشغيل عملية الهضم الهوائي أكبر من الهضم اللاهوائي بسبب الطاقة المُستخدمة في المُحركات والمضخات والمنفخات التي تدعم سير العملية بالأوكسجين، لكن الآن توجد العديد من التطورات التكنولوجية التي تتضمن استخدام أنظمة لمرشحات هوائية غير كهربائية تستخدم تيارات الهواء الطبيعي في عملية التهوية بدلاً من الآلات الكهربائية مما يقلل التكلفة بشكل كبير [41].

### 1-6-5-تعريف الاسمدة

السماد العضوي هو سماد طبيعي يتكون من مخلفات الكائنات الحية، ويعتمد الكثير من المزارعين على إضافة السماد العضوي إلى التربة، وتجنب السماد الكيميائي الذي يقوم بإجهادها، ويتم إضافة الميكروبات المفيدة إلى التربة حتى يتمكن السماد العضوي من تفكيك المغذيات وتحويلها إلى شكل معدني سهل الامتصاص من قِبل النباتات، على عكس السماد الكيميائي الذي يقوم بإمداد النبتة بالمعادن مباشرة [42].

### 1-6-6-استخلاص الاسمدة العضوية من الحماة

يتم انتاج الاسمدة العضوية من مياه الصرف الصحي بأحد الطرق التالية:

#### ❖ المعالجات الكيميائية الحرارية ذات درجات الحرارة العالية:

في عمليات المعالجة الكيميائية الحرارية، تستخدم درجات الحرارة المرتفعة لتحويل الفوسفور في أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى إلى أشكال أكثر قابلية للذوبان، مما يؤدي إلى إنتاج أسمدة الفوسفور والبولتاسيوم. هذه العملية لا تجعل الفوسفور متاحاً حيوياً للنباتات فحسب، بل تساعد أيضاً في تقليل تركيز المعادن الثقيلة في منتجات الأسمدة النهائية (Herzel et al., 2021) [43].

#### ❖ تسميد حماة مياه الصرف الصحي:

يظل التسميد أحد أكثر الطرق فعالية لتحويل حمأة مياه الصرف الصحي إلى أسمدة. من خلال العمل الميكروبي، يقوم التسميد بتكسير المواد العضوية وإنتاج مواد غنية بالديبال تعمل على تحسين بنية التربة، وتزيد من احتباس الماء، وتعزز توافر العناصر الغذائية (Kominko et al., 2017). غالبًا ما يتم دمج حمأة الصرف الصحي مع إضافات معدنية أثناء عملية التسميد لإنتاج الأسمدة العضوية المعدنية، والتي تقدم فوائد كل من المواد العضوية والمغذيات غير العضوية. هذه الأسمدة مفيدة لأنها تطلق العناصر الغذائية تدريجيًا، مما يوفر إمدادًا ثابتًا من العناصر الغذائية للنباتات مع تعزيز صحة التربة على المدى الطويل (Kominko et al., 2017) [44].

### 7-I- إنتاج الوقود الحيوي (المرحلة الثانية)

#### 1-7-I- تعريف الوقود الحيوي

يُعبّر مصطلح الوقود الحيوي (بالإنجليزية: Biofuel) عن الوقود المشتق من أي كتلة حيوية؛ مثل النباتات، الطحالب، أو حتى نفايات الكائنات الحية، بحيث تحتوي تلك المواد على مواد أولية يمكن تحويلها بكل سهولة لإنتاج ما يسمى بالوقود الحيوي، والذي يمتلك الكثير من الطاقة المخزنة بداخله إضافةً إلى اعتباره أحد أنواع الطاقة المتجددة كما يعتبر الوقود الحيوي بديلاً ممتازاً للوقود الأحفوري؛ مثل الفحم الحجري، والبترو، والغاز الطبيعي، ويمتاز أيضاً عن الوقود الأحفوري بتكلفة إنتاجه المنخفضة، وصداقته الوطيدة بالبيئة؛ مما يساهم في التقليل من ظاهرة الاحتباس الحراري [45].

#### - أنواع الوقود الحيوي

ينقسم الوقود الحيوي حالياً إلى 4 أقسام حيوية وهي على النحو الآتي: [46].

#### • الجيل الأول

من الأمثلة عليه الكحول الحيوي، والإيثانول، والبروبان، والبيوتان، والديزل الحيوي، والغاز الحيوي، وبعض أنواع الزيوت النباتية.

#### • الجيل الثاني

من الأمثلة عليه السليلوز الحيوي، والوقود الحيوي المستخرج من الطحالب، والهيدروجين الحيوي، والميثانول، والديزل الحيوي المحسن.

#### • الجيل الثالث

وهو الذي يعرف باسم "وقود الطحالب"، فالطحالب نباتات بحرية بسيطة التكوين، معظمها قادرة على إجراء عملية التمثيل الضوئي، حيث تستطيع أن تنتج زيتاً نباتياً، والذي تتم معالجته كيميائياً للحصول على الديزل الحيوي، والإيثانول [47].

#### • الجيل الرابع

وهو من أكثر الأجيال المثيرة للاهتمام لكونه يعتمد على إجراء تغيير في جينوم أحد الكائنات الدقيقة، بحيث تُصبح قادرة على إنتاج الوقود الحيوي من غاز ثاني أكسيد الكربون [47].

### I-7-2- إنتاج الوقود الحيوي من الدهون والزيوت المسترجعة

يتم إنتاج وقود الديزل الحيوي من الزيوت النباتية الدهنية، أو من الدهون الحيوانية، أو من شحوم الطهي المعاد تدويرها، بحيث يُمزج الديزل الحيوي الناتج مع الديزل البترولي ليُستخدم في بعض وسائل النقل، كالمُستخدمة في الحافلات والمركبات العسكرية في الولايات المتحدة [48].

### I-7-3- إنتاج الغاز الحيوي

وذلك من خلال تحليل النفايات، أو مخلفات الحيوانات، أو مياه الصرف الصحي، بشرط أن يتم تكرير الغاز الحيوي الناتج للتخلص من الماء وثاني أكسيد الكربون والعناصر الأخرى، كي يتلائم مع المعايير اللازمة لاستخدامه في توليد الكهرباء والحرارة، أو لاستخدامه في المركبات التي تعمل بالغاز الطبيعي [49].

### I-7-4- المقارنة بين الوقود الحيوي والوقود الأحفوري

أدى استخدام الوقود الأحفوري إلى زيادة هائلة في الطلب على الطاقة في جميع أنحاء العالم وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وبسبب تناقص المعروض من الوقود المشتق من النفط، هناك الآن سوق لمصدر بديل للطاقة. بالإضافة إلى كونه وقوداً تقليدياً، يعد الوقود الأحفوري المصدر الرئيسي للطاقة غير المتجددة التي لا يمكن استدامتها لفترات طويلة من الزمن. ارتفعت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية بنسبة 0.5%، كما ارتفع استهلاك الطاقة الأولية بنسبة 1.3%، وفقاً للإحصاءات العالمية للطاقة العالمية لعام 2019. الإنسانية والبيئة في حالة تأهب قصوى نتيجة لهذه المعدلات المرتفعة. من ناحية أخرى، يمكن استخدام الوقود الحيوي بأقل قدر من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وتقليل التلوث، ويمكن تصنيعه من الكتلة الحيوية في شكل نفايات عضوية. كما أنه فعال في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2(g)$ ) [50].

## I-8- فصل المعادن الثقيلة (المرحلة الثالثة)

### I-8-1- تعريف المعادن الثقيلة

الفلز الثقيل هو مصطلح واسع يصف مجموعة من العناصر المعدنية الموجودة بشكل طبيعي ذات أوزان ذرية عالية نسبياً (في حدود 63.5–200.6 جم مول<sup>-1</sup>) وكثافة (> 5 جم/سم<sup>3</sup>) مقارنة بالماء. بعض المعادن الثقيلة، مثل الحديد والزنك والنحاس والمنغنيز، ضرورية لحياة الإنسان والنبات والميكروبات بتركيزات منخفضة، ولكن نفس المعادن يمكن أن تسبب سمية بتركيزات أعلى. في حين أن المعادن الثقيلة الأخرى، مثل الزرنيخ والكاديوم والرصاص والليثيوم والزنك، لا تؤدي أي وظيفة بيولوجية، إلا أنها للأسف يمكن أن تدخل جسم الإنسان بسبب وجودها في البيئة. وعلى غرار المعادن الأساسية، فإنها تسبب السمية بمجرد الوصول إلى تركيزات محددة [51].

### I-8-2- أنواعها

يمكن تصنيف المعادن الثقيلة إلى أنواع مختلفة بناءً على مستوى متطلباتها وسميتها وعوامل أخرى. بناءً على كمية المتطلبات، يمكن تصنيف المعادن الثقيلة إلى عناصر مغذية كبيرة وعناصر مغذية دقيقة. إذا كانت المعادن الثقيلة مطلوبة بكميات صغيرة من قبل كائنات حية مختلفة (مثل النباتات والحيوانات) للحفاظ على صحتها ووظائفها، فإنها تسمى المغذيات الدقيقة. وعلى العكس من ذلك، إذا كانت الكائنات الحية المختلفة (مثل النباتات والحيوانات) تحتاج إلى معادن ثقيلة بكميات كبيرة، فإن هذه العناصر تُعرف بالمغذيات الكبيرة. بالإضافة إلى ذلك، إذا كانت المعادن الثقيلة تشكل مستوى عالٍ من السمية، فإنها تصنف على أنها شديدة السمية. في بعض الأحيان، تكون المعادن

الثقيلة نادرة ولها قيمة اقتصادية عالية بسبب عوامل مختلفة، ويشار إليها بالعناصر الثمينة (الجدول 1) [52].

**الجدول (7-1): تصنيف المعادن الثقيلة**

معدن غير ضروري (ضار أو سام)	معدن ضروري (غير ضار)
الكروم (Cr)	الزنك (Zn)
الرصاص (Pb)	النحاس (Cu)
الزرنيخ (As)	الحديد (Fe)
الزئبق (Hg)	الكوبالت (Co)
الكادميوم (Cd)	-

**3-8-I- التخلص من هذه المعادن**

يتم التخلص من هذه المعادن عبر ترشيح العينة والذي سنتطرق إليه بالتفصيل في الفصل الموالي.

**9-I- التحليل الكهربائي للماء ونتاج الغازات الحيوية والماء المقطر (المرحلة الرابعة)**

**1-9-I- تعريف عملية التحليل الكهربائي للماء**

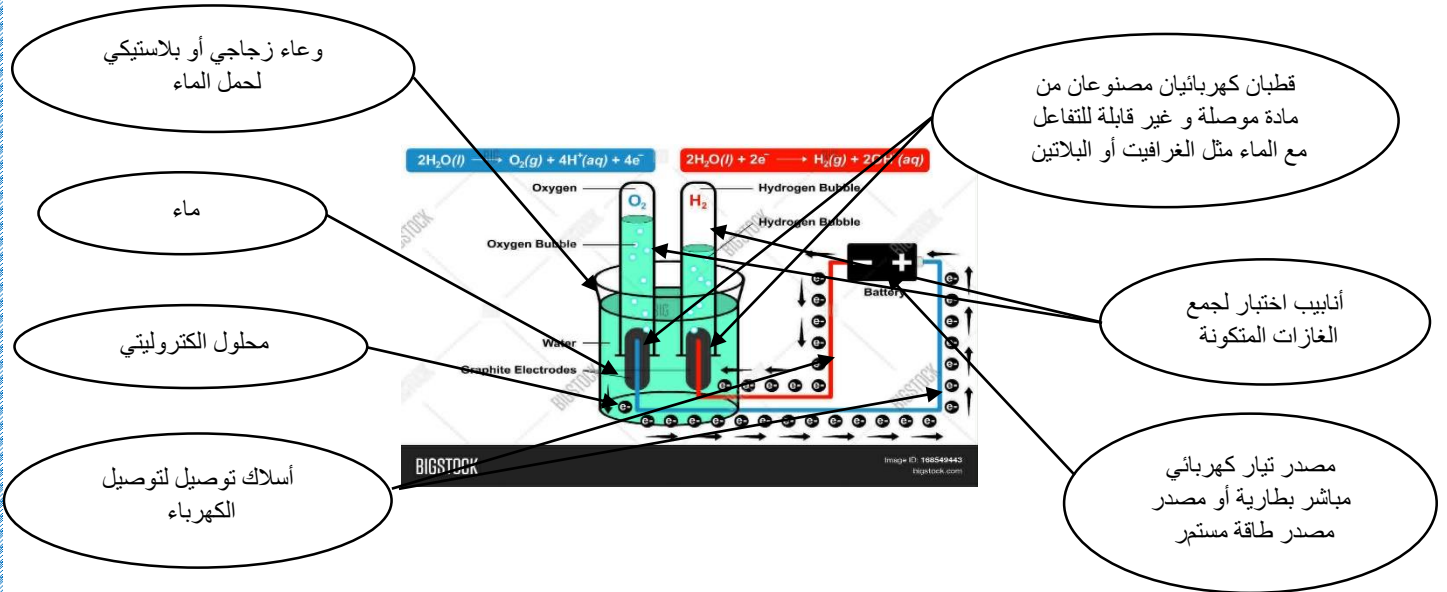
يُمكن تعريف تحليل الماء كهربائياً على أنها العملية التي تُجرى من أجل تقسيم الماء ( $H_2O(l)$ ) وفصل مكوناته إلى غاز هيدروجين ( $H_2(g)$ ) وأكسجين ( $O_2(g)$ ) منفصلين تماماً من خلال تطبيق الطاقة الكهربائية، وتزداد الطاقة الكلية اللازمة لتحليل الماء كهربائياً بازدياد درجة الحرارة، وتعود الحاجة إلى مثل تلك العملية بسبب زيادة كلفة الوقود الأحفوري وقلة توفره، وبالتالي الحاجة لغاز الهيدروجين كمصدر مثالي للطاقة، ولا يلوّث الهواء عند احتراقه [53] [54].

**2-9-I- تعريف المحلل الكهربائي (خلية التحليل الكهربائي)**

تُعرف خلية التحليل الكهربائي أو الخلية الالكتروليتية (بالإنجليزية: electrolytic cell) على أنها جهاز كهروكيميائي يستخدم الطاقة الكهربائية لتسهيل حدوث تفاعل الأكسدة الاختزال غير التلقائي، أي أنها تعمل على تحويل الطاقة الكهربائية، وتستخدم هذه الخلايا في تحليل بعض المركبات الكيميائية، فعلى سبيل المثال، يمكن وضع الماء في هذه الخلايا لإنتاج غازي الأكسجين والهيدروجين [55].

**3-9-I- مكونات خلية التحليل الكهربائي للماء (الالكتروليز)**

يتكون المحلل الكهربائي عادةً من أنود وكاثود يفصل بينهما الكتروليت، وتختلف طريقة عمل تلك الأجهزة باختلاف نوع مادة الالكتروليت المستخدمة، وتُستخدم طريقة المحلل الكهربائي بغشاء ويكون المحلول الكهربائي مادة بلاستيكية صلبة مُختصةً بذلك، (PEM) البوليمر لتحليل الماء وتتم طريقة التحليل إلكترونياً عبر الخطوات التالية: يتفاعل الماء المُراد تحليله عند الأنود من أجل تكوين كلاً من الأكسجين وأيونات الهيدروجين موجبة الشحنة المعروفة باسم البروتونات. تتدفق الإلكترونات من خلال دائرة خارجية، ثم تتحرك أيونات الهيدروجين بصورة انتقائية عبر الكاثود تتحد أيونات الهيدروجين مع الإلكترونات من الدائرة الخارجية عند الكاثود (PEM) في البوليمر من أجل تكوين غاز الهيدروجين كما في الشكل التالي [56].



الشكل (8-1): مكونات خلية التحليل الكهربائي للماء

- ❖ المصدر هو الذي تحدث فيه عملية الأكسدة ويسمى أيضا بقطب الانود (Anode)
- ❖ المهبط هو الذي تحدث فيه عملية الارجاع (الاختزال) ويسمى أيضا بقطب الكاثود (Cathode)
- ❖ الأقطاب الكهربائية تعمل على توصيل التيار الكهربائي دون الدخول في التفاعل الكيميائي مع مكونات المحلول
- ❖ الماء وهو المادة التي يتم تحليلها كهربائيا ويجب أن يكون نقيا بأكبر قدر ممكن
- ❖ الالكتروليت (المنحل بالكهرباء) وهي مادة تحتوي على أيونات حرة وهي حاملات التيار الكهربائي في المنحل بالكهرباء
- ❖ التيار المباشر (CD) يوفر الطاقة اللازمة لإنشاء أو تفريغ الأيونات في المنحل بالكهرباء

#### 4-9-I- الأجهزة المستخدمة في التحليل الكهربائي للماء

لتحليل الماء كهربائيا يتم استخدام الأجهزة التالية [57].

- جهاز هوفمان
- الخلايا الكهروكيميائية

هي أجهزة تحول الطاقة الكيميائية الى طاقة كهربائية أو العكس تعتمد على تفاعلات الأكسدة والارجاع وتنقسم الى نوعين رئيسيين هما الخلايا الغلفانية (خلايا دانيال) والمحلل الكهربائي (خلية التحليل الكهربائي) وينقسم الى عدة أنواع هي [58].

