

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة
قسم الكيمياء



مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي في الكيمياء

التخصص: كيمياء المحيط

من اعداد الطالبتين:

رحيل تايه - رزيقة غطاس

بعنوان:

المساهمة في تحسين جودة المياه البترولية الموجهة
لإعادة الحقن في حقل حاسي مسعود «OMN-77»

نوقشت علنا يوم: 2026/06/14

أمام لجنة المناقشة:

رئيس اللجنة	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ التعليم العالي	مسعودة علاوي
مناقشا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ التعليم العالي	عبد القادر بن منين
مؤطر	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر "أ"	خولة شاوش
مساعد المؤطر	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ التعليم العالي	علي ذواوي
مدعوا	شركة سوناطراك		محمد العيد حجاج

السنة الجامعية: 2025 / 2026

الإهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وأخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.

أهدي هذا النجاح لنفسي ولا ثم إلى كل من سعي معي لإتمام هذه المسيرة دمت لي سنداً لي:

إلى من حملتني في أحشائها تسعة أشهر، وسهوت على راحتني الليلي الطوال، وزرعت في قلبي بنور العلم والطوح

إلى أمي الغالية

إلى من علمني الصبر والغزيمة، وكان سنداً وعوناً في كل خطوة

إلى أبي الكريم

إلى رفيق يربي، سندي، وشريك حياتي، الذي كان لي الداعم الأول والأخير في هذه الرحلة

إلى زوجي العزيز

أشكرك من أعماق قلبي على كل لحظة صبر، وعلى كل تضحية قدمتها من أجل راحتني ونجاحي. كنت الطاقة التي لا تنضب والتشجيع الذي لم يتوقف. بفضل الله ثم بوقوفك الدائم بجانبني، وصلت إلى هذا اليوم. خارك الله عني خير الخاء، وجعلك سنداً لي في

الدنيا والآخرة.

ثم إلى اخوتي وأخواتي، وكل من ساهم في إنجاز هذا العمل بكلمة طيبة أو دعاء صادق.

أهدي هذه المنكوة إلى كل من أحبوني ودعموني، راجية من الله أن يتقبل منا صالح الأعمال.

تايه رحيل

الإهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ :

{ وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ }.

تتراحم الكلمات وتتسابق العبارات لتتحنني شكرا وامتنانا و وفاء لمن كانوا لي نعم السند.

أهدي هذا العمل إلى :

"الأيادي البيضاء التي مهدت لي سبل العلم والقلوب التي نبضت بالدعاء لأجلي"

أمي وأبي الغاليين

وإلى "السند المتين والصبور المخلص والداعم الأكبر "

زوجي الكريم

وإلى "سند حركتي والقلوب النقية التي شاركتني لحظات الكفاح والنجاح"

إخوتي وعائلتي العزيزة

إلى "من جعلوا لأيام الجامعة معنى ولحظات التعب ذكريات جميلة لا تنسى"

صديقاتي الغاليات

سائلة المولى عز وجل أن يبارك في أعماركم وأن يرفع قدركم.

غطاس رزيقة

الشكر والعرفان

نتقدم في البداية بخالص الشكر و التقدير و العرفان الى الأستاذة المشرفة "خولة شاوش"، على إشرافها المتميز و توجيهاتها القيمة و دعمها المتواصل طوال فترة انجازنا لهاته المذكرة . لقد كانت ارشاداتها و ملاحظاتها الدقيقة مصدر الهام كبير و سببا رئيسيا في اتمام هذا العمل.

كما نعبر عن عمق إمتناننا للأستاذ المساعد "علي نوادي" على مساهمته الفعالة و نصائحه البناءة و جهوده المتفانية التي ساهمت بشكل كبير في تطوير هذه المذكرة.

و نتوجه بجزيل الشكر الى رئيسة لجنة المناقشة الأستاذة "مسعودة علاوي" و إلى الأستاذ المناقش "عبد القادر بن منين"، على تكريمهم بقبول مناقشة هاته المذكرة.

كما لا يسعنا الا أن نتقدم بخالص الشكر و العرفان الى مخبر التحاليل بمؤسسة سونطراك، و الى كافة الاطارات و التقنيين به على تسهيلهم اجراء التحاليل و التجارب، و على تعاونهم المهني و المثمر الذي ساهم بشكل أساسي في انجاز الجانب التطبيقي لهذه الدراسة .