- ✓ المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)
- ✓ المحلل الكهربائي القلوي (AWE)
- ✓ المحلل الكهربائي لأكسيد الصلب (Soecs)

#### 5-9-I- المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)

التحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون (PEM) هو التحليل الكهربائي للماء في خلية مزودة بالكتروليت بوليمر صلب (SPE)، وهو المسؤول عن توصيل البروتونات، وفصل غازات المنتج،

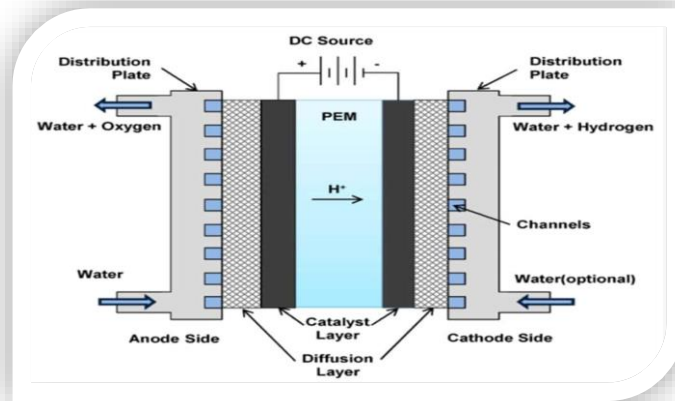
والعزل الكهربائي للأقطاب الكهربائية. طُوِّر جهاز التحليل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون (PEM) للتغلب على مشاكل الحمل الجزئي، وانخفاض كثافة التيار، وانخفاض ضغط التشغيل التي تُعيق عمل جهاز التحليل الكهربائي القلوي حالياً. وهو يعتمد على غشاء تبادل البروتون. يُعد التحليل الكهربائي باستخدام غشاء التبادل البروتوني (PEM) تقنيةً واعدةً لإنتاج الهيدروجين عالي النقاء والفعالية، إذ لا ينبعث منه سوى الأكسجين كمنتج ثانوي دون أي انبعاثات كربونية. [59] وقد أشارت وكالة الطاقة الدولية في عام 2022 إلى الحاجة إلى مزيد من الجهود [60]. وقد يُشكل توفر الإيريديوم عائقاً أمام انتشار استخدام تقنية غشاء التبادل البروتوني (PEM) [61] [62].



الشكل (9-1): المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)

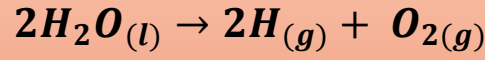
#### 6-9-I- آلية عمل المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)

تعتمد آلية عمل المحلل الكهربائي بغشاء تبادل البروتون (PEM) على تقسيم جزيء الماء كهرومغناطيسياً باستخدام غشاء بوليمري صلب؛ حيث يتم ضخ الماء عند المصعد ليتحلل بوجود محفز (مثل الإيريديوم) إلى غاز أكسجين، وإلكترونات، وبروتونات هيدروجين موجبة الشحنة ( $H^+$ ) [63]. يقوم هذا الغشاء بدور حيوي كونه يعمل كعازل كهربائي وموصل أيوني في آن واحد، حيث يسمح بعبور البروتونات فقط عبر مسامه نحو المهبط، بينما تضطر الإلكترونات للانتقال عبر دائرة كهربائية خارجية [64]. وعند وصول البروتونات والإلكترونات إلى المهبط وبمساعدة محفز (مثل البلاتين)، تتحد مجدداً لتكوين غاز الهيدروجين بنقاء عالٍ جداً [65]. وتتميز هذه التقنية بقدرتها الفائقة على الاستجابة السريعة لتقلبات الطاقة الناتجة عن المصادر المتجددة مثل الرياح والشمس، مما يجعلها الخيار الأمثل لإنتاج الهيدروجين الأخضر [66].



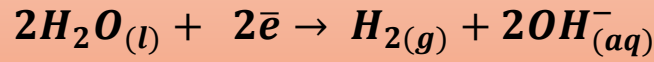
الشكل (10-1): الية عمل المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)

-انتاج غاز الأكسجين وغاز الهيدروجين عند الأقطاب الكهربائية  
 ➤ معادلة التحليل الكهربائي للماء (المعادلة الأجمالية لأكسدة ارجاعية)



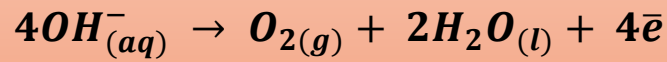
➤ عند المصعد / الكاثود (القطب السالب (-))

تحدث عملية ارجاع



➤ عند المهبط / الانود (القطب الموجب (+))

تحدث عملية أكسدة



الأجهزة والأدوات  
المستخدمة

## الفصل الثاني

### تمهيد

يستعرض هذا الفصل الخصائص الجغرافية والفلكية لمنطقة الدراسة ومحطاتها، ثم ينتقل لتوضيح البروتوكول التجريبي المعتمد؛ بدءاً من مراحل جمع العينات وصولاً إلى التحاليل المخبرية، مع ذكر لمنهجية العمل وأدوات القياس المستخدمة.

### II-1-1- تقديم منطقة الدراسة:

#### II-1-1-1- تعريف منطقة الدراسة (غرداية):

ولاية غرداية تقع شمالي صحراء الجزائر، ومقر الولاية مدينة غرداية تبعد حوالي 600 كلم جنوب العاصمة الجزائر، مساحتها الإجمالية تقدر بـ 19 729 كلم<sup>2</sup>، امتدادها من الشمال إلى الجنوب 140 كلم، ومن الشرق إلى الغرب من 200 إلى 250 كلم. ترتفع الولاية عن مستوى سطح البحر بحوالي 486 م.

#### II-1-1-2- الموقع الجغرافي:

تحد ولاية غرداية كل من: شمالاً: ولاية الجلفة وولاية الأغواط، جنوباً: ولاية المنية، شرقاً: ولاية ورقلة، غرباً: ولاية البيض تبعد مدينة غرداية عاصمة ولاية غرداية بـ 200 كلم عن عاصمة ولاية الأغواط، و200 كلم عن عاصمة ولاية ورقلة، و270 كلم عن عاصمة ولاية المنية وبـ 432 كلم عن عاصمة ولاية البيض ويعبرها الطريق الوطني رقم 1 الرابط العاصمة الجزائرية بالجنوب الكبير.



الشكل (1-2): الموقع الجغرافي لولاية غرداية – الجزائر

#### II-1-1-3- الموقع الفلكي:

تقع ولاية غرداية بين خطي: 32 و20.33 شمالاً، وبين: 2 و30 شرقاً، وترتفع عن مستوى سطح البحر بـ 468 م.

#### II-2-1- نبذة تاريخية عن المحطة:

تعتمد محطة التطهير ببلدية القرارة، المنشأة منذ عام 2013، تقنية الأحواض الطبيعية لمعالجة تدفقات مياه الصرف الصحي التي تتراوح سعتها بين 10 و15 ألف متر مكعب لكل يوم. تهدف هذه المحطة، الواقعة في الضاحية الجنوبية الشرقية للمدينة (6 كلم)، إلى الحفاظ على المنظومة البيئية المحلية وإعادة تدوير المياه المستعملة لدمجها في الدورة الزراعية بالمنطقة

#### II-1-2- تقديم محطة التصفية بالقرارة – غرداية:

تُعد محطة تصفية المياه المستعملة ببلدية القرارة إحدى المنشآت البيئية الحيوية التابعة للديوان الوطني للتطهير بولاية غرداية، والتي دخلت الخدمة في سبتمبر 2013. تتربع المحطة على مساحة

هامة وتقع على بعد 6 كلم جنوب شرق المدينة، حيث تم اختيار موقعها بدقة لخدمة الأهداف البيئية والزراعية للمنطقة.



الشكل (2-2): محطة التصفية بالقرارة – غرداية

### II-2-2- الوضعية المناخية:

تتمتع ولاية غرداية بمناخ صحراوي حار صيفاً ومعتدل شتاءً، [67] وتتراوح درجات الحرارة فيها على مدار العام بين 6 درجات مئوية و39 درجة مئوية، ونادراً ما تنخفض درجة الحرارة عن 3 درجات مئوية، أو ترتفع لأكثر من 43 درجة مئوية، وتحصل مدينة غرداية على أمطار جيدة على مدار العام، ولكن يعد شهر نوفمبر هو الشهر الأكثر مطراً بمتوسط هطول مطري 0.3 بوصة، أما شهر يوليو، فيكاد يفتقر للأمطار تماماً.

### II-2-3- الأدوات والمواد الكيميائية المستعملة

لضمان أعلى معايير الدقة العلمية استخدمت في هذه الدراسة مواد كيميائية ذات جودة تحليلية وجملة من الأدوات والأجهزة المخبرية المتقدمة يلخص الجدول الموالي كافة هذه المستلزمات مع بيان مواصفاتها التقنية ومصادرها.

#### أ- المواد والكواشف الكيميائية المستخدمة:

يدرج هنا كافة المحاليل والمواد الصلبة مع التركيز على المواصفات الكيميائية.

الجدول (3-2): المواد والكواشف الكيميائية المستخدمة

المادة الكيميائية	الصيغة الكيميائية	درجة النقاوة / الكتلة المولية / الكثافة	المصدر / الشركة
Sodium sulfate anhydrous	$Na_2SO_4$	Mw= 142.04g/mol	Biochem chemopharma
Acide nitrique p.a	$HNO_3$	P = 65%	Pro analysi Merck
Hydrochloric acide	HCL	d = 1. 190g/mol p = 36.5% – 38%	Honeywel Fluka <sup>TM</sup>
bidistillee	-	-	-
ETHANOL	$C_2H_6OH$	p = 96°	SPECILAB م. محمد ريان

Biochem chemopharma	Mw = 40.00 g/mol	NaOH	<b>Sodium Hydroxide pellets</b>
------------------------	------------------	------	---

ب- التجهيزات والأجهزة الدقيقة المستخدمة:  
هذا الجدول يضم الأجهزة الكهربائية والإلكترونية الدقيقة التي تتطلب معايرة.

الجهاز	الطرز	الشركة المصنعة	الغرض من الاستخدام
جهاز الامتصاص الذري SAA	-	ContrAA 800	لقياس تركيز عنصر الرصاص والزنك في العينة
المجهر الالكتروني الماسح MEB	-	-	لتحديد مكان توزيع الجسيمات والمعادن في الفلتر
ميزان تحليلي	-	Pioneer	لقياس وزن العينات
جهاز التسخين والرج	MSH-20A	Wisd LABORATORY INSTRUMENTS	لتسخين ورج المحاليل
مولد كهربائي	-	PHYWE	لتشغيل المحلل الكهربائي غشاء تبادل البروتون (PEM)
جهاز PH	-	-	لقياس الأس الهيدروجيني لمحاليل
جهاز قياس TDS أو T أو Ec	-	Meter(hold)	لقياس درجة الحرارة أو المواد الصلبة الذائبة أو الناقلية الكهربائية للمحاليل

الجدول (2-4): التجهيزات والأجهزة الدقيقة المستخدمة

ت- الأدوات والزجاجيات المخبرية المستخدمة:  
يمكن تلخيصها في جدول بسيط للأدوات المتكررة.

الجدول (2-5): الأدوات والزجاجيات المخبرية المستخدمة

الأداة الزجاجية	السعة / القياس	الاستخدام
بيشر	50مل	لتحضير المحاليل
بيشر	500مل	لتحضير المحاليل
قمع الترشيح	-	لترشيح
ماصة عيارية	5مل	لأخذ المحاليل التجارية
مكتفة	-	لتقطير
قمع الإبانة	-	لفصل المحاليل السائلة غير المتجانسة
محرار زئبقي	-	لقياس درجة الحرارة
مخبر مدرج	10مل	لقياس حجم المحاليل
مخبر مدرج	250مل	لقياس حجم المحاليل
ارلينة	500مل	لتحضير المحاليل

**II-2-4- الخصائص الفيزيوكيميائية لعينة المرجعية (الماء المقطر) المستعملة:**

- الناقلية الكهربائية  $E_c = 0174 \text{ us/cm}$

- الأس الهيدروجيني  $\text{pH} = 7.45$

- الأملاح الذائبة الكلية  $\text{TDS} = 0085 \text{ ppm}$

**II-2-5- الخصائص الفيزيوكيميائية المقاسة:**

**1- قياس درجة الحرارة:**

لقياس درجة الحرارة نستعمل جهاز قياس الناقلية والملوحة لقياس درجة الحرارة في الوسط المائي

**- طريقة العمل**

- نقوم بتشغيل الجهاز.

- نقوم بغمس قطب الجهاز داخل العينة.

- نقرأ مباشرة درجة الحرارة عند استقرارها على الجهاز.

**2- قياس الأس الهيدروجيني pH :**

يتم قياس الأس الهيدروجيني بواسطة جهاز pH متر.

**- طريقة العمل**

- نقوم بضبط الجهاز pH متر ونشغله.

- نغسل قطب الجهاز بالماء المقطر.

- نضع في بيشر صغير حجم عشوائي من العينة ثم نغمس قطب الجهاز داخل البيشر.

- نتركه لمدة صغيرة لكي تستقر القيمة ثم نسجل قيمة pH العينة عند استقرارها.



الشكل (2-6): جهاز PH متر

**3- قياس الأملاح الذائبة الكلية (TDS) والناقلية الكهربائية (Ec)**

يتم قياس الأملاح الذائبة الكلية والناقلية الكهربائية بواسطة جهاز قياس الأملاح الذائبة الكلية

(TDS) والناقلية الكهربائية (Ec).

**-طريقة العمل**

- نقوم بضبط الجهاز وتشغيله.
- نقوم بغسل قطب الجهاز بالماء المقطر.
- نضع في بيشر صغير حجم عشوائي من العينة ثم نغمر قطب الجهاز داخل البشير.
- تظهر على شاشة الجهاز قيمة الأملاح الذائبة الكلية ثم تبدأ في التناقص ونترك الجهاز لمدة زمنية قصيرة حتى تستقر القيمة.
- نقرأ القيمة ونسجلها في دفتر ثم نضغط على SHIFT لتغير قراءة الجهاز من TDS الى Ec ثم نترك الجهاز لمدة زمنية قصيرة حتى تستقر القراءة مرة ثانية ثم نقرأ قيمة التوصيلية الكهربائية ونسجلها في دفتر.



الشكل (2-7): جهاز قياس الناقلية الكهربائية (Ec) والأملاح الذائبة الكلية (TDS)

**1-الترشيح الأولي (المرحلة الأولى)**

- 1- جمع النفايات الغليظة بواسطة ترشيح الماء الداخل الى المحطة.
- 2- فصل الماء عن الزيت الطافي بعد عملية الترشيح.
- 3- بعد ترشيح البقايا الغليظة الى غليظة وأقل منها لاستعمالها في انتاج الأسمدة العضوية والغاز الحيوي.

**2-الترشيح النهائي (المرحلة الثانية)**

**-تحضير المرشحات**

نقوم بتحضير أنواع مختلفة من المرشحات لترشيح العينة (مياه الصرف الصحي بعد المعالجة) وهي



الشكل (2-8): التركيب التجريبي لترشيح العينة

### 1- مرشح الرمل ونشارة الخشب:

نقوم بإحضار كمية من الرمل ونغسلها ثلاثة مرات بماء الحنفية ثم نتركه يجف في الهواء لفترة زمنية قصيرة ثم نقوم بغسل كمية من نشارة الخشب ذات حجم 2mm ونتركها تجف لفترة زمنية قصيرة ثم نقوم بخلطهما معا للحصول على مرشح رمل -نشارة الهدف من استخدام هذا المرشح هو التخلص من العوالق الغليظة والشوائب.

### - قياس حجم الرمل ونشارة الخشب المستخدمة في الترشيح:

يتم قياس حجم قطر حبيبات الرمل وحبيبات نشارة الخشب بواسطة عملية الغربلة.

### - مبدأ عملية الغربلة

المبدأ الأساسي للغربلة هو احداث حركة نسبية بين جسيمات العينة وشبكة المنخل. تحفظ العينة في حركة مستمرة رأسية أو أفقية مما يتيح لكل جسيم فرصة لمواجهة فتحة المنخل حيث يتمثل دور شبكة المنخل في فصل الجسيمات الأصغر حجما عن الجسيمات الأكبر حجما حيث تمر الجسيمات الأصغر حجما من فتحات الشبكة بينما تحتفظ الجسيمات الأكبر حجما على السطح. يتيح استخدام مجموعة من المناخل ذات أحجام شبكية أصغر تدريجيا فصل المادة الى كسور متعددة الأحجام.

### - طريقة الغربلة

- اختيار مجموعة من مناخل الاختبار ذات أحجام شبكية مناسبة للنطاق المتوقع لحجم الجسيمات.

- نقوم بترتيب المناخل من الأكبر حجما الى الأقل حجما من الأعلى الى الأسفل حيث كان ترتيب مناخل الغربلة لحبيبات الرمل كمايلي (50um - 400um - 500um) وترتيب مناخل الغربلة لحبيبات النشارة كما يلي (800um - 1.25mm - 1.6 mm - 2mm).

- نضع العينة (الرمل أو نشارة الخشب) في المنخل العلوي ثم نقوم بتحريك المنخل بحركة اهتزازية لفصل الجسيمات.
- نقوم بتسجيل أكبر قطر للجسيمات الى أقل قطر.



الشكل (2-9): قياس حجم نشارة الخشب وحببيات الرمل بواسطة عملية الغربلة

#### 2- مرشح الخيط

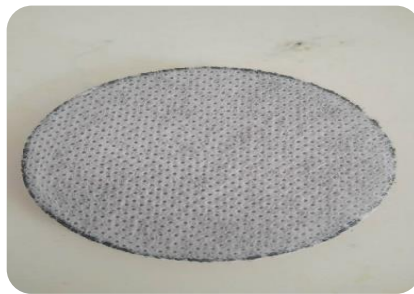
يتم ترشيح العينة بواسطة هذا المرشح.

#### 3- مرشح المواد النانوية

يتم ترشيح العينة بواسطة المادة النانوية المغناطيسية  $Fe_3O_4(s)$ .

#### 4- مرشح الفحم النشط

يتم ترشيح العينة (مياه الصرف الصحي) بواسطة مرشح الفحم النشط والهدف من استخدام هذا المرشح هو التخلص من الرائحة الكريهة للعينة وبعض الشوراد كما هو موضح في الصورة المقابلة.



الشكل (2-10): مرشح الفحم النشط

#### 5- مرشح الزيوليت

الهدف من استخدام هذا المرشح هو التخلص من المعادن الذائبة السامة مثل الرصاص (Pb) والزنك (Hg) تعديل النتائج كما هو موضح في الصورة المقابلة.



الشكل (2-11): مكونات مرشح الزيوليت

### 3- قياس المعادن الثقيلة:

يتم قياس المعادن الثقيلة الموجودة في العينة بواسطة شرائط اللونية لاختبار المعادن الثقيلة في الماء.



الشكل (2-12): قياس المعادن الثقيلة بواسطة الشرائط اللونية

#### -طريقة العمل

- نغمر ورق القراءة في كأس بيشر (1) ثم نتركه لمدة زمنية قصيرة ثم نقرأ القياس ونسجل قيم المعادن الثقيلة.

- نغمر ورق القراءة في كأس بيشر (2) ثم نتركه لفترة زمنية قصيرة ثم نقرأ القياس ونسجل قيم المعادن الثقيلة ونقارنها بالقيم المرجعية.

#### 4- إنتاج الغازات الحيوية

يتم إنتاج الغازات الحيوية والمتمثلة في غاز الأكسجين  $O_2(g)$  و غاز الهيدروجين (الهيدروجين الأخضر)  $H_2(g)$  من خلال عملية التحليل الكهربائي للعينة بعد فلترتها أما غاز الميثان (الغاز

الحيوي)  $CH_4(g)$  فيتم انتاجه عبر عملية الهضم اللاهوائي (التخمير اللاهوائي) و ذلك حسب البروتوكول التجريبي التالي:

■ انتاج غاز الهيدروجين (الهيدروجين الأخضر)  $H_2(g)$  و غاز الأوكسجين  $O_2(g)$  عبر عملية التحليل الكهربائي للعينة

- طريقة العمل

- ✓ تهيئة الجهاز: التأكد من سلامة التوصيلات وإحكام إغلاق الخلية.
- ✓ توصيل الطاقة: توصيل الأقطاب بمصدر طاقة مستمر (جهد V15) بحيث يوصل القطب السالب بالكاثود، والقطب الموجب بالانود.
- ✓ إضافة الماء: ملء الخزان بالماء المقطر (ضمان نقاء الغازات الناتجة ومنع الشوائب)، مع إضافة مادة مساعدة على التوصيل الكهربائي إذا لزم الأمر.
- ✓ التشغيل: فتح صمام دخول الماء والسماح له بالدخول إلى الأغشية.
- ✓ جمع الغازات: عند بدء تشغيل الجهاز، نلاحظ تصاعد الغازات من الفتحات المخصصة لغاز الهيدروجين يتصاعد عند الكاثود (القطب السالب) وغاز الأوكسجين يتصاعد عند الانود (القطب الموجب).

■ انتاج غاز  $CH_4(g)$

تتم صناعة الغاز الحيوي عبر تخمير بقايا الطعام والخضار في وسط مغلق وتتم هذه العملية عبر الخطوات التالية:

- ✓ يتم وضع بقايا الطعام والخضروات في حاوية مغلقة تحتوي على ماء الصرف الصحي وفضلات الجمال.
- ✓ عند وضع البقايا يتم إغلاق الحاوية وتخزينها في مظلم لكي تقوم البكتيريا بعملها يحتوي غطاء الحاوية على أنبوب متصل بقارورة تحتوي على كمية من الماء وذلك من أجل عدم رجوع الغاز إلى الحاوية مرة أخرى أي ضمان تخزينه.
- ✓ تتم عملية تحضير الغاز الحيوي في مدة زمنية شبه طويلة وذلك مرتبط بمدة عمل البكتيريا في إنتاجه.

#### 5- استخلاص الماء المقطر من مياه الصرف الصحي

يتم استخلاص الماء المقطر من مياه الصرف الصحي باستخدام تقنية التقطير (Distillation)، وهي طريقة فعالة لتحويل المياه الملوثة إلى مياه نقية خالية من الشوائب والأملاح ويتم ذلك باستخدام جهاز التقطير كمايلي:

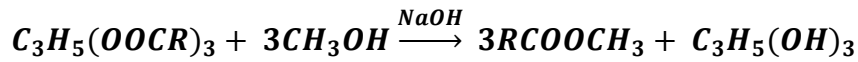
- نقوم بوضع حجم  $v = 1.5l$  من عينة مياه الصرف الصحي المعالجة في محطة التنقية في وعاء التسخين داخل جهاز التقطير.
- نقوم بتسخين الماء حتى يصل الى درجة غليان الماء  $100^{\circ}C = T$  مما يؤدي الى تحول الماء الى بخار وترك الملوثات والأملاح الثقيلة في القاع حيث يتم تكثيف بخار الماء المتصاعد بواسطة المكثفة.
- يتم جمع الماء القطر في وعاء زجاجي نظيف ومعقم.
- نقوم بقياس الخصائص الفيزيوكيميائية للماء المقطر المستخلص.



الشكل (2-13): التركيب التجريبي لعملية التقطير

### 6- تحضير الوقود الحيوي

يتم تحضير الوقود الحيوي من الزيوت المستخلصة من مياه الصرف الصحي في محطة المعالجة لولاية غرداية، حيث اعتمدنا في هذه المرحلة على عملية الأسترة التبادلية (Transesterification) لمعالجة زيت الطهي المستعمل، والتي تهدف إلى تحويل الدهون الثلاثية الموجودة في الزيت إلى ميثيل أسترات الأحماض الدهنية (الديزل الحيوي) وفق المعادلة الكيميائية التالية:



حيث يتم التفاعل بوجود عامل حفاز (مثل هيدروكسيد الصوديوم) لإنتاج الوقود الحيوي والجلسرين كمنتج ثانوي، وذلك وفق البروتوكول التجريبي التالي:

#### خطوات العمل

- نقوم بتصفية زيت الطهي المستعمل باستخدام مصفاة دقيقة لإزالة أي جزيئات لطعام.
- نقوم بوضع الزيت المصفى في بيشر حجمه  $v = 500ml$ .
- نقوم بعملية تسخين ورج لزيت الطهي حيث نقوم بتسخينه لدرجة حرارة  $55^\circ C$  أو  $60^\circ C$  و نقيس درجة حرارته بواسطة المحرار .
- نضع في بيشر حجم من الميثانول التجاري ثم نأخذ بواسطة ماصة عيارية نأخذ حجم  $v=100ml$  و نضعه في بيشر ثم نضيفه لزيت الطهي.
- ثم نزن بواسطة ميزان تحليلى كتلة  $m = 5g$  هيدروكسيد الصوديوم  $NaOH(s)$  ثم نضيفها الى الزيت السابق ثم نضيف حجم  $v = 50ml$  من الماء المقطر.
- نترك المحلول لمدة 24 ساعة لتفصل طبقة الجليسرين عن الأحماض الأمينية.
- بعد مرور المدة الزمنية السابقة نلاحظ تشكل طبقتين لمحلول الطبقة الأولى لسائل أصفر باهت وهو الوقود الحيوي أما الطبقة الثانية لسائل بني اللون يحتوي على راسب بني وهو الجليسرين.

- بواسطة ماصة عيارية نقوم بقصم الوقود الحيوي عن الجليسرين ونضعها في قمع الابانة ثم نقول بعملية غسل لوقود الحيوي حيث نقوم بإضافة حجم عشوائي من الماء المقطر ثم نقوم بالرج وتتركه لمدة زمنية لينفصل الوقود الحيوي عن الماء المقطر حيث يطفو الوقود الحيوي في الأعلى بينما يبقى الماء المقطر في الأسفل ثم نقوم بفصل الماء المقطر عن الوقود الحيوي ونقوم بالعملية ثلاث مرات.

- في المرحلة الثالثة من عملية غسل الوقود الحيوي نضيف كمية معتبرة من ثيوسولفات الصوديوم اللامائية  $Na_2SO_4(s)$  لنزع أي جزيئات ماء عالقة في الوقود الحيوي.

- نقوم بوضع الوقود الحيوي المستخلص في بيشر ثم نأخذ بواسطة ملقط قطنة ثم نبللها بالقليل من الوقود الحيوي ثم نقوم بإشعالها حيث نلاحظ الاحتراق القوي لقطنة دليل على كفاءة وفعالية هذا الوقود في الاحتراق.

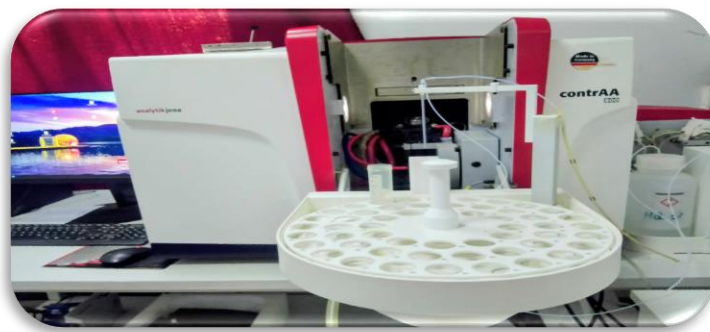
- نقوم بحفظ الوقود الحيوي في علبه بلاستيكية لحفظه من الرطوبة والعوامل الخارجية لتفادي تغير تركيبه الكيميائي ونقوم بحفظه في درجة حرارة الغرفة.



الشكل(2-14): الوقود الحيوي المنتج تجريبيا

## 7-قياس عنصر الرصاص Pb و عنصر الزئبق Hg

يتم قياس تركيز عنصر الرصاص عنصر الزئبق الموجود في العينة (عينة مياه الصرف الصحي المفلترة) وذلك بواسطة جهاز الامتصاص الذري (Spectroscopie d'Absorption Atomique) SAA



الشكل(2-15): جهاز الامتصاص الذري SAA

-مبدأ عمله

يعتمد مبدأ SAA على تبخر المعادن داخل العينة عند تعرضها للهب. يمتص كل معدن في الحالة الأرضية الإشعاع الضوئي (ويثيره) بطول موجي مختلف. يسمح هذا التفرد لكل عنصر معدني بأن يكون له طيف امتصاص خاص به يتوافق مع هويته. يتناسب إجمالي الإشعاع الممتص عند طول موجي محدد بواسطة عنصر ما في العينة مع كثافة ذرات العنصر. يتم استخدام القياس الكمي لهذه العلاقة لتحديد تركيز معادن معينة في العينة. [69]

$$A = \text{Log} \left( \frac{I_0}{I} \right) = \epsilon * L * C$$

حيث

I : هي شدة الضوء النافذ

$I_0$  : هي شدة الضوء الساقط

A : هي الامتصاصية

$\epsilon$  : هو معامل الامتصاص المولاري بوحدة  $L \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

L : طول المسار الضوئي بـ cm

C : التركيز المولي بـ mol/l أو M

-طريقة العمل-

نقوم بتحضير مجموعتين من العينات حيث المجموعتين تم تحضيرهما بشكل مختلف كمايلي:

1- المجموعة الأولى

تحتوي عينات المجموعة الأولى على العينة معالجة ومفلترة حسب التركيب السابق وتم تحضيرها كمايلي:



الشكل (2-16): عينات المجموعة الأولى

- نقوم بتحضير الماء الملكي حيث نقوم بأخذ حجم  $v = 2.5 \text{ ml}$  من حمض النيتريك بواسطة ماصة عيارية حجمها  $v = 5 \text{ ml}$  ثم نضعها في ارلينة حجمها  $v = 100 \text{ ml}$  ثم نقوم بغسل الماصة بالماء المقطر ونأخذ حجم  $v = 7.5 \text{ ml}$  من حمض

- الهيدروكلوريك  $HCl(aq)$  ثم نضعها في الارلينة السابقة ونكمل بالماء المقطر حتى الخط العياري ونغطيه ونتركه لمدة 24 ساعة.
- بعد مرور 24 ساعة نقوم بوضع حجم عشوائي من العينة والتي تمت فلترتها بالتركيب السابق مع حجم عشوائي من الماء الملكي ثم نغطيها ونتركها لمدة 24 ساعة.
  - بعد مرور المدة الزمنية نلاحظ تغير لون المحلول من اللون الشفاف الى اللون الأصفر الباهت ثم نقوم بوضعه في بيشر ونقوم بتسخين المحلول حتى يتبخر ويصل الى حجم  $v = 15ml$  ثم نضعها في ارلينة السابقة ثم نكمل بالماء المقطر حتى الخط العياري.
  - نقوم بتوزيع الحجم السابق على أربع قارورات زجاجية مرقمة من 1 الى 4 مع وضع عينة مرجعية تحتوي على الماء الملكي السابق.
- 2- المجموعة الثانية

- عينات المجموعة الثانية عبارة عن عينة من مياه الصرف الصحي المعالجة في المحطة دون فلترتها في التركيب السابق والتي تم تحضيرها كمايلي:
- نقوم بتحضير الماء الملكي حسب البروتكول التجريبي السابق.
  - بعد مرور 24 ساعة نقوم بوضع حجم عشوائي من الماء الملكي مع حجم عشوائي من العينة في بيشر ونقوم بتغطيته لمدة 24 ساعة.
  - بعد مرور 24 ساعة نقوم بتسخين المحلول حتى يصل حجمه الى  $v = 15ml$  ثم نتركه يبرد ثم نضعه في ارلينة حجمها  $v = 100ml$  ثم نكمل بالماء المقطر حتى الخط العياري.
  - نقوم بتوزيع هذا المحلول على عينات فرعية مرقمة من 5 الى 8 (نضعها في قارورات زجاجية مرقمة من 5 الى 8).
- الهدف من إضافة المحلول الملكي لعينات هو هضم العينة باستخدام المحلول الملكي والتسخين لتحويلها الى محلول مائي صافي ثم تخفيفها للوصول الى النطاق الخطي للجهاز.



الشكل (2-17): عينات المجموعة الثانية

- نقوم بأعداد الجهاز وتشغيله وضبط الطول الموجي وشدة التيار وفقا لتعليمات الشركة المصنعة.
- نقوم بفتح الغازات الأستيلين والهواء أو أكسيد النيتروز) واشعال اللهب للوصول الى درجة حرارة المناسبة للاندخال الذري.
- نقوم بالمعايرة حيث يتم قياس المحاليل القياسية بدءا من التركيز الأقل الى التركيز الأعلى لرسم منحنى المعايرة القياسي على برنامج الجهاز.

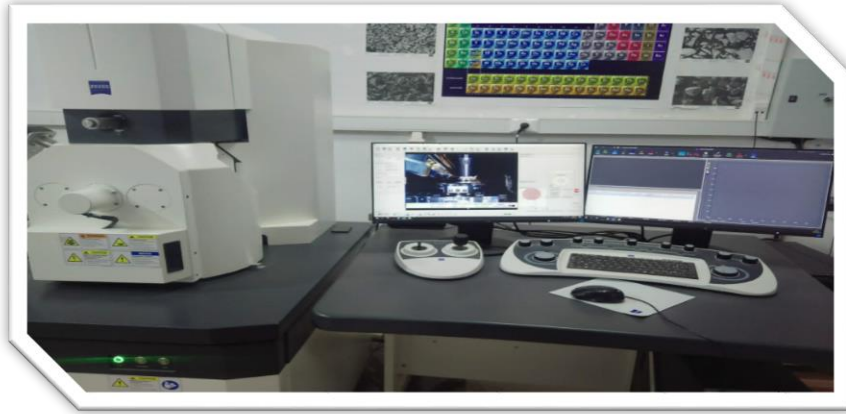
- نقوم بقياس العينات وذلك بإدخال محاليل العينات الى اللهب عبر الأنبوب الشعري لقراءة الامتصاصية.

- نقوم بحسب النتائج باستخدام معادلة الخط المستقيم منحني المعايرة لحساب تركيز العنصر في العينة الأصلية.

- نقوم بتنظيف النظام بالماء المقطر أو الحمض المخفف بين العينات لتجنب التلوث العرضي ثم إطفاء اللهب واغلاق الغازات بعد الانتهاء.

- تحديد مكان توضع الجسيمات بواسطة جهاز ال MEB

يتم تحديد مكان توضع الجسيمات والمعادن في مرشح الزيوليت ومرشح الرمل – نجارة الخشب ومرشح النانو المغناطيسي خلال عملية مرشح العينة بواسطة المجهر الالكتروني الماسح MEB.



الشكل (2-18): المجهر الالكتروني الماسح MEB

- مبدأ عمله

يعتمد عمل المجهر الإلكتروني الماسح على توجيه حزمة إلكترونات عالية الطاقة ومسحها نقطياً على سطح العينة عبر عدسات وملفات انحراف. تتفاعل الإلكترونات مع السطح لتنتج إشارات تُجمع عبر كواشف متنوعة (للأشعة السينية، والإلكترونات المرتدة، والثانوية)، مما يتيح تكوين صور دقيقة لتضاريس السطح والتركيب الكيميائي للمواد بغض النظر عن سُمك العينة.

- طريقة العمل

- نقوم بتحضير العينة وتجفيفها وطلائها بالكربون اذا كانت غير موصلة للكهرباء.

- نقوم بوضع العينة على الحامل باستخدام شريط لاصق موصل للكهرباء.

- نقوم بوضع الحامل داخل حجرة المجهر وتفريغ الهواء للوصول الى ضغط التشغيل المناسب.

- نقوم بتشغيل مدفع الإلكترونات وتوجيه الحزمة نحو سطح العينة وضبط التركيز والتباين.