و في الأخير نتقدم بجزيل الشكر لكل من ساهم في انجاز هذا العمل، من قريب أو بعيد.

قائمة الاختصارات

الاختصار	باللغة الأجنبية	باللغة العربية
AAS	Atomic Absorption Spectroscopy	مطيافية الإمتصاص الذري
AOPs	Advanced Oxidation Processes	عمليات الأكسدة المتقدمة
ASTM	American Society for Testing and Materials	الجمعية الأمريكية لإختبار المواد
BOD	Biochemical Oxygen Demand	الطلب البيولوجي للاكسجين
CIS	Centre Industrielle Sud	المركز الصناعي الجنوبي
COD	Chemical Oxygen Demand	الطلب الكيميائي للاكسجين
CV	Collecte Vicel	خزان تجميع المياه
DTPMP	DiethyleneTriamine Penta Methylene Phosphonic Acid	حمض ثنائي إيثيلين ثلاثي الأمين خماسي
DO	Dissolved Oxygen	الأكسجين المذاب
FAOP	Fenton Avanced Oxided Process	عملية فنتون المتقدمة للأكسدة
GAB	General Aerobic Bacteria	البكتيريا الهوائية العامة
HEDP	Hydroxy Ethylidene-1,1-1Diphosphonic Acid	حمض هيدروكسي إيثيلدين ثنائي الفوسفونيك
IGF	Induced Gas Flotation	التعويم بالغاز المستحث
NF	Nanofiltration	الترشيح النانوي
RO	Reverse Osmosis	التناضح العكسي
SRB	Sulfate Reducing Bacteria	البكتيريا المختزلة للكبريتات
SCADA	Supervision Control And Data Acquisition	نظام التحكم و جمع البيانات
TDS	Total Dissolved solids	المواد الصلبة الذائبة
TOC	Total Organic Carbon	إجمالي الكربون العضوي
TPH	Total Petroleum Hydrocarbur	إجمالي الهيدروكربونات البترولية
TSS	Total Suspended Solid	إجمالي المواد الصلبة العالقة
UF	Ultrafiltration	الترشيح الدقيق

قائمة الجداول

الصفحة	العنوان	الجدول
6	تصنيف أشكال الحديد في المياه البترولية وخصائصها	الجدول (1- I)
10	مقارنة طرق معالجة المياه البترولية من حيث الكفاءة والتكلفة	الجدول (2- I)
12	مقارنة موجزة بين الطرق التقليدية لإزالة الحديد	الجدول (3- I)
15	القيم التشغيلية الإرشادية لعملية فنتون التقليدية	الجدول (4- I)
15	القيود و المزايا لعملية فنتون	الجدول (5- I)
18	أسباب تلف التكوين أثناء الحقن وأساليب الوقاية	الجدول (6- I)
20	مقارنة المعايير الدولية لجودة مياه الحقن	الجدول (7- I)
28	الأدوات المستعملة	الجدول (1- II)
28	المواد الكيميائية المستعملة	الجدول (2- II)
29	الأجهزة المستعملة	الجدول (3- II)
32	بعض الخصائص الكيميائية لهيدروكسيد البوتاسيوم	الجدول (4- II)
33	بعض الخصائص الكيميائية لهيدروكسيد الكالسيوم المستعمل	الجدول (5- II)
37	قيمة الـ pH وتركيز شوارد الحديد لعينات المياه البترولية	الجدول (1- III)
38	تأثير بيروكسيد الهيدروجين على قيمة الـ pH	الجدول (2- III)
39	تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينة الرابعة	الجدول (3- III)
41	تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينة الأولى	الجدول (4- III)
41	تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينة الثانية	الجدول (5- III)
41	تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينة الثالثة	الجدول (6- III)
42	تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينة الخامسة	الجدول (7- III)
42	نتائج تأثير pH الوسط على خفض تركيز شوارد الحديد	الجدول (8- III)
44	نتائج تحاليل المياه البترولية عند مدخل وحدة معالجة المياه	الجدول (9- III)
45	نتائج تحاليل المياه البترولية عند مخرج وحدة معالجة المياه	الجدول (10- III)
46	نتائج تحاليل المياه البترولية عند مخرج وحدة معالجة	الجدول (11- III)