- نقوم بمسح السطح نقطياً وجمع الإشارات الناتجة (الإلكترونات الثانوية – الإلكترونات المرتدة أو الأشعة السينية) ونقوم بحفظ الصور والبيانات الناتجة بدقة نانوية للتحليل والدراسة.

النتائج ومناقشتها

الفصل الثالث

### III- نتائج التحاليل الفيزيوكيميائية

#### III-1- النتائج التجريبية لعملية الغرلة

وجدنا تجريبياً من خلال عملية الغرلة أن حجم قطر حبيبات الرمل هو  $R \leq 500 \text{ um}$  وحجم قطر حبيبات نشارة الخشب هو  $R \leq 2\text{mm}$

#### III-2- النتائج التجريبية لترشيح العينة بواسطة الزيوليت

الجدول المقابل يوضح النتائج التجريبية لوسائط الفيزيوكيميائية المقاسة للعينة بعد ترشيح العينة بواسطة الزيوليت خلال مدة زمنية مختلفة.

الجدول (1-3): الخصائص الفيزيائية المقاسة بعد ترشيح العينة بزيوليت

العينة / القياس	الأس الهيدروجيني pH	الأملاح الذائبة الكلية	التوصيلية الكهربائية
العينة بعد مدة زمنية قصيرة	pH = 6.65	TDS = 2779ppm	Ec = 5558 us/cm
العينة بعد مدة زمنية كبيرة	pH = 6.86	TDS = 2576 ppm	Ec = 4858 us/cm

#### ■ مناقشة هذه النتائج

تُظهر النتائج التجريبية كفاءة ملحوظة لفلتر الزيوليت في تحسين الخصائص الفيزيوكيميائية للعينة، حيث ارتبطت هذه الكفاءة بشكل وثيق بزيادة زمن التلامس (Contact Time). عند المقارنة بين الفترتين الزمنيتين، نلاحظ انخفاضاً واضحاً في قيم الأملاح الذائبة الكلية (TDS) من 2779ppm إلى 2576ppm، وهو ما انعكس مباشرة على التوصيلية الكهربائية (EC) التي تراجعت بفارق قيمته 700us/cm (من 5558 us/cm إلى 4858 us/cm) هذا الهبوط المشترك يعود إلى نجاح آلية التبادل الأيوني والامتزاز الفيزيائي داخل البنية المسامية ثلاثية الأبعاد للزيوليت، حيث أتاح عامل الزمن الطويل للأيونات الحرة الانتشار بفعالية نحو المواقع النشطة العميقة واحتجازها. وتتكامل هذه المؤشرات مع الانخفاض الطفيف في الأس الهيدروجيني (pH) من 6.86 إلى 6.65، وهو سلوك نمطي يرافق تحرر بعض بروتونات الهيدروجين أثناء تعويض الأيونات الموجبة المحتجزة. بناءً على هذه المعطيات، تؤكد الدراسة نجاح عملية الفلترة وملاءمة الزيوليت كوسط تبادل فعال، مع إثبات أن حركية العملية (Kinetics) محكومة بالزمن لبلوغ حالة التوازن الكيميائي المثلى.

#### III-3- النتائج التجريبية لترشيح النهائي لعينة

الجدول المقابل يوضح نتائج الترشيح النهائي لعينة والتي تتم عبر تمرير العينة على بالترتيب الموالي عند درجة حرارة  $T = 26.1$

- 1- مرشح الرمل – نشارة الخشب
- 2- مرشح الخيط
- 3- مرشح النانو المغناطيسي  $Fe_3O_4(s)$
- 4- مرشح الكربون النشط

5- مرشح الزيوليت

الجدول (3-2): الخصائص الفيزيائية المقاسة بعد الترشيح النهائي للعينة

العينة/ القياس	الأس الهيدروجيني pH	الأملاح الذائبة الكلية (TDS)	التوصيلية الكهربائية (Ec)
العينة	pH = 7.68	TDS = 1870ppm	Ec = 3500 us/cm

■ مناقشة هذه النتائج

تُظهر النتائج التجريبية كفاءة منظومة الفلترة المتكاملة في تحسين جودة مياه الصرف الصحي؛ حيث انخفض الرقم الهيدروجيني (pH) طفيفاً من 7.94 إلى 7.68 متجهاً نحو التعادل، نتيجة لقدرة الكربون المنشط والنانو المغناطيسي على موازنة الشحنات السطحية والامتزاز. كما سُجِّل تراجع متوافق في قيم الأملاح الذائبة الكلية (TDS) من 1914 ppm إلى 1870ppm، والتوصيلية الكهربائية (EC) من 3740 us/cm إلى 3500 us/cm وهو ما يُعزى مباشرة إلى نجاح المسامية العالية للكربون والجسيمات النانوية في احتجاز واقتناص جزء من الأيونات والمعادن، مدعومة بالترشيح الميكانيكي لفلتر الرمل، الخيط، ونجارة الخشب في حجز العوالق؛ ورغم أن نسبة خفض الأملاح جاءت محدودة لكون هذه التقنيات تستهدف أساساً الملوثات العضوية والمعادن الثقيلة بدلاً من الأيونات الذائبة الدقيقة، إلا أن النتيجة الإجمالية تؤكد نجاح المنظومة في تقليص الحمل البيئي للمياه بفاعلية.

III-4- النتائج التجريبية لقياس المعادن الثقيلة

الجدول (3-3): القيم التجريبية المقاسة للمعادن الثقيلة الموجودة في العينة بعد الترشيح النهائي

المعادن الثقيلة	القيم
Copper	0.2 mg/L
Iron	0.5 mg/L
Manganese	0 mg/L
Zinc	10 mg/L
Magnesium	25 mg/L
Mercury	0.5 mg/L
Chromium Cr	0 mg/L
Lead	50 mg/L
Cadmium	0 mg/L

4-النتائج التجريبية لقياس خصائص الفيزيوكيميائية للماء المقطر المستخلص ومناقشتها

الجدول المقابل يوضح النتائج التجريبية لقياس الخصائص الفيزيوكيميائية للماء المقطر المستخلص عند درجة حرارة الغرفة.

الجدول (3-4): الخصائص الفيزيائية المقاسة للماء المقطر المستخلص

العينة / القياس	الأس الهيدروجيني pH	الأملاح الذائبة الكلية (TDC)	التوصيلية الكهربائية (EC)
الماء المقطر المستخلص	pH = 7	TDC = 5 ppm	EC = 10 us/cm



الشكل (3-5): الأس الهيدروجيني المقاس للماء المقطر المستخلص (pH = 7)

#### ➤ مناقشة هذه النتائج

أظهرت نتائج المعالجة كفاءة ملحوظة لعملية التقطير في خفض المحتوى الأيوني الإجمالي لمياه الصرف الصحي؛ حيث سجلت المؤشرات انخفاضاً كبيراً في قيم الأملاح الذائبة الكلية (TDS) لتصل إلى 244 ppm، وهو ما يتطابق هيدروليكيًا وكيميائيًا مع قيمة التوصيلية الكهربائية (EC) المتحصلة والتي بلغت 488 ppm إن هذا الهبوط الحاد من آلاف الأجزاء في المليون (المميزة لمياه الصرف) إلى هذه القيم المنخفضة يؤكد نجاح التقطير في احتجاز وتجريد المياه من الغالبية العظمى من المركبات والأيونات الذائبة، مما أثمر عن مياه متعادلة كيميائياً (pH = 7) وذات صفاء بصري تام.

### III-5- مناقشة نتائج اختبار الحرق للوقود الحيوي

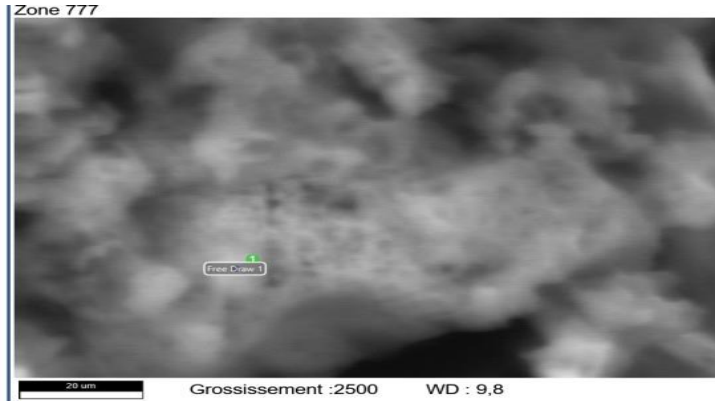
تُقدم الدراسة التجريبية، المعززة بالملاحظات البصرية لاختبار الحرق الموضح في الشكل، دليلاً قاطعاً على الكفاءة الاحتراقية العالية للبيوديزل المستخلص عبر تفاعل الأسترة التبادلية (Transesterification). حيث تُرجم الانخفاض الحاد في اللزوجة الكينماتيكية للوقود عملياً في سرعة اشتعال ملحوظة نتيجة سهولة تذير العينة وخفض طاقة التنشيط اللازمة لبدء التفاعل. كما تميزت العينة بلهب ساطع ذي لون برتقالي ناصع وصافٍ، يعكس التوزيع المثالي لدرجات الحرارة داخل اللهب، والنقاء الكيميائي الغني بالأكسجين البنيوي (R-COO-R') الذي يضمن حدوث احتراق تام. وتتأكد الفعالية الهندسية والبيئية لهذا الوقود الحيوي في الحد شبه الكلي من تشكّل السناج والرماد أو الجسيمات الكربونية المتطايرة، مما يجعله بديلاً طاقياً مستداماً ومتفوقاً علمياً على الديزل البترولي التقليدي.



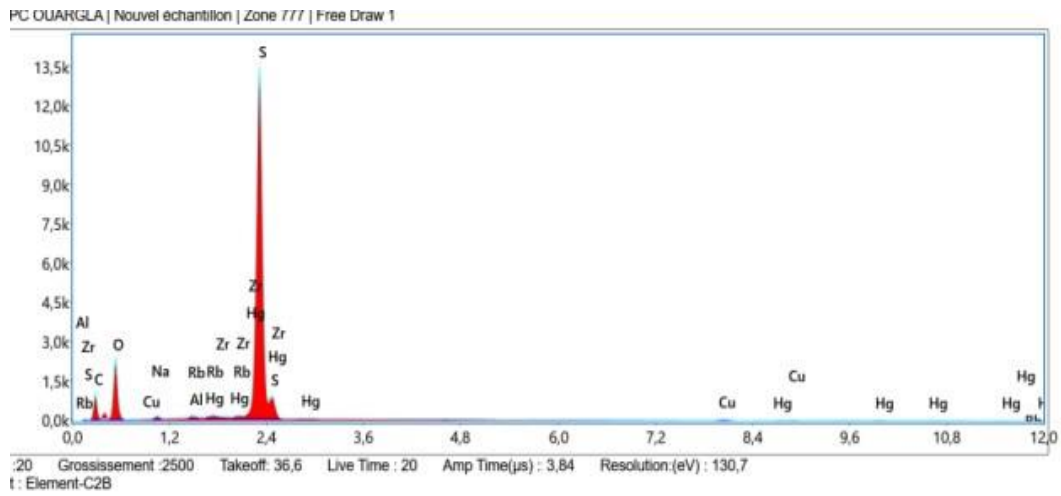
الشكل (3-6): نتائج اختبار الحرق للوقود الحيوي

### III-6- نتائج التحاليل المورفولوجية

#### III-6-1- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة الزيوليت



الشكل (3-7): صورة بالمهجر الالكتروني الماسح لعينة الزيوليت



الشكل (3-8): طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة الزيوليت.

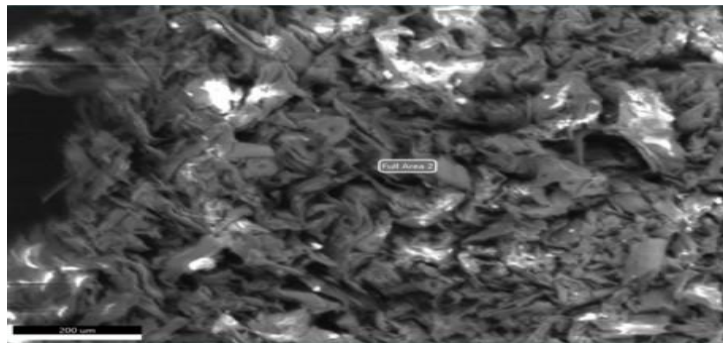
الجدول (3-9): التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة الزيوليت.

Element	Weight %	% atomique	K Ratio	Z	A	F
C K	28.59	45.39	0.0310	1.0935	0.0990	1.0000
O K	23.94	28.54	0.0399	1.0484	0.1588	1.0000
Na K	0.58	0.48	0.0023	0.9539	0.4258	1.0012
Al K	0.34	0.24	0.0024	0.9351	0.7327	1.0044
Rb L	0.37	0.08	0.0030	0.7345	1.1001	1.0029
Zr L	0.42	0.09	0.0035	0.7372	1.1407	1.0061
S K	41.38	24.61	0.3677	0.9368	0.9468	1.0017
Cu K	0.76	0.23	0.0068	0.7731	1.0022	1.1547
Hg L	3.63	0.34	0.0202	0.5305	1.0396	1.0088

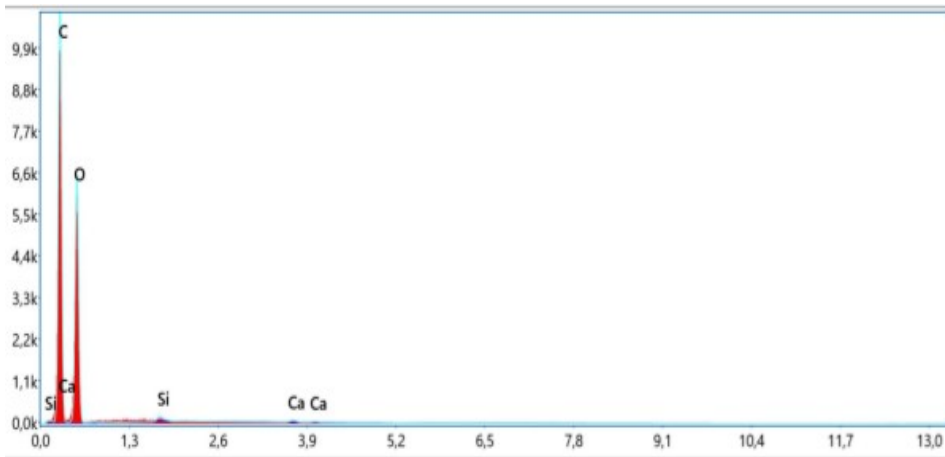
#### • مناقشة هذه النتائج

تُظهر نتائج الفحص المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بمطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (SEM-EDX) لعينة الزيوليت المستعملة في فلتر مياه الصرف الصحي بنية سطحية غير متجانسة تتكون من تجمعات لجسيمات متفاوتة الحجم ذات مورفولوجيا مسامية واضحة، وهي ميزة بنيوية حاسمة وقّرت مساحة سطحية واسعة ومراكز امتزاز نشطة سهّلت نفاذية المياه واحتجاز الملوثات. ومن الناحية الكيميائية، كشف التحليل العنصري عن هيمنة واضحة لعنصر الكبريت (S) بنسبة وزنية بلغت 41.38%، يليه الكربون (C) بنسبة 28.59% والأكسجين (O) بنسبة 23.94%، مما يشير إلى نجاح تشكيل مصفوفة كربونية-أكسجينية غنية جداً بالكبريت على هيكل الزيوليت. وتتكامل هذه المعطيات الكيميائية والمورفولوجية لتفسير النجاح العالي لعملية الفلتر؛ حيث رصد الطيف وجود نسب أثرية من المعادن المحتجزة كالزئبق (Hg) بنسبة 3.63%، والنحاس، والزركونيوم، واليوروبيوم، والألمنيوم، وهي أدلة كيميائية قاطعة تثبت الطبيعة المركبة الفعالة للعينة وتؤكد كفاءتها الاستثنائية في التقاط واحتجاز المعادن الثقيلة والملوثات من مياه الصرف الصحي المستهدفة.

#### III-6-2- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة نشارة الخشب



الشكل (3-10): صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لعينة نشارة الخشب



الشكل (3-11): طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة نشارة الخشب

الجدول (3-12): التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة نشارة الخشب

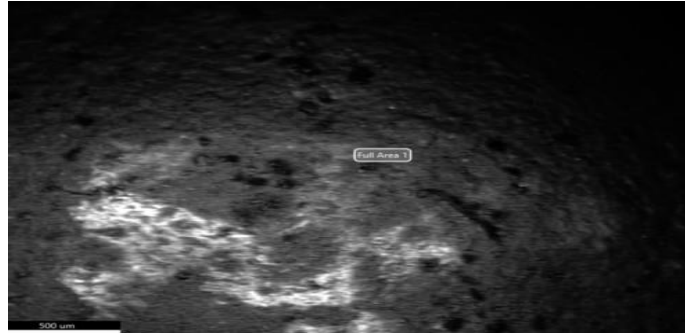
Résultats quantitatifs intelligents

Élément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
CK	49.81	57.09	0,3045	1.0228	0.5979	1.0000
OK	49.56	42.64	0,1098	0.9773	0.2268	1.0000
SiK	0.36	0.18	0,0027	0.8861	0.8444	1.0048
CaK	0.27	0.09	0,0024	0.8353	1.0258	1.0470

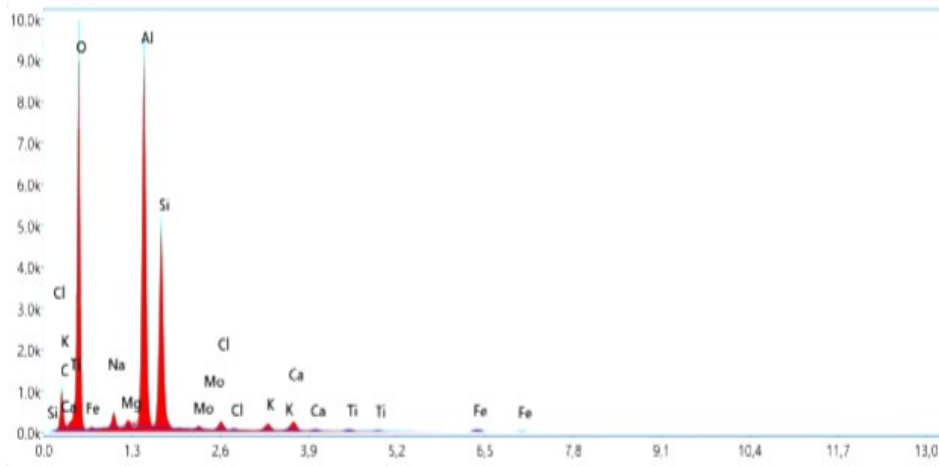
• مناقشة هذه النتائج

أظهر الفحص الميكروسكوبي بالـ (SEM) لعينة نشارة الخشب بنية مورفولوجية ليفية وغير متجانسة؛ وهي بنيوية مثالية تفسر النجاح العالي للعينة في فترة مياه الصرف الصحي، حيث تمنح هذه الألياف المتداخلة مساحة سطحية واسعة وقنوات مسامية دقيقة تزيد من كفاءة الاحتجاز الميكانيكي للملوثات وامتزازها. وكشف تحليل الطيف (EDX) للمنطقتين المقاستين عن طبيعتها العضوية النقية بامتياز؛ نظراً للهيمنة المطلقة لعنصري الكربون (C) والأكسجين (O) بنسب وزنية متساوية تقريباً تقترب من 50% لكل منهما، مما يؤكد وفرة المجموعات الوظيفية السليلوزية النشطة (كالهيدروكسيل) المسؤولة عن الارتباط الكيميائي بالملوثات وتثبيتها. وفي حين تعكس هذه الهيمنة مصفوفة بوليمرية أساسية دامة لآلية الفلترة، رصد التحليل وجود آثار لعناصر معدنية دقيقة بنسب ضئيلة جداً لا تتعدى 1% في مجموعها؛ تمثلت في السيليكون والكالسيوم في المنطقة الأولى، والمغنيسيوم والألومنيوم والانتيمون في المنطقة الثانية. ويُعزى ظهور هذه العناصر الثانوية إلى شوائب بيئية طبيعية (كالكالسيوم والأملاح المحتجزة) أو بقايا مضافات ومحفزات كيميائية من الوسط، والتي لم تؤثر سلباً على النقاء العضوي للمصفوفة السليلوزية لنشارة الخشب، مما يثبت فعاليتها وجاهزيتها العالية كوسط ترشيح حيوي واعد ومستدام.

III-6-3- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة الكربون النشط



الشكل (3-13): صورة بالمجهر الالكتروني الماسح لعينة الكربون النشط



الشكل (3-14): طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة الكربون النشط

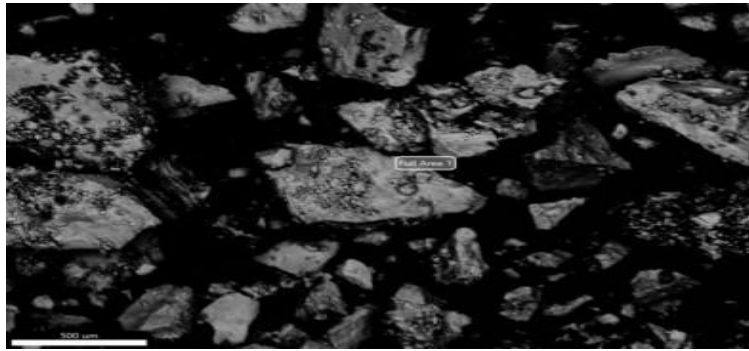
الجدول (3-15): التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة الكربون النشط

Résultats quantitatifs intelligents						
Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	12.89	19.87	0,0225	1.0843	0.1607	1.0000
O K	45.99	53.20	0,1495	1.0382	0.3130	1.0000
NaK	1.64	1.32	0,0068	0.9434	0.4400	1.0030
MgK	0.72	0.55	0,0041	0.9596	0.5953	1.0056
AlK	21.42	14.69	0,1453	0.9241	0.7313	1.0039
SiK	13.06	8.60	0,0813	0.9444	0.6578	1.0019
MoL	0.49	0.09	0,0032	0.7222	0.9163	1.0000
ClK	0.77	0.40	0,0057	0.8799	0.8371	1.0075
KK	0.73	0.35	0,0061	0.8756	0.9278	1.0151
CaK	1.16	0.54	0,0100	0.8916	0.9526	1.0168
TiK	0.32	0.12	0,0026	0.8081	0.9824	1.0332
FeK	0.81	0.27	0,0070	0.7948	1.0057	1.0835

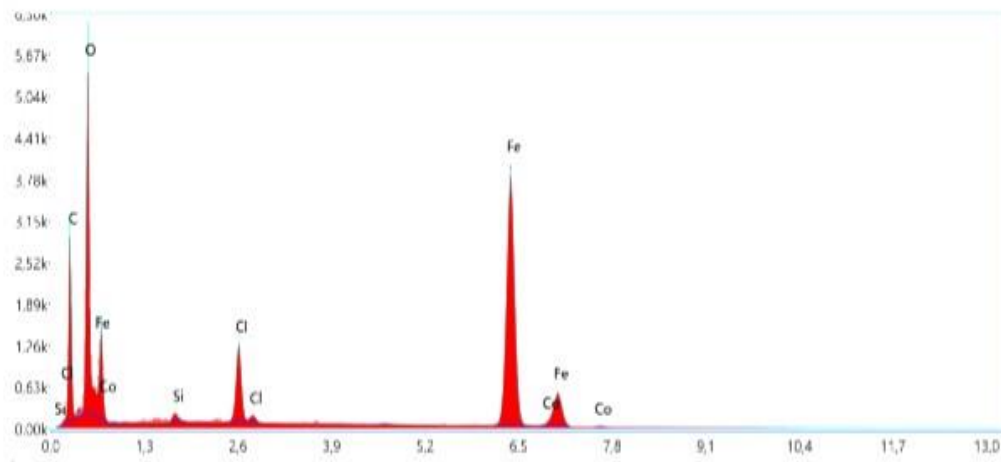
• مناقشة هذه النتائج

يُظهر التحليل المورفولوجي المجهرية (MEB) المصحوب بالتحليل الطيفي لتشتت طاقة الأشعة السينية (EDX) تباينًا طوبوغرافيًا واضحًا على سطح عينة الكربون النشط. ويكشف التحليل الكمي للمنطقة الشاملة (Full Area 1) عن هيمنة رئيسية لعنصري الأكسجين بنسبة (45.99% وزناً) والكربون بنسبة (12.89% وزناً)، مما يؤكد على مصفوفة غنية بالمجموعات الوظيفية الأكسجينية والكربونية، والتي لعبت دوراً محورياً في نجاح عملية الفلترة من خلال تحفيز الامتزاز الكيميائي للملوثات. ومن جانب آخر، يتميز التركيب غير العضوي للمادة بالسيادة المطلقة لعنصري الألمنيوم (21.42%) والسيليكون (13.06%)، بنسبة كتلة تفوق الواحد ( $Al/Si \cong 1.64$ )، وهي بصمة ألومينوسيليكاتية نمطية تميز البنيات الزيوليتية أو الطينية. كما رُصد وجود كاتيونات معوضة للشحنة وقابلة للتبادل بنسب متفاوتة، تمثلت في الصوديوم (1.64%)، الكالسيوم (1.16%)، الكلور (0.77%)، البوتاسيوم (0.73%)، والمغنيسيوم (0.72%)، وهو ما يفسر الكفاءة العالية للعينة في معالجة مياه الصرف الصحي، مؤكداً طبيعتها المسامية وقدرتها الفائقة على احتجاز الشوارد الملوثة عبر التبادل الأيوني. أخيراً، تعود الآثار الضئيلة المسجلة للحديد (0.81%)، المولبيديوم (0.49%)، والتيتانيوم (0.32%) إما إلى شوائب طبيعية داخل المصفوفة الخام أو بقايا عمليات تعديل لاحقة.

### III-6-4- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة المادة النانوية المغناطيسي $Fe_3O_4(s)$



الشكل (3-16): صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لعينة مادة النانو المغناطيسي  $Fe_3O_4(s)$



الشكل (3-17): طيف مطيافية تشتت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة مادة النانو المغناطيسي  $Fe_3O_4(s)$

الجدول (3-18): التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة مادة النانو المغناطيسي  $Fe_3O_4(s)$

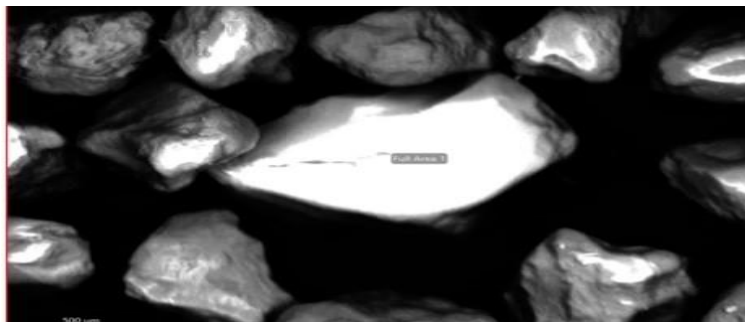
Résultats quantitatifs intelligents

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
CK	24.62	44.63	0,0727	1.1408	0.2588	1.0000
OK	25.69	34.95	0,0868	1.0953	0.3085	1.0000
SiK	0.43	0.33	0,0028	1.0017	0.6470	1.0035
ClK	3.96	2.43	0,0335	0.9351	0.8935	1.0124
FeK	44.73	17.44	0,3861	0.8491	1.0089	1.0075
CoK	0.57	0.21	0,0048	0.8298	1.0038	1.0111

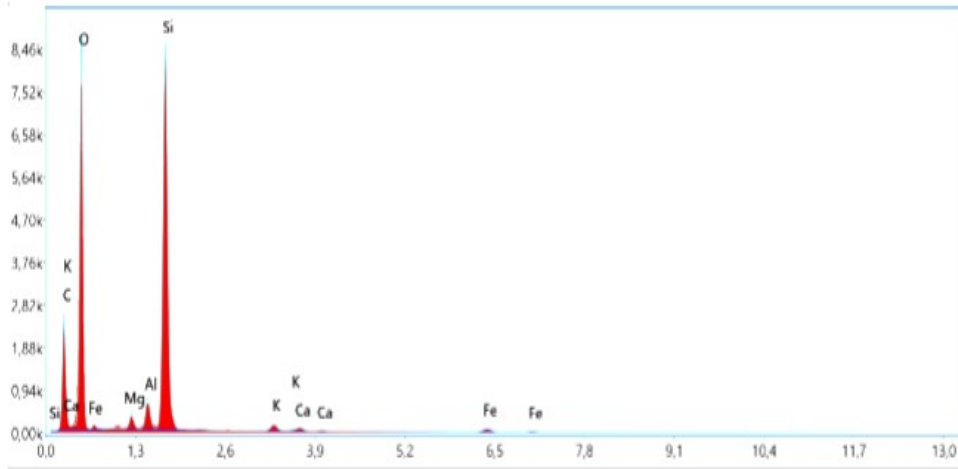
• مناقشة هذه النتائج

أظهر التحليل المورفولوجي للعينة النانو المغناطيسي  $Fe_3O_4(s)$  بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) بنية سطحية غير متجانسة تتكون من حبيبات صلبة ذات أشكال وأحجام غير منتظمة تفصل بينها مسامات وفراغات بينية واضحة، وهي طوبوغرافيا مثالية منحت المادة مساحة سطحية واسعة ومواقع نشطة وفيرة عززت من كفاءتها العالية في امتزاز واحتجاز الملوثات أثناء عملية الفلترة. وقد كشف التحليل الكمي الطيفي (EDX) للمنطقة الكلية أن الحديد (Fe) هو العنصر الأساسي والأغلب في العينة بنسبة كتلية بلغت 44.73% (17.44% ذري)، مدعوماً بنسب مرتفعة ومتقاربة من الأكسجين (25.69%) والكربون (24.62%)، مما يرجح بقوة تواجد الحديد في صورة أكاسيد أو هيدروكسيدات مصحوبة بمركبات أو ملوثات كربونية. وتكتسي هذه النسبة المرتفعة من الحديد أهمية بالغة؛ إذ تُعزى إليها الخصائص المغناطيسية الفائقة للمادة النانوية، والتي تضمن نجاح الفصل المغناطيسي السريع والكامل للمادة من مياه الصرف الصحي بعد تمام معالجتها، دون ترك أي رواسب ثانوية. كما رُصدت كميات ضئيلة من الكلور بنسبة 3.96% التي قد تعود لبعض الأملاح، إلى جانب آثار شائبة من السيليكون والكوبالت بنسب لم تتعد 1%. تؤكد هذه النتائج التكاملية أننا بصدد مادة حديدية مسامية غنية بالأكاسيد، أثبتت توافقاً تاماً بين خصائصها البنوية والعنصرية الواعدة وبين نجاحها التطبيقي في إزالة ملوثات مياه الصرف الصحي بكفاءة وفصلها ديناميكياً بكل سهولة.

III-6-5- نتائج التحليل المورفولوجي لعينة الرمل



الشكل (3-19): صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لعينة حبيبات الرمل



الشكل (3-20): طيف مطيافية نشنت الطاقة للأشعة السينية (EDX) المرفق بال MEB لعينة الرمل.

الجدول (3-21): التركيب العنصري الكيميائي ونسب التوزيع الكتلية والذرية لعناصر عينة الرمل.

Résultats quantitatifs intelligents

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
CK	27.82	37.53	0,0649	1.0540	0.2213	1.0000
OK	48.48	49.10	0,1344	1.0084	0.2750	1.0000
MgK	0.94	0.63	0,0052	0.9311	0.5938	1.0046
AlK	1.67	1.00	0,0110	0.8965	0.7305	1.0078
SiK	19.14	11.04	0,1447	0.9161	0.8237	1.0019
KK	0.69	0.28	0,0057	0.8490	0.9623	1.0172
CaK	0.42	0.17	0,0036	0.8644	0.9789	1.0217
FeK	0.84	0.25	0,0073	0.7702	1.0118	1.1050

• مناقشة هذه النتائج

تُظهر صور المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لعينة الرمل المستخدمة بنيت حبيبية غير متجانسة ذات حواف وزوايا واضحة مع تباين في السطوح يعكس اختلافاً في الطوبوغرافيا السطحية وكثافة المادة. وقد عزز التحليل الطيفي (EDX) هذه الملاحظات بالكشف عن تركيب كيميائي يهيمن عليه الأكسجين بنسبة كتلية (48.48%)، يليه الكربون (27.82%)، ثم السيليكون (19.14%). ويُعزى الارتفاع الملحوظ في نسبتي السيليكون والأكسجين، إلى جانب وجود عناصر ثانوية وأثرية كالألومنيوم (1.67%)، المغنيسيوم (0.94%)، والحديد (0.84%)، إلى الطبيعة السيليكاتية الهيكلية للعينة (مثل معادن الكوارتز، الفيلدسبار، أو المواد الطينية). وتعكس هذه الخصائص البنوية والكيميائية المجتمعة النجاح الملحوظ الذي حققته عينة الرمل في ترشيح مياه الصرف

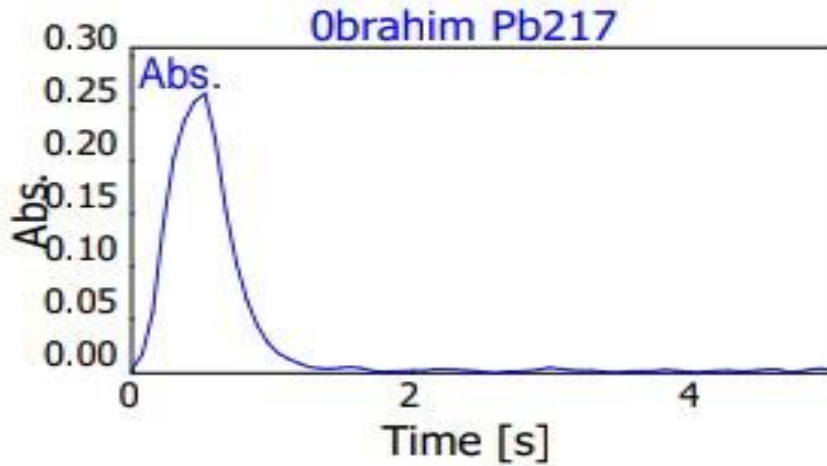
الصحي؛ إذ تساهم الخشونة السطحية والمورفولوجيا الزاوية للحبيبات في زيادة مساحة السطح النوعية وتوفير مواقع احتجاز ميكانيكية حيوية لتثبيت وعزل المواد العالقة والملوثات، في حين تمنحها الطبيعة السيليكاوية المستقرة خصائص امتزاز ممتازة تعزز من كفاءة التصفية الفزيائية والكيميائية للمياه المعالجة. في حين تُرجح النسبة المرتفعة للكربون إما لوجود مكونات كربونية أصيلة في العينة (أو ملوثات عضوية محتجزة أثناء الترشيح)، أو نتيجةً لاستخدام شريط الكربون اللاصق أثناء تحضيرها للفحص.