قائمة الأشكال

الصفحة	العنوان	الأشكال
22	الموقع الجغرافي لوحدة المعالجة الجنوبية (UTBS)	الشكل (II - 01)
22	وحدة معالجة المياه البترولية UTBS من شركة EXPRO	الشكل (II - 02)
23	مخطط نقاط الحقن وأخذ العينات من وحدة معالجة المياه البترولية	الشكل (II - 03)
24	أخذ العينات من مدخل ومخرج وحدة معالجة المياه البترولية	الشكل (II - 04)
25	محلل الهيدروكربونات البترولية الكلية InfraCal2.ATR-SP	الشكل (II - 05)
26	جهاز ترشيح نموذجي من شركة (Millipore).	الشكل (II - 06)
27	نطاقات الكواشف [300-50]، [2000-100] و [10000-1000] ملغ/ل	الشكل (II - 07)
30	أخذ العينة مع قياس درجة الحرارة	الشكل (II - 08)
31	قياس تركيز شوارد الحديد باستخدام جهاز الطيف الضوئي	الشكل (II - 09)
32	تحضير محلول هيدروكسيد البوتاسيوم	الشكل (II - 10)
33	تحضير محلول هيدروكسيد الكالسيوم	الشكل (II - 11)
34	عينة المياه الموجهة لإعادة الحقن	الشكل (II - 12)
35	العينة بعد إضافة بيروكسيد الهيدروجين (10%)	الشكل (II - 13)
35	رج العينة بعد إضافة هيدروكسيد البوتاسيوم	الشكل (II - 14)
35	قياس الـ pH للعينة	الشكل (II - 15)
36	ترشيح العينة	الشكل (II - 16)
36	العينة بعد الترسيب	الشكل (II - 17)
36	قياس تركيز شوارد الحديد في العينة بجهاز الطيف الضوئي	الشكل (II - 18)
40	تأثير حجم محلول هيدروكسيد البوتاسيوم على خفض تركيز شوارد الحديد	الشكل (III - 1)
43	تأثير pH الوسط على خفض تركيز شوارد الحديد	الشكل (III - 2)

فهرس المحتويات

الصفحة	الفهرس
i	الإهداء
ii	الإهداء
iii	الشكر والعرفان
iv	قائمة الإختصارات
v	قائمة الجداول
vi	قائمة الأشكال
1	المقدمة العامة
الفصل الأول: عموميات حول المياه البترولية و طرق معالجتها	
3	تمهيد
3	I. المفاهيم الأساسية للمياه البترولية
3	I-1. تعريف المياه البترولية وأنواعها
4	I-2. الخصائص الفيزيوكيميائية للمياه البترولية
4	I-3. المشكلات التشغيلية المرتبطة بالمياه البترولية
5	I-4. أشكال الحديد في المياه البترولية
5	I-4-1. مشاكل الحديد في المياه البترولية
5	I-4-2 أشكال الحديد وتصنيفها
7	I-4-3. آلية تشكّل الحديد ودوره في التآكل
7	I-4-4. المشكلات الناتجة عن وجود الحديد
7	I-5. طرق معالجة المياه البترولية
7	I-5-1. مفهوم المعالجة و أهدافها
7	I-5-2. المعالجة الأولية – الفصل الفيزيائي
7	I-5-2-1. الفصل الجاذبي
8	I-5-2-2. أحواض الترسيب المُعجّل (Induced Gas Flotation – IGF)
8	I-5-2-3. الطرد المركزي والمائي
8	I-5-3. المعالجة الثانوية – الأكسدة والترشيح
8	I-5-3-1. التهوية والأكسدة بالهواء
8	I-5-3-2. الكلورة
9	I-5-3-3. الترشيح الرملي والتلامسي
9	I-5-4. المعالجة الكيميائية المتخصصة
9	I-5-4-1. المواد المانعة للتآكل
9	I-5-4-2. المواد المانعة للترسيب

10	I-5-4-3. المبيدات البكتيرية
10	I-5-5-5. الطرق التقليدية لمعالجة الحديد
10	I-5-5-1. الأكسدة ثم الترسيب والترشيح
11	I-5-5-2. التخثير والتلييد
11	I-5-5-3. الترسيب بالجبر/التلطيف
11	I-5-5-4. التبادل الأيوني
12	I-5-5-5. الترشيح الغشائي
12	I-5-5-6. الإمتزاز
12	I-5-5-7. الإزالة البيولوجية
12	I-5-5-8. الترشيح بالوسائط الحفّازة
13	I-5-6. عمليات الأكسدة المتقدمة
13	I-5-6-1. الأكسدة المتقدمة بطريقة فنتون
16	I-6. مياه الحقن في الآبار البترولية
16	I-6-1. مفهوم الحقن المائي وأهدافه
16	I-6-2. مصادر مياه الحقن
16	I-6-3. منظومة الحقن المائي
16	I-6-3-1. التصميم الهندسي لشبكة الآبار
17	I-6-3-2. مكونات منظومة الحقن
17	I-6-4. شروط جودة مياه الحقن
17	I-6-5. آلية تلف التكوين جراء الحقن
18	I-7. المعايير العالمية و الوطنية لمياه الحقن
18	I-7-1. نظرة عامة على المعايير الدولية
18	I-7-1-1. معيار المعهد الأمريكي للبترول (American Petroleum Institute) API RP 45
18	I-7-1-2. معيار المنظمة الدولية لتوحيد القياس (International Standards Organization) ISO 13500
19	I-7-1-3. معيار NACE MR0175 / ISO 15156
19	I-7-1-4. معايير أرامكو السعودية ومعايير إقليمية
19	I-7-2. نظرة عامة على المعايير الوطنية
20	I-8. اختبارات قياس جودة مياه الحقن
الفصل الثاني: التعريف بالمؤسسة، المواد، التقنيات والأجهزة المستخدمة في التحاليل	
21	تمهيد
21	II-1. وحدة معالجة البترول الخام الجنوبية (UTBS)
21	II-1-1. التعريف بالوحدة
22	II-2. وحدة معالجة المياه البترولية (EXPRO)

22	II-2-1. التعريف بالوحدة
23	II-2-2. وصف عملية الوحدة
23	II-2-3. أخذ العينات
24	II-3. الطرق المعتمدة في التحاليل المخبرية
24	II-3-1. تحديد إجمالي الهيدروكربونات البترولية (TPH) في الماء عن طريق الامتصاص بالأشعة تحت الحمراء، باستخدام جهاز InfraCal 2 FOG TPH:ASTM D7066-04
25	II-3-2. تحديد تركيز المواد الصلبة العالقة في الماء في الموقع باستخدام مرشح غشائي: ASTMD5907
26	II-3-3. تحديد الـpH الـASTM1293
26	II-3-4. تحديد الأوكسجين المذاب (DO):ASTMD888
26	II-3-5. تحديد الطلب البيولوجي على الأوكسجين (BOD5):ASTM888-05
26	II-3-5-1. مبدأ قياس BOD ₅
27	II-3-6. تحديد الطلب الكيميائي على الأوكسجين (COD)
27	II-3-6-1. مبادئ قياس الطلب الكيميائي للأوكسجين (COD)
28	II-4. الأدوات والمواد والأجهزة المستعملة
29	II-5. طريقة العمل
29	II-5-1. المبدأ والبروتكول التجريبي لقياس تركيز الحديد في المياه البترولية الموجهة لاعادة الحقن
31	II-5-2. المبدأ والبروتكول التجريبي المعتمد لإزالة الحديد من المياه البترولية الموجهة لإعادة الحقن
31	II-5-2-1. تحضير المحاليل
33	II-5-2-2. طريقة الأوكسدة المتقدمة لفنتون
الفصل الثالث : تحليل ومناقشة النتائج	
37	تمهيد
37	III-1. قياس الـpH وتركيز شوارد الحديد في العينة
38	III-2. تأثير بيروكسيد الهيدروجين على قيمة الـpH
39	III-3. تأثير تركيز محلول هيدروكسيد البوتاسيوم وهيدروكسيد الكالسيوم على خفض تركيز شوارد الحديد
42	III-4. تأثير طبيعة الوسط (حامضي-قاعدي) على خفض تركيز شوارد الحديد
43	III-5. نتائج تحاليل المياه قبل و بعد المعالجة
47	الخلاصة العامة
I	الملحق
	الملخص

المقدمة العامة

المقدمة العامة

تعد المياه البترولية من أهم المخلفات الناتجة عن عمليات استخراج البترول و الغاز و إنتاجهما، حيث تحتوي على مزيج من الزيوت و المواد العضوية و الأملاح و المعادن و المواد العالقة التي قد تسبب أضراراً بيئية و صحية إذا تم تصريفها دون معالجة .