### III-7- نتائج التحاليل الطيفية

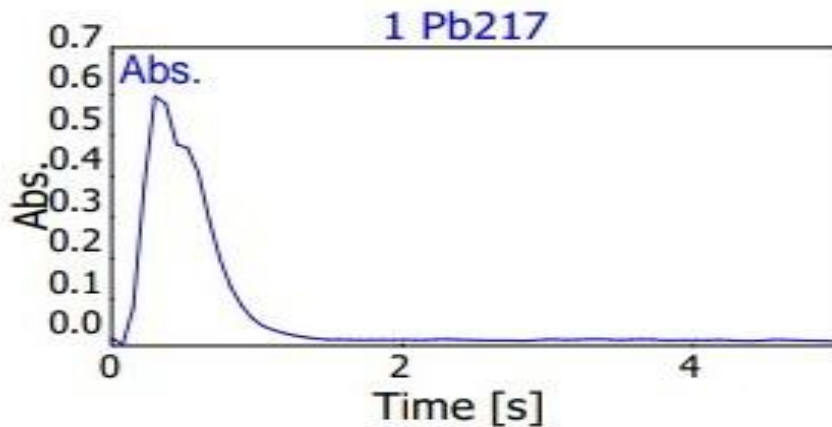
#### III-7-1- نتائج التحليل الطيفي الذري

##### III-7-1-1- نتائج التحليل الطيفي لعنصر الرصاص (Pb) الموجود في العينة بعد الترشيح النهائي

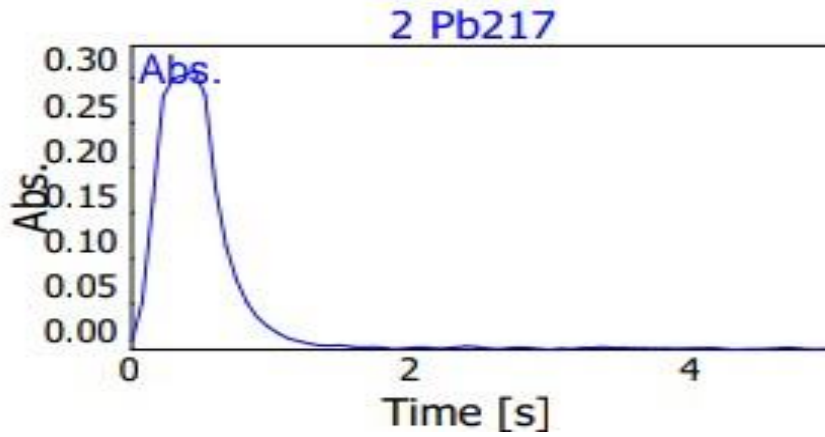
➤ نتائج التحليل الطيفي لعنصر الرصاص (Pb) الموجودة في المجموعة الأولى



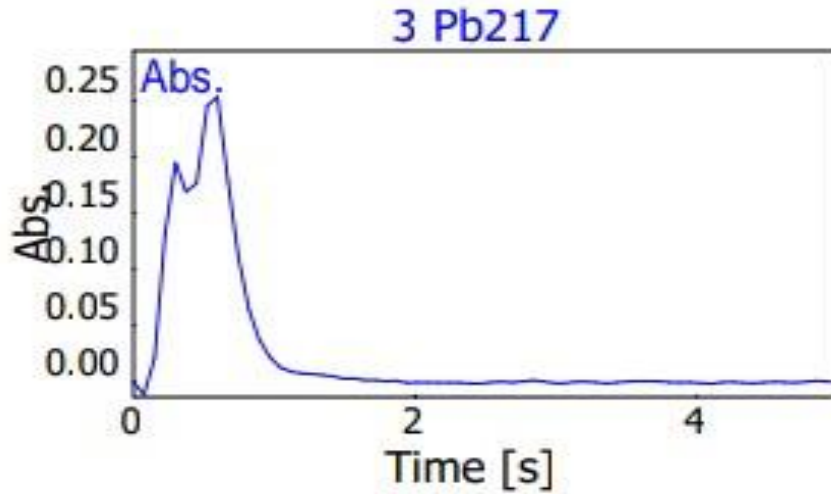
الشكل (3-22): منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (0) المرجعية.



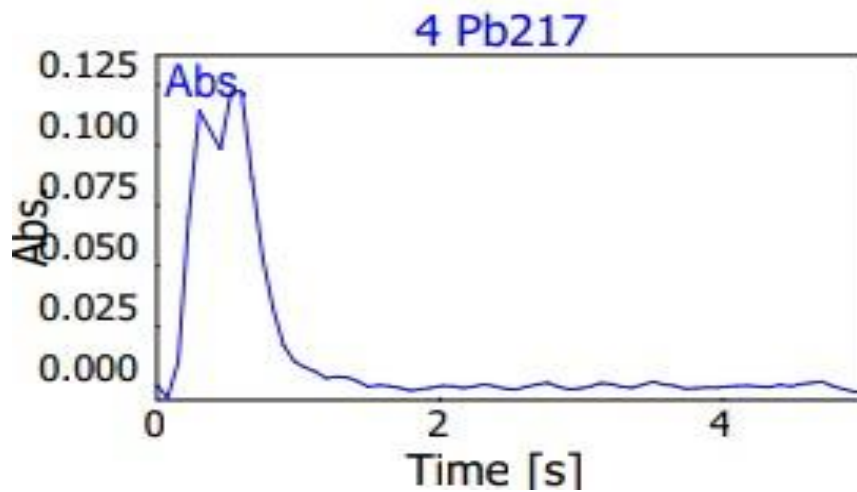
الشكل (3-23): منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (1).



الشكل (24-3): منحى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (2).



الشكل (25-3): منحى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (3).



الشكل (26-3): منحى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (4).

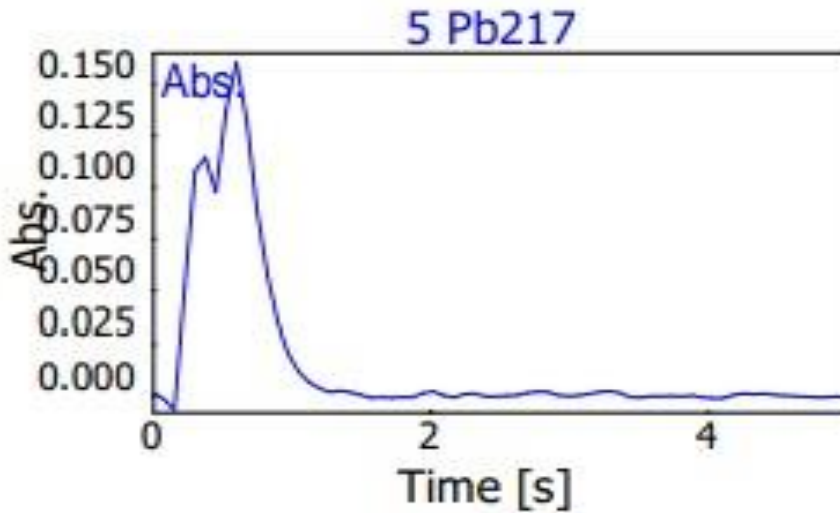
■ مناقشة هذه النتائج

تمثل الأشكال (22-3)، (24-3)، (24-3)، (25-3)، (26-3) منحنيات تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في عينات المجموعة الأولى حيث أظهرت نتائج مطيافية الامتصاص الذري (SAA) تفاوتاً في تركيز عنصر الرصاص (Pb) بين عينات المجموعة الأولى؛ إذ سجلت العينات (5-8) أعلى تركيز مسجل عند  $48.08 \mu\text{g/L}$  متبوعة بالمرشحات التمهيدية (مرشح الخيط، الرمل، ونشارة الخشب) بتركيز متبقية بلغت  $28.09 \mu\text{g/L}$  و  $20.25 \mu\text{g/L}$  في حين استقرت العينة الشاهدة المرجعية (brahim0) عند  $23.44 \mu\text{g/L}$ . وفي المقابل، حققت التقنيات المتقدمة (مرشح الكربون النشط، مادة النانو المغناطيسي، والزيوليت) أعلى كفاءة تنقية بنزول التركيز إلى أدنى مستوى له عند  $10.65 \mu\text{g/L}$  وعند مقارنة هذه النتائج بالمعايير الجزائرية للمياه المستعملة ( $10 \text{ mg/L} \leq$ ) أي ( $10000 \mu\text{g/L} \leq$ ) يتضح النجاح الباهر للمنظومة؛ حيث وقعت جميع العينات دون السقف القانوني بمئات الأضعاف، محققة نسبة أمان ومطابقة للمواصفات تتعد  $99.51\%$ .

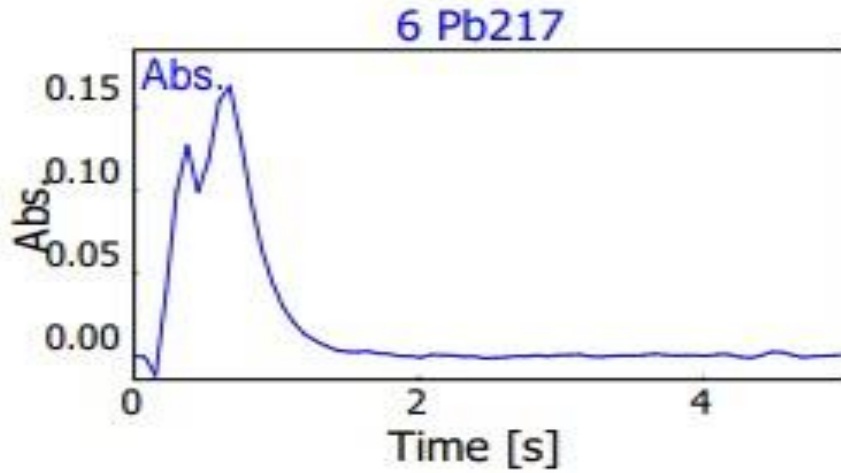
■ التفسير

يعود هذا التباين الملحوظ في كفاءة التطهير إلى اختلاف آليات الاحتجاز والخصائص البنوية للأوساط الترشيحية المستخدمة؛ فبينما اعتمدت المرشحات الأولية كمرشح الخيط والرمل على الحجز الفيزيائي والميكانيكي للجزيئات، وفرت نشارة الخشب ومادة الكربون النشط مساحات سطحية مسامية ساهمت في امتزاز الملوثات. ومن جهة أخرى، قادت المواد المتقدمة لمواصفات تصفية فائقة، ويرجع ذلك إلى السعة التبادلية العالية لشبكة الزيوليت، وقوة الجذب السطحي والمغناطيسي للجسيمات النانوية، مما أدى إلى احتجاز قطعي لأيونات الرصاص الثنائية على المواقع الفعالة، مؤمناً جودة بيئية ممتازة تتوافق تماماً مع التشريعات الوطنية.

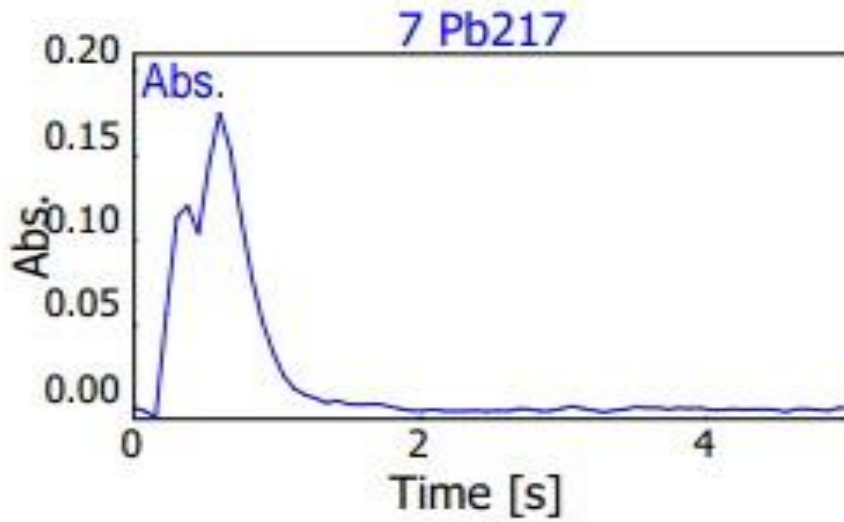
➤ نتائج التحليل الطيفي لعنصر الرصاص (Pb) الموجود في المجموعة الثاني



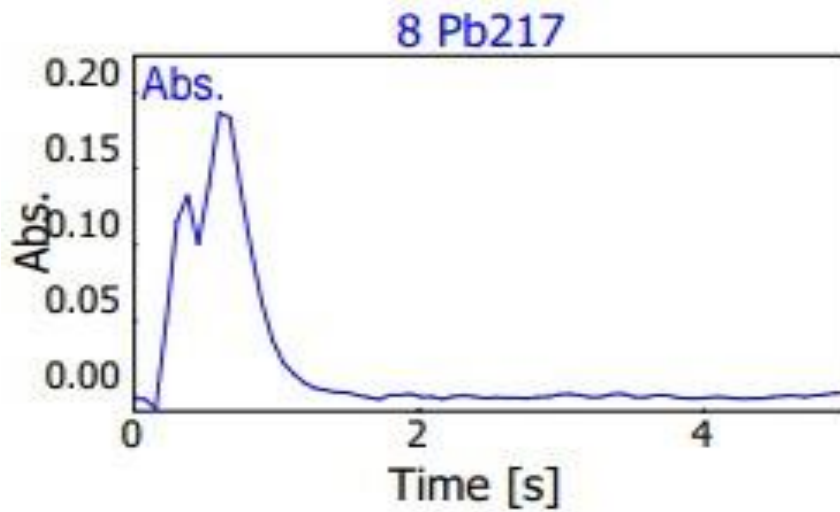
الشكل (3-27): منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (5).



الشكل (28-3): منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (6).



الشكل (29-3): منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (7).



الشكل (30-3): منحنى تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في العينة رقم (8).

■ مناقشة هذه النتائج

تمثل الأشكال (27-3), (28-3), (29-3), (30-3) منحنيات تغيرات الامتصاصية بدلالة الزمن لعنصر الرصاص (Pb) في عينات المجموعة الثانية حيث أثبتت نتائج التحليل المخبري بتقنية مطيافية الامتصاص الذري (SAA) الكفاءة العالية لمنظومة الترشيح المتقدمة؛ حيث سجلت عينات مياه الصرف الصحي الخام غير الممررة عبر المرشحات الستة (الرمل، نشارة الخشب، المادة النانوية المغناطيسية، الزيوليت، الكربون النشط، والخيط) تراكيز واضحة للرصاص (Pb) تراوحت بين 12.86ug/L كحد أدنى و 16.17ug/L كحد أقصى (بمتوسط 14.76ug/L)، وقيم امتصاصية بين (0.07698 و 0.09634). وعند إسقاط هذه القيم على المعايير الجزائرية لتصريف مياه الصرف الصحي (المرسوم التنفيذي 12-43) المحددة بـ  $10\text{mg/L} \leq$  يتضح أن جميع التراكيز المقاسة سواء للعينات الخام أو المرشحة تعد ضئيلة جداً وتدرج بأمان تام وبفارق شاسع (أقل بألاف المرات) تحت السقف القانوني المسموح به، مما يؤكد الصلاحية البيئية التامة لعملية المعالجة.

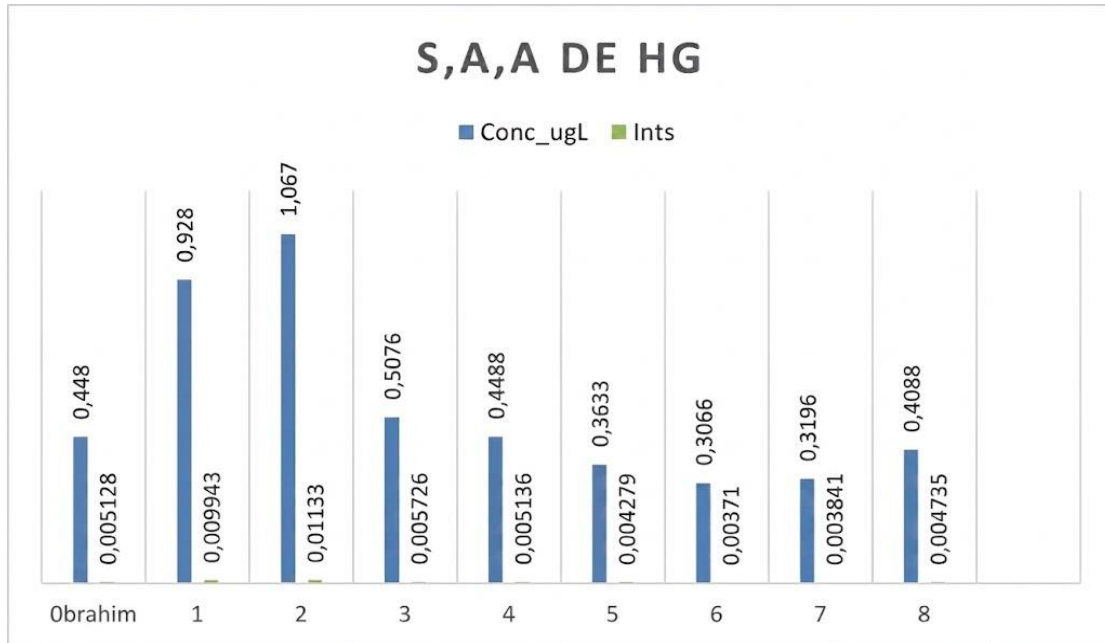
■ التفسير

يعود ظهور التراكيز المذكورة في العينات غير المرشحة إلى عملية الهضم الحمضي الكامل للمادة العضوية بواسطة الماء الملكي، مما ساهم في تحرير أيونات الرصاص واكتشافها بدقة. وفي المقابل، فإن الانخفاض الملحوظ في تركيز الرصاص بعد المرور بالمنظومة المركبة يرجع إلى كفاءة الإزالة النوعية الممتازة التي حققتها المرشحات؛ ويُفسر ذلك بالقدرة الامتزازية العالية لمنصات الزيوليت، والتآزر الهيكلي المدعم بالجسيمات النانوية المغناطيسية والكربون النشط، إلى جانب الدور الميكانيكي لمرشحات الرمل، ونشارة الخشب، والخيط، مما أدى في مجموعهِ إلى اقتناص فعال وتثبيت محكم لأيونات الرصاص الثنائية على السطوح المسامية للمواد الممتزة.