لذلك أصبحت معالجة هذه المياه ضرورة أساسية للحفاظ على البيئة و الموارد المائية و الإمتثال للمعايير البيئية المعمول بها.¹

وصلت الأبحاث في مجال معالجة المياه البترولية إلى مستويات متقدمة، حيث ركزت الدراسات على تقنيات متعددة لإزالة الملوثات الرئيسية مثل الزيوت، المواد الصلبة العالقة، البكتيريا، والمعادن الثقيلة.² ومن بين هذه الملوثات، يبرز الحديد (خاصة في شكله الثنائي Fe^{2+} والثلاثي Fe^{3+}) كعامل رئيسي يسبب مشاكل خطيرة عند إعادة الحقن، مثل تكون الرواسب (مثل هيدروكسيد الحديد أو كبريتيد الحديد)، انسداد المسامات الصخرية، تشكل المستحلبات، وانخفاض النفاذية، مما يؤثر سلباً على كفاءة عمليات الإنتاج الثانوي والمعزز.³

رغم التقدم المحرز، لا تزال هناك إشكالية رئيسية تتمثل في صعوبة الوصول إلى إزالة فعالة ومستدامة للحديد في المياه البترولية المعالجة جزئياً، خاصة في الظروف ذات الملوحة العالية أو التراكيز المرتفعة للحديد المذاب، مما يؤدي إلى تكاليف تشغيلية مرتفعة و انخفاض كفاءة الحقن.^{2,3}

ومن هنا تبرز الإشكالية التالية: كيف يمكن تحسين معالجة الحديد في المياه البترولية الموجهة لإعادة الحقن من أجل ضمان مطابقتها لشروط إعادة الحقن، مع الحد من الآثار البيئية والتقنية المرافقة؟

يهدف هذا العمل إلى المساهمة في تحسين جودة المياه البترولية المعالجة الموجهة لإعادة الحقن في سياق ميداني محدد في (وحدة معالجة البترول الخام الجنوبية بحاسي مسعود) ، مع الاستفادة من تجارب مخبرية وتحليل ميدانية لتقييم الطريقة المطبقة وتطوير توصيات عملية تساهم في رفع جودة المياه المحقونة وتعزيز الاستدامة البيئية والإقتصادية.

ولقد قسمت هذه المذكرة إلى ثلاث فصول:

¹ United States Environmental Protection Agency. (2025). Oil and Gas Extraction Wastewater Management.

² Amakiri, K. T., et al. (2022). Review of oilfield produced water treatment technologies.

³ Alomar, T. S. (2022). Recent advances on the treatment of oil fields produced water by adsorption and advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering.

الفصل الأول: تناول هذا الفصل المفاهيم الأساسية المتعلقة بالمياه البترولية، أشكال الحديد فيها، وطرق معالجتها

الفصل الثاني: تضمن هذا الفصل تقديم وصف للمؤسسة محل الدراسة، التحاليل الروتينية لمياه الحقن، والتجارب

المخبرية التي أجريت لتقييم إزالة شوارد الحديد.

الفصل الثالث: تضمن هذا الفصل تحليل النتائج، مناقشتها، واستخلاص التوصيات لتحسين العملية.

الفصل الأول

عموميات حول المياه البترولية وطرق
معالجتها

تمهيد

تُعدّ المياه المصاحبة للبترول من أكثر التيارات السائلة حجماً في صناعة البترول والغاز، إذ تُرافق استخراج البترول الخام من باطن الأرض كمياه طبيعية مُتخلّلة للمكمن. تشير الإحصاءات العالمية إلى أن متوسط نسبة الماء في البترول المنتج تتراوح بين 3 براميل من الماء لكل برميل من البترول (3:1) إلى (10:1) في حقول البترول المتقدمة، مما يجعل معالجة هذه المياه ضرورةً اقتصادية وبيئية لا غنى عنها.¹

تحتوي المياه البترولية على طيف واسع من الملوثات تشمل: المركبات الهيدروكربونية الذائبة والمشتتة، والمعادن الثقيلة كالحديد والباريوم والستروشيوم، والمواد العالقة، والأملاح المذابة بتركيز عالية جداً، وكذلك الكائنات الحية الدقيقة كالبكتيريا المختزلة للكبريتات (SRB). ومن أبرز هذه الملوثات من الناحية التشغيلية: الحديد بأشكاله المختلفة الذي يُسبب إنسداد الآبار وتآكل المعدات وتدهور خصائص الإنتاج.²

يُركّز هذا الفصل على المفاهيم الأساسية المتعلقة بالمياه البترولية، وأشكال الحديد الموجودة فيها وآليات تكوّنها، وطرق معالجتها المتاحة، وينتقل بعد ذلك إلى عرضٍ تفصيلي لعمليات الأكسدة المتقدمة، مع التركيز على عملية فنتون باعتبارها واحدة من أكثر هذه العمليات كفاءة وإقتصادية في معالجة المياه عالية التلوّث ثم ينتقل إلى تقنيات حقن المياه في الآبار البترولية ودورها في الاسترداد المعزّز للبترول، وأخيراً المعايير الدولية المعتمدة لضمان جودة مياه الحقن.