➤ مقارنة نتائج التحليل الطيفي لعنصر الرصاص لمجموعتين

تؤكد المقارنة التأزرية لنتائج المجموعتين بواسطة مطيافية (SAA) النجاح القطعي للمنظومة المطورة في إزالة أيونات الرصاص ( $Pb^{+2}$ ) حيث أظهرت المجموعة الأولى كفاءة متفوقة للتقنيات المتقدمة (كالزيوليت والنانو المغناطيسي) بتخفيض التركيز إلى 10.65ug/L مقارنة بالشاهد (23.44ug/L)، مما فسر نجاح المنظومة المركبة في المجموعة الثانية؛ إذ بالرغم من تحرير تراكيز رصاص أولية بالماء الملكي وصلت إلى 16.17ug/L (بامتصاصية 0.09634 ومتوسط 14.76ug/L) إلا أن التداخل الامتزازي للمنظومة حقق إزالة نوعية ممتازة وتلافى قصور الأوساط المنفردة التي سجلت تراكيز متبقية وصلت لـ 48.08ug/L ومقارنةً بالمعايير الجزائرية (10mg/L أي 10000ug/L)، فإن جميع النتائج تقع دون السقف القانوني بألاف المرات وبنسبة أمان ومطابقة للمواصفات تتعدى 99.51% حيث لم تتجاوز أقصى قيمة متبقية نسبة 0.48% من الحد المسموح به، مما يثبت الصلاحية البيئية والجدوى التطبيقية التامة للمنظومة.

III-7-1-2- نتائج التحليل الطيفي لعنصر الزئبق (Hg) الموجود في العينة بعد ترشيحها



الشكل (31-3): قيم تراكيز وشدة الامتصاص الذري (SAA) لعنصر الزئبق (Hg) بدلالة عينات المجموعتين الأولى والثانية مقارنة بالعينة المرجعية brahim0

➤ نتائج التحليل الطيفي لعنصر الزئبق (Hg) الموجود في المجموعة الأولى  
■ مناقشة هذه النتائج

يمثل الشكل (31-3) قيم تراكيز وشدة الامتصاص الذري (SAA) لعنصر الزئبق (Hg) بدلالة عينات المجموعتين الأولى والثانية مقارنة بالعينة المرجعية brahim0. حيث تضم المجموعة الأولى عينات مياه الصرف الصحي التي مرت عبر أوساط الترشيح المختلفة (الرمل ونشارة الخشب، الزيوليت، الكربون المنشط، الخيط، والجسيمات النانوية المغناطيسية)؛ حيث خضعت العينات المرشحة لعملية الهضم الكيميائي بواسطة الماء الملكي قبل قياس تراكيزها بدقة باستخدام مطيافية الامتصاص الذري (SAA). وعند مقارنة نتائج هذه المجموعة عددياً بالعينة المرجعية brahim0 (والتي سجلت تركيز زئبق قدره 0.4488ug/L تقارباً كبيراً وتذبذباً ضئيلاً في القيم المقاسة، حيث سجلت العينات التراكيز التالية: العينة (1) لوحظ ارتفاع حاد في التركيز ليصل الى 0.9280ug/L و استمر هذا الارتفاع ليبلغ ذروته عند العينة (2) ب 1.067ug/L بينما حققت المنظومة تراجعاً عند العينة (3) ليصل الى 0.5076ug/L وصولاً الى العينة (4) التي عاد فيها التركيز للاستقرار تماماً عند قيمته المرجعية الاصلية 0.4488ug/L وبمقارنة هذه الأرقام بالحد الأقصى المسموح به وفقاً للمواصفات البيئية الجزائرية (0.01mg/L) أي (≤ 10ug/L) نجد أن جميع القراءات جاءت أدنى بكثير من العتبة القانونية بأضعاف مضاعفة، مما يمنح هذه المجموعة الأولى نسبة نجاح كاملة بلغت 100% من حيث الأمان البيئي والمطابقة الصارمة للمعايير الوطنية.

■ التفسير

يعود هذا السلوك الرقمي والارتفاع الذي تخطى حاجز الـ 100% في المراحل الأولى إلى آليات التفاعل الكيميائي داخل نظام الترشيح المتتابع بفعل إضافة الماء الملكي. إن الزيادة الكبيرة في

التركيز عند مرحلتي فلتر الرمل ونشارة الخشب ثم فلتر الخيط (وصولاً إلى 1.067ug/L) تُفسر علمياً بحدوث ظاهرة التملص الكيميائي الحاد حيث تسبب الوسط الحمضي القوي جداً للماء الملكي في تفكيك وتحرير أيونات الزئبق التي كانت ممتزة أو محتجزة في المسامات الداخلية وبين حبيبات أوساط الترشيح، مما أدى إلى انطلاقها مجدداً في طور السائل بتركيز أعلى. وتظهر الكفاءة الحقيقية ونسبة نجاح الإزالة للمنظومة عند الانتقال للمراحل المتقدمة؛ حيث نجح فلتر الكربون النشط (ARIF 3) في خفض التركيز بمقدار النصف تقريباً وبنسبة نجاح بلغت 52.43% نتيجة مساحته السطحية المسامية الهائلة. وتكلفت العملية بالنجاح التام عند المرور بفلتر المادة النانوية المغناطيسية (ARIF 4)، والذي تمكن بفضل خصائصه النانوية النشطة وقوة جذبته الكيميائي للمعادن الثقيلة من اختزال التركيز الزائد بالكامل وإعادة تدقيقه إلى قيمة العينة المرجعية (0.4488ug/L) مما يثبت الفعالية العالية للمنظومة المتكاملة في السيطرة على حركة العنصر وتأمين معالجة نهائية مطابقة للمواصفات القياسية.

### ➤ نتائج التحليل الطيفي لعنصر الزئبق (Hg) الموجود في المجموعة الثانية

■ مناقشة هذه النتائج

يمثل الشكل (3-31) قيم تراكيز وشدة الامتصاص الذري (SAA) لعنصر الزئبق (Hg) بدلالة عينات المجموعتين الأولى والثانية مقارنة بالعينة المرجعية brahim0. حيث سجلت هذه العينات انخفاضاً في تراكيز الزئبق مقارنة بالعينة المرجعية (ARIF0) التي بلغت قيمتها 0.4488ug/L وتفاوتت نسبة نجاح العملية في خفض تركيز المعدن بين العينات؛ حيث حققت العينة (ARIF 6) أعلى نسبة انخفاض بلغت 31.56% (بتركيز 0.3066ug/L)، تليها العينة (ARIF 7) بنسبة 28.66% (بتركيز 0.3196ug/L)، ثم العينة (ARIF 5) بنسبة 18.91% (بتركيز 0.3633ug/L)، بينما كانت العينة (ARIF 8) الأقل استجابة بنسبة خفض 8.75% فقط (بتركيز 0.4088ug/L). وعند مقارنة هذه النتائج بالمعيار الوطني لمياه الصرف الصحي ( $\leq 10\text{ug/L}$ ) أو ما يعادل (0.01mg/L) أن جميع العينات المدروسة تقع بأمان تحت هذا الحد القانوني بألاف المرات، مما يؤكد مطابقتها التامة للمواصفات وصلاحياتها البيئية بالرغم من أن هذه المجموعة لم تمر عبر مراحل الترشيح المقترحة (مرشح الرمل، مرشح نشارة الخشب، مرشح الكربون النشط، مرشح الخيط، مرشح مادة النانو المغناطيسية، ومرشح الزيوليت).

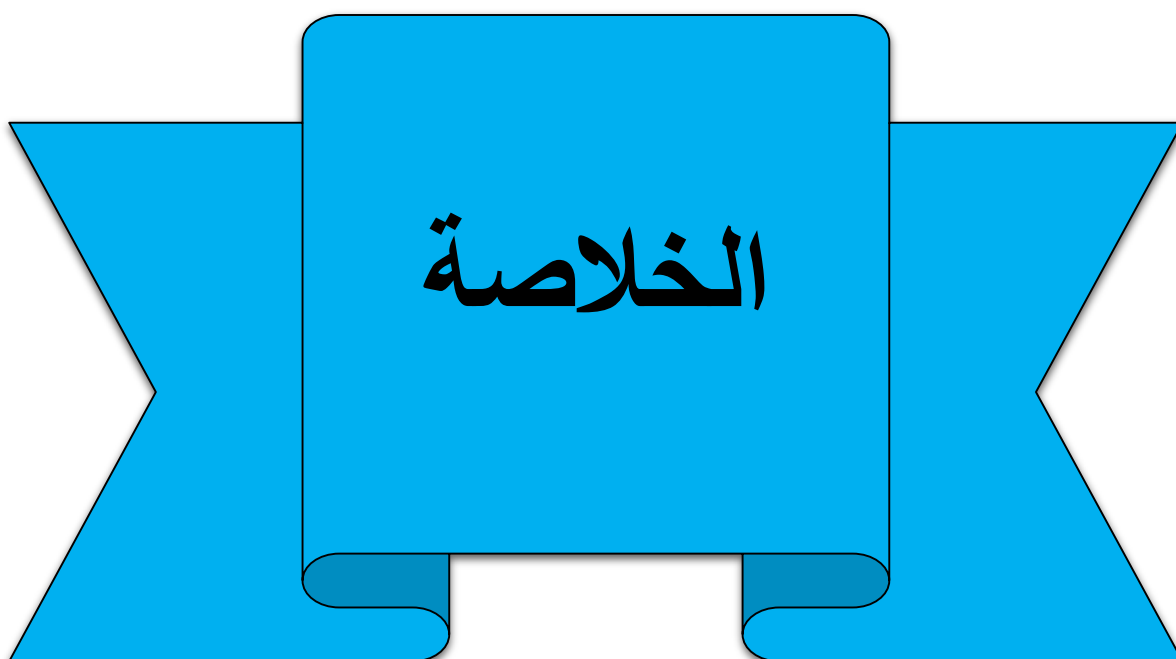
### ■ التفسير

يعود هذا التباين والانخفاض الجزئي في نسب الزئبق إلى كفاءة عملية الهضم الحمضي بواسطة "الماء الملكي" المضاف مباشرة إلى العينات غير المرشحة؛ حيث يعمل هذا المزيج الحمضي القوي على تفكيك المواد العضوية والشوائب المعقدة المحيطة بالزئبق وتحريره، مما يتيح لجهاز (SAA) قراءته بدقة متناهية. ونظراً لأن هذه العينات لم تخضع للترشيح بواسطة سلسلة المرشحات (كالرمل، نشارة الخشب، الكربون النشط، الخيط، النانو المغناطيسي، والزيوليت)، فإن اختلاف نسب النجاح بينها (من 8% إلى 31%) يعود حصراً إلى طبيعة وحجم المكونات العضوية العالقة الأصلية في كل عينة مياه صرف، والتي تسببت في حدوث ترسيب جزئي أو تطاير موضعي للزئبق أثناء التفاعل الحمضي العنيف.

### ■ مقارنة نتائج التحليل الطيفي لعنصر الزئبق للمجموعتين

عند إجراء مقارنة تفصيلية بين المجموعة الأولى (المرشحة) والمجموعة الثانية (غير المرشحة) واللتين تم إعدادهما بواسطة saa وعلاقتهما بالمرجع abraham0 يتضح تباين في سلوك الزئبق

مقارنة بالعينة المرجعية ( $0.4488\text{ug/L}$ ) فبينما شهدت المجموعة الأولى تذبذباً حاداً قفز فيه التركيز في مرحلتيه الأولى والثانية ليصل إلى ذروته عند  $1.067\text{ug/L}$  إلا أن المرشحات الستة المتتابعة لعبت دوراً محورياً في تحقيق نجاح العملية؛ حيث أثبتت كفاءة عالية كمنظومة معالجة وحماية متكاملة تمكنت من كبح هذا الارتفاع وتحقيق كفاءة إزالة نوعية لاحقة بنسبة  $52.43\%$  ( المرحلة الرابعة. وفي المقابل، سجلت المجموعة الثانية (غير المرشحة) انخفاضاً تدريجياً مستمراً في كافة عيناتها (من 5 إلى 8)، حيث كانت العينة (ARIF 6) الأعلى انخفاضاً بنسبة  $31.56\%$  ( $0.3066\text{ug/L}$ )، تلتها بقية العينات بنسب تنازلية ( $28.66\%$ ،  $18.91\%$ ، و  $8.75\%$ ). وتتوج هذه النتائج بنجاح تام للعملية بنسبة  $100\%$  في الحفاظ على أمان المياه ومطابقتها البيئية الصارمة للمواصفات؛ إذ تقع جميع نتائج المجموعتين بأمان تحت السقف القانوني للمعيار الوطني ( $\leq 10\text{ug/L}$ ) حيث لم تشكل أعلى ذروة مرصودة قبل الترشيح النهائي سوى  $10.67\%$  فقط من الحد المسموح به.



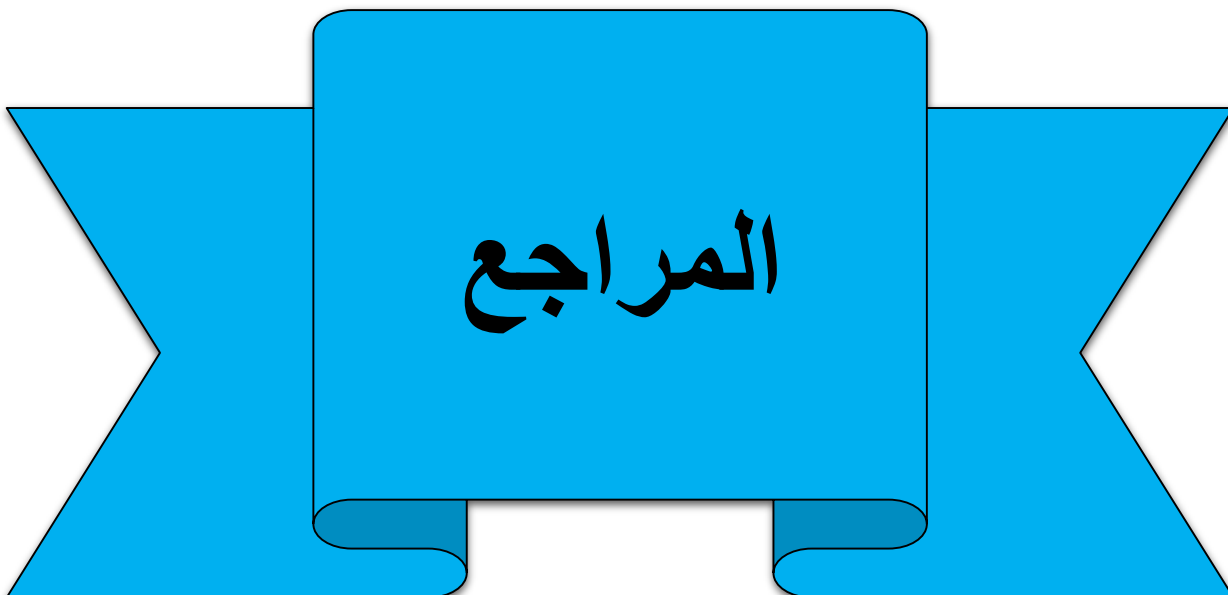
## الخلاصة

أظهرت القياسات العملية نجاحا واعدا في ترمين النفايات و توليد مركبات صديقة للبيئة و بدائل طاقوية خضراء ذات جودة عالية , ويتضح ذلك بداية بالنظر الى الوسائط الفيزيوكيميائية لعينة مياه الصرف الخام التي سجلت قبل المعالجة تلوثا مرتفعا جدا قيمته  $(pH = 7.68 \text{ Ec}=1870\text{ppm})$  , حيث ركزت المنظومة أولاً على تقليل نسب بقية المعادن الثقيلة لتوافق الحدود القانونية، كما حققت خفضاً تاماً بنسبة 100% لنسب الرصاص والزنك بواسطة تقنية مطيافية الامتصاص الذري (SAA) لتطابق المعايير الجزائرية، مدعومة ب تحديد التركيب الكيميائي للفلاتر ودورها الهيكلي في إنجاز التصفية عبر المجهر الإلكتروني الماسح (MEB). وأثمرت هذه المعالجة المتقدمة والمشاركة عن استخلاص أسمدة عضوية من الحمأة، بالتوازي مع استخلاص ماء مقطر عالي النقاوة بمؤشرات مثالية بلغت  $(pH = 7 \text{ Ec } (TDS= 5\text{ppm}$   $= 10\text{us/cm}$  لتؤكد هذه النتائج الممتازة الكفاءة الجذرية للعملية. وتكاملت هذه المخرجات البيئية مع توليد غازات حيوية ونظيفة شملت الأكسجين والهيدروجين الأخضر بالتحليل الكهربائي للمياه، والغاز الحيوي بالهضم اللاهوائي للحمأة، وصولاً في نهاية المطاف إلى إنتاج وقود حيوي (بيوديزل) من زيوت الطهي المستعملة عبر الأسترة التبادلية بكفاءة أكدها اختبار الحرق. وفي هذا الصدد وتجسيدا للبعد التطبيقي والاقتصادي لهذا البحث فإن هذا العمل سيظل متواصلا ومستمر في إطار مشروع المؤسسة الناشئة.

**المخلص:** قمنا في هاته الدراسة بنثمين الموارد المائية والصلبة الناتجة عن الصرف الصحي وإعادة إدماجها في الدورة الاقتصادية والبيئية، حيث أنه تمكنا من الحصول على الماء المقطر بدرجة نقاوة عالية باستخدام نظام ترشيح متتابع يعتمد على المرشحات المختلفة بالتسلسل؛ وتتكون هاته السلسلة المبتكرة من مرشح الرمل، ونشارة الخشب، ومرشح الخيط، ومرشح الكربون النشط، ومرشح مادة النانو المغناطيسي، بالإضافة إلى مرشح الزيوليت. وقد تكللت هاته المنظومة بنجاح باهر في خفض تراكيز المعادن الثقيلة الخطيرة المتواجدة في العينة، حيث أدت قوة الترشيح والامتزاز إلى الاختفاء التام لبعض المعادن السامة، في حين انخفضت مستويات كل من الرصاص والزنك بشكل ملحوظ وصولاً إلى حدود مطابقة تماماً للمواصفات والمعايير الجزائرية الصارمة، مما يمثل دليلاً قاطعاً على نجاح العملية وسلامة المياه المرشحة وفي الشق المتعلق بالنتمين الطاقوي، قمنا بعملية أسترة تبادلية لزيوت عالي النقاوة والجودة كبديل طاقوي نظيف. (Biodiesel) الطهي المستعملة، والتي أسفرت بنجاح كبير عن صنع وقود حيوي وتوسيعاً لنتائج البحث، قمنا باستخلاص الغازات الحيوية من مخلفات هاته المياه؛ حيث تم إنتاج غاز الميثان الحيوي عبر آلية الهضم اللاهوائي للحمأة، وبالموازاة مع ذلك، قمنا بتحقيق إنجاز طاقوي هام بإنتاج غاز الأوكسجين وغاز الهيدروجين الأخضر عالي الكفاءة عبر عملية التحليل الكهربائي المعتمدة أساساً على مياه الصرف الصحي المرشحة والمسترجعة. وفي ختام هاته الدراسة المتكاملة، قمنا بنجاح تام باستخلاص الأسمدة العضوية الغنية بالمغذيات الأساسية من حمأة مياه الصرف الصحي لاستغلالها في المجال الزراعي، مما يؤكد النجاح الشامل للهيكल التجريبي المقترح في تحقيق التنمية المستدامة

### Abstract:

In this study, we evaluated the water and solid resources resulting from sewage and reintegrated them into the economic and environmental cycle, as we were able to obtain distilled water with a high degree of purity using a sequential filtration system that relies on different filters in sequence; This innovative series consists of sand filter, sawdust filter, thread filter, active carbon filter, magnetic Nano filter, in addition to the zeolite filter. This system was a great success in reducing the concentrations of dangerous heavy metals present in the sample, as the power of filtration and adsorption led to the complete disappearance of some toxic metals, while the levels of lead and mercury decreased. Remarkably, reaching limits that fully conform to the strict Algerian specifications and standards, which represents conclusive evidence of the success of the process and the safety of the filtered water. In the aspect related to energy valorization, we carried out an exchange transesterification process for used cooking oils, which resulted very successfully in the manufacture of high-purity and quality biodiesel as a clean energy alternative. To expand the research results, we extracted biogases from these water wastes. Where Biomethane gas was produced through anaerobic sludge digestion mechanism, and in parallel, we achieved an important energy achievement by producing highly efficient green oxygen and hydrogen gas through an electrolysis process based mainly on filtered and recovered wastewater. At the conclusion of this integrated study, we successfully extracted organic fertilizers rich in essential nutrients from wastewater sludge to exploit them in the agricultural field, which confirms the comprehensive success of the proposed experimental structure in achieving sustainable development.



## المراجع باللغة العربية

- [2]: منظمة الصحة العالمية، (2017). مبادئ توجيهية بشأن جودة مياه الشرب: الطبعة الرابعة التي تضم التعديل الأول. جنيف.
- [3]: الأمم المتحدة، (1982). اتفاقية الأمم المتحدة لقانون البحار. الجزء الأول: عبارات مستخدمة ونطاق التطبيق، المادة 1.
- [4]: الشرايبي نجم الدين , هابيل منير, أبو لبدة زياد, أساسيات الأحياء الدقيقة – الجزء العملي المطلعة الجديدة بدمشق, 1987.
- [5]: شحاتة، حسن أحمد. (2014). تلوث المياه: التحديات والحلول. القاهرة: مكتبة الدار العربية للكتاب. ص 112.
- [6]: جودة، حسنين. (2017). البيئة المائية والملوثات. عمان: دار المنهج للنشر والتوزيع. ص 54.
- [7]: العياصرة، وليد. (2015). تلوث البيئة: الأسباب والنتائج. عمان: دار أسامة للنشر. ص 89.
- [8]: حميد، مجيد جاسم. (2018). تلوث البيئة: أسبابه، آثاره، وطرق معالجته. دار الكتب العلمية. ص 142.
- [9]: الراوي، خالد. (2016). الفيزياء البيئية والتلوث الإشعاعي. عمان: دار اليازوري العلمية. ص 215.
- [10]: القصاص، محمد عبد الفتاح. (2012). الإنسان والبيئة والتنمية. سلسلة عالم المعرفة. ص 176.
- [11]: صهيب حاج عمار، دراسة قدرة النباتات على تصفية المياه المستعملة محمد احمد مراد أغا الهندسة, 2016.
- [13]: دوا، نزار حشاني. (2019). دراسة أداء محطة معالجة مياه الصرف الصحي بمدينة تقرت، جامعة محمد خيضر بسكرة، كلية العلوم والتكنولوجيا، قسم الهندسة المدنية والري.
- [15]: أحمد فيصل أصفري، إرشادات في تصميم وتشغيل وصيانة معالجة المياه العادمة, 2004 الأردن.
- [16]: نصر الحايك , مدخل إلى كيمياء الماء (تلوث-معالجة- تحليل ) , منشورات المعهد العالي للعلوم التطبيقية 2017.
- [17]: شاوش. المعايير الفيزيائية والكيميائية للمياه، جامعة قاصدي مرباح ورقلة.

- [18]: الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، العدد 41، 25 شعبان 1433 الموافق ل 15 جويلية 2012 قرار وزاري مشترك مؤرخ في 8 صفر 1433 الموافق ل 2 جانفي، 2012 يحدد خصائص المياه القذرة المصفاة المستعملة لغرض السقي.
- [21]: محمد معن برادعي (محطات معالجة مياه الصرف الصحي 2018 م) ص [112-115].
- [22]: حسن إبراهيم الزعبي وآخرون، استعمال مياه الصرف الصحي المعالجة في الزراعة، سوريا 2014، ص 11.
- [23]: زغدي سعد، تحديد محطات التنقية المحلية واستخدامها في تطهير المياه العادمة في منطقة الوادي، أطروحة دكتوراه، جامعة ورقلة، 2016، ص 13.
- [24]: شركة حيا للمياه 22 نوفمبر 2017 كتابة جمعة بن سعيد الرقيشي.
- [25]: العابد إبراهيم، معالجة مياه الصرف الصحي لمنطقة تقرت بواسطة نباتات منقية محلية، أطروحة محضرة لنيل شهادة دكتوراه -كلية الرياضيات وعلوم المادة، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، 2015.
- [26]: جمال عطية، إزالة التلوث العضوي من مياه الصرف الصحي بمنطقة الوادي باستخدام المعادن الطينية، مذكرة دكتوراه، كلية الرياضيات وعلوم المادة، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، 2018.
- [31]: عبد الحميد إبراهيم قادري، التعريف بوادي ريغ منشورات جمعية الوفاء للشهيد تقرت، 1999.
- [33]: محمد يونس. (2715). دليل المتدرب اساسيات المعالجة ومحطات شبكات الصرف الصحي. الشركة القابضة لمياه الشرب والصرف الصحي.
- [34]: كيت تشين. (2025، 2 يوليو). دليل شامل لمعالجة الحمأة في مياه الصرف الصحي: العمليات والتقنيات وأفضل الممارسات. نيهاو.
- [42]: ه. هرتزل، ز. أيدين، سي. آدم. تحليل الطور البلوري وتوافر الفوسفور بعد المعالجة الحرارية الكيميائية لرماد حمأة الصرف الصحي بكبريتات الصوديوم والبوتاسيوم لإنتاج الأسمدة مجلة إدارة دورات المواد والنفايات، 23 (2021)، ص 2242-2254.
- [43]: H. كومينكو، K. Gorazda، Z. Wzorek، إمكانية إنتاج الأسمدة العضوية المعدنية من حمأة الصرف الصحي تثمين الكتلة الحيوية للنفايات، 8 (2017)، ص 1791-1781.
- [51]: جاروب، ل. مخاطر التلوث بالمعادن الثقيلة. النشرة الطبية البريطانية 2003، 68(1)، 167-182.
- [56]: أنواع الخلايا الكهروكيميائية كتاب التحليل الآلي الطرق الكهروكيميائية في التحليل الكيميائي الصفحة 17 للكاتبين وليد قصار وعبد الحميد رعدواي عدد الصفحات 245 صفحة.
- [57]: المجلة الدولية لطاقة الهيدروجين المجلد 82، 11 سبتمبر 2024، الصفحات 583-599.

## المراجع

---

[62]: وزارة الطاقة الأمريكية (U.S. Department of Energy): شرح أساسيات تفاعلات الأكسدة والاختزال داخل المحلل الكهربائي.

[63]: منصة ScienceDirect (Academic Press): تفصيل الخصائص الفيزيائية والكيميائية لغشاء تبادل البروتون ودوره في فصل الغازات.

[64]: الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA): تقرير حول كفاءة تقنية PEM في التكامل مع شبكات الطاقة المتجددة.

### المراجع باللغة الأجنبية

- [1]: Kundu, D. (2026). "Green hydrogen pathways for a net-zero future: technologies, circular economy integration, life-cycle performance and safety dimensions".
- [12]: Thomas, O., (1995). *Métrieologie des eaux résiduaires*, édition Cebedoc, 192p.
- [14] : Rodier J, L'Analyse de l'eau, 9 éme edition, Entièrement mise à jour, Dunod, paris, 2009.
- [19] : Khopkar, S.M. (2004). *Environmental Pollution Monitoring And Control*. New Delhi: New Age International. p. 299. ISBN 978-81-224-1507-0.
- [20] : WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. UNESCO. ISBN 978-92-3-100201-4. Archived from the original on 8 April 2017.
- [27] : C. Bassompierre, Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles, Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique, Grenoble, 2007. p. 25-42.
- [28]: HAMMADI BELKACEM, 10/11/2017. *Lagunag Aéré en zone Aride Performances Epuratoires, Paramètres Influent : Cas de la Région d'Ouargla*, These de doctorat. University Kasdi Merbah –Ouargla, pp12-.16
- [29] : Miloud, oubadi .étude performance d'époration oxylage. Mémoire de magister : université Oran, 2011/2012.
- [32]: "Sludge", sciencedirect, Retrieved 31/1/2022.
- [35]: Fair, Geyer & Okun, p.21-8.
- [36] :-1893Steel, E. W. (Ernest William), (1979). *Water supply and sewerage*. Mc Ghee, Terence J5 .ط. (New York : Mc Graw-Hill .ص. .545–535ISBN:0070609292. OCLC:3771026.

مؤرشف من الأصل في 08-12-2019

[37]: Aslam ،DN؛ Vandergeynst ،JS؛ Rumsey ،TR. "Development of models for predicting carbon mineralization and associated phytotoxicity in compost-amended soil". Bioresour Technol. 41–8735 :18 ج. 99 ع. DOI:10.1016/j.biortech.2008.04.074. PMID:18585031.

[38]: Use of Composting for Biosolids Management (Report). Biosolids Technology Fact Sheet. EPA. 2002 سبتمبر. EPA 832-F-02-024. مؤرشف من الأصل في 02-11-2019

[39]: Hougen, Watson & Ragatz, pp.415-419.

[40]: Gold ،Moritz. "Introduction to Faecal Sludge Management, Unplanted drying beds"-2018 اطلع عليه بتاريخ 17-12-2019 مؤرشف من الأصل في 29-04.

[41]: "Fertilizers", www.britannica.com, Retrieved 15-11-2018. Edited.

[44]: "Biofuel", britannica, Retrieved 28/10/2021. Edited.

[45]: "Types Of Biofuel", Types Of Biofuel, Retrieved 28/10/2021. Edited.

[46]: "Generation Biofuels", sciencedirect, Retrieved 25/9/2021. Edited.

[47]: CHRISTINA NUNEZ (15/7/2019), "Biofuels, explained", nationalgeographic, Retrieved 25/9/2021. Edited.

[48]: "Top applications of biofuels", azbigmedia, Retrieved 26/9/2021. Edited.

[49]: Anjani R.K. Gollakota, Chi-Min Shu Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, Douliou City, Yunlin County, Taiwan, ROC Available online 23 June 2023, Version of Record 23 June 2023.

[50]: Fisher RM, Gupta V. Heavy Metals. 2024 Feb 27. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan–.

[52]: "23.9: Electrolysis of Water", chem.libretexts, Retrieved 24/6/2021. Edited.

[53]: "Water Electrolysis", sciencedirect, Retrieved 24/6/2021. Edited.

[54]: "What is an Electrolytic Cell?", byjus, Retrieved 14/3/2023. Edited.

[55]: "Hydrogen Production: Electrolysis", ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, Retrieved 24/6/2021. Edited.

[58]: Shiva Kumar ,S.؛ Himabindu ،V. (1 ديسمبر 2019). "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review". Materials Science for Energy Technologies. 454–442 :3 ع. 2 ج.  
DOI:10.1016/j.mset.2019.03.002. ISSN:2589-2991. مؤرشف من الأصل في 07-10-2024.

[59]: "Electrolysers - Energy System - IEA". IEA (بالإنجليزية البريطانية). Archived from the original on 2025-08-30. Retrieved 2025-09-30.

[60]: Teixeira ،Bernardo؛ Centeno Brito ،Miguel؛ Mateus ،António (1 ديسمبر 2024). "Strategic raw material requirements for large-scale hydrogen production in Portugal and European Union". Energy Reports. –5133 :12 ج. 5144. DOI:10.1016/j.egyr.2024.11.002. ISSN:2352-4847. مؤرشف من الأصل في 15-11-2024.

[61]: Kiemel, Steffen; Smolinka, Tom; Lehner, Franz; Full, Johannes; Sauer, Alexander; Mische, Robert (2021). "Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany". International Journal of Energy Research 9935–9914 :(7) 45. (بالإنجليزية). DOI:10.1002/er.6487. ISSN:1099-114X. Archived from the original on 2025-07-25.

[65]: "Tourism in Ghardaia", safarway, Retrieved 28/7/2023. Edite

[66]: "Climate and Average Weather Year Round in Ghardaïa Algeria", weatherspark, Retrieved 28/7/2023. Edited.

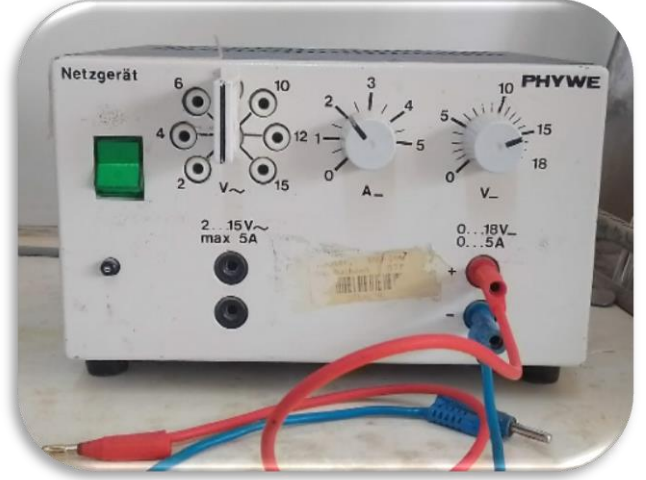
[67]: Akash, Muhammad Sajid Hamid; Rehman, Kanwal (2025), Akash, Muhammad Sajid Hamid; Rehman, Kanwal (eds.), "Comprehensive Insights into Atomic Absorption Spectroscopy", Essentials of Pharmaceutical Analysis, Singapore: Springer Nature, pp. 241–282, doi:10.1007/978-981-96-5996-8\_6, ISBN 978-981-96-5996-8



الأجهزة المستعملة:



-ميزان تحليلي من نوع Pioneer ( حساسيته  $m = \pm 0.001 g$  )



-مولد كهربائي سعته 15 فولط



-جهاز التسخين والرج



-خلية شمسية

الكلمات المفتاحية

❖ باللغة العربية (Keywords in Arabic)

- ✓ مياه الصرف الصحي
- ✓ الترشيح المتسلسل
- ✓ المعادن الثقيلة
- ✓ الأملاح الذائبة الكلية
- ✓ التوصيلية الكهربائية
- ✓ الماء المقطر
- ✓ الوقود الحيوي
- ✓ الهضم اللاهوائي
- ✓ الغاز الحيوي (غاز الميثان)
- ✓ التحليل الكهربائي
- ✓ غاز الأكسجين والهيدروجين
- ✓ الأسمدة العضوية
- ✓ التنمية المستدامة

❖ Keywords in English

- ✓ Sewage wastewater
- ✓ Sequential filtration
- ✓ Heavy metals
- ✓ Total dissolved solids (TDS)
- ✓ Electrical conductivity (Ec)
- ✓ Distilled water
- ✓ Biofuel biodiesel
- ✓ Biogas ( Methane gas)
- ✓ Electrolysis
- ✓ Oxygen and Hydrogen gases
- ✓ Organic fertilizers
- ✓ Sustainable development