I . المفاهيم الأساسية للمياه البترولية

I-1 . تعريف المياه البترولية وأنواعها

تُعرّف المياه البترولية بأنها المياه التي ترتفع إلى السطح مصاحبةً للبترول أو الغاز الطبيعي أثناء عمليات الإنتاج، وهي في الغالب مياه تكوينية حُبست في الطبقات المسامية لآلاف السنين وتشربت بخصائص المكمن كيميائياً وبيولوجياً. تُصنّف هذه المياه إلى عدة أنواع رئيسية³:

- **مياه التكوين:** مياه أصلية موجودة في المسامات والشقوق منذ تكوّن الصخرة، وتتسم بملوحة عالية جداً قد تبلغ عشرة أضعاف مياه البحر.
- **مياه الحقن العائدة:** جزء من مياه الحقن المضخوخة أسفل المكمن لرفع ضغطه حيث تصل إلى آبار الإنتاج مع مرور الوقت.

¹ Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L.C., Biak, D.R.A., Madaeni, S.S. & Abidin, Z.Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 530-551.

² Neff, J., Lee, K. & DeBlois, E.M. (2011). Produced water: overview of composition, fates, and effects. In *Produced Water: Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies*.

³ Veil, J.A., Puder, M.G., Elcock, D. & Redweik, R.J. (2004). A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane. Argonne National Laboratory, U.S. DOE.

- **مياه التكاثف:** تتكوّن من تكاثف بخار الماء المصاحب للغاز الطبيعي، وتتميز بملوحة منخفضة نسبياً.
- **مياه حفر التكوينات الضحلة:** تنتج من التكوينات غير المنتجة عند اختراق الآبار.

I-2. الخصائص الفيزيوكيميائية للمياه البترولية

- تتسم المياه البترولية بخصائص متفاوتة تبعاً لطبيعة المكنن وعمقه وتاريخه الجيولوجي؛ فعلى الصعيد الفيزيائي تتميز بدرجات حرارة مرتفعة (50-120 م°) في الطبقات العميقة، وضغوط عالية، وكثافة تتراوح بين (1.01 و 1.15 غ/سم³) تبعاً لتركيز الأملاح، أما كيميائياً فتحتوي على العديد من الأيونات والمركبات.³
- **أيونات الكلوريد:** (Cl^-) المكوّن الأيوني الأغلب، قد تصل تركيزاتها إلى 250,000 ملغ/ل.
 - **أيونات الصوديوم والبوتاسيوم:** (Na^+ , K^+) العناصر الكاتيونية الرئيسية.
 - **أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم:** (Ca^{2+} , Mg^{2+}) تُسبب ترسيب كربونات الكالسيوم وكبريتات الباريوم.
 - **أيونات الكبريتات:** (SO_4^{2-}) تُعزّز نشاط بكتيريا SRB وتُرسّب $BaSO_4$.
 - **المركبات الهيدروكربونية الذائبة (BTEX):** البنزين، التولوين، الإيثيل بنزين، الزيلين.
 - **الغازات الذائبة:** ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، كبريتيد الهيدروجين (H_2S).
 - **الحديد والمعادن الثقيلة:** حديد ذائب وراسب، رصاص، راديوم، باريوم.

I-3. المشكلات التشغيلية المرتبطة بالمياه البترولية

- تُحدث المياه البترولية غير المعالجة سلسلة من المشكلات التشغيلية والبيئية الحرجة في منشآت البترول والغاز. وتشمل هذه المشكلات:⁴
- **التآكل:** تُسارع أيونات الكلوريد والأكسجين الذائب والحموض العضوية من معدلات تآكل أنابيب وخزانات الفولاذ الكربوني بمعدلات تتجاوز 5 مم/السنة في الحالات الشديدة.
 - **الترسيب:** تترسّب كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) وكبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$) وكبريتات الباريوم ($BaSO_4$) محدثةً انسداداً في الأنابيب والآبار.
 - **انسداد البئر:** تُعيق الجسيمات الصلبة التدفق الطبيعي للبترول وتُقلّل الإنتاجية.
 - **النشاط البكتيري:** تُنتج بكتيريا SRB كبريتيد الهيدروجين الذي يزيد الحموضة ويُعجّل التآكل.
 - **مشاكل الفصل:** تتبعث مستحلبات ثابتة بين الزيت والماء تُصعّب عمليات الفصل في المصافي والمحطات.

⁴ Taber, J.J. (1983). Research on enhanced oil recovery: past, present, and future. Pure and Applied Chemistry, 55(8), 1323–1348.

I-4. أشكال الحديد في المياه البترولية

I-4-1. مشاكل الحديد في المياه البترولية

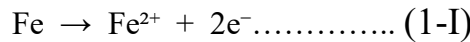
يُعدّ الحديد من أكثر الملوثات تأثيراً في المياه البترولية نظراً لتعدد مصادره وتنوع أشكاله وتأثيراته السلبية المتشعبة. يصل الحديد إلى مياه الإنتاج من مصادر متعددة: تآكل المعدات والأنابيب الفولاذية، ومصادر تكوينية طبيعية (معادن الطين والصخور الكربونية والحديدية)، وكذلك من بيئات الحفر وعوامل عمليات المعالجة الكيميائية.⁵ يُشكّل الحديد بتركيزاته المتصاعدة تهديداً محورياً لعمليات حقن المياه بصفة خاصة؛ إذ يترسّب بسرعة عند تغيير الأوضاع الكيميائية و الفيزيائية (pH، الأكسجين، درجة الحرارة) مسبباً انسداد مرشحات الحقن وتآكل المعدات وتدهور نفاذية التكوين.⁵

I-4-2. أشكال الحديد وتصنيفها

- الحديد الثنائي Fe^{2+} (الحديدوز/ Ferrous Iron)

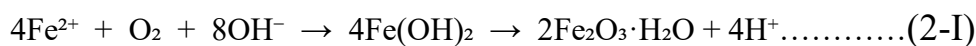
يُمثّل الحديد الثنائي الشكل الأكثر ذوباناً وتحركاً في المياه. يظهر في الأوساط الخالية من الأكسجين (اللاهوائية) وفي البيئات الحامضية ($pH < 6.5$) يكون الماء الحامل له شفافاً عديم اللون في البداية، غير أنه يتحوّل إلى راسب بني محمر فور تعرضه للهواء. يُنتج الحديد الثنائي أيضاً من تحلل بكتيريا SRB لمركبات الحديد الثلاثي في غياب الأكسجين.

التفاعل الكيميائي الأساسي لتكوّنه من تآكل الحديد الفولاذي:

- الحديد الثلاثي Fe^{3+} (الحديديك/ Ferric Iron)

ينتكوّن الحديد الثلاثي بأكسدة الحديد الثنائي في حضور الأكسجين عند درجات pH أعلى من 6.5. يترسّب بسرعة كبيرة على شكل هيدروكسيد الحديد الثلاثي $Fe(OH)_3$ ذي اللون البني الصدئ أو على شكل أكسيد هيدروكسيد الحديد $FeO(OH)$ ، وهذا الراسب الهلامي يحجز كميات كبيرة من الجسيمات الدقيقة ويُشكّل قشرة صلبة تعيق تدفق المياه في الأنابيب والمكامن.⁶

معادلة التفاعل:

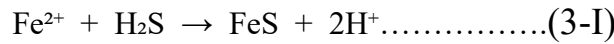


⁵Crabtree, M., Eslinger, D., Fletcher, P., Miller, M., Johnson, A. & King, G. (1999). Fighting scale: removal and prevention. Oilfield Review, 11(3), 30–45.

⁶ Pirard, E. & Bertholon, R. (2002). Characterisation of iron corrosion products by infrared spectroscopy. Studies in Conservation, 47(2), 1–12. Springer, New York. pp. 3–54.

- كبريتيد الحديد (Iron Sulfide) FeS / FeS₂

ينكوّن كبريتيد الحديد من تفاعل الحديد مع كبريتيد الهيدروجين H₂S الناتج عن نشاط بكتيريا SRB في الأوساط اللاهوائية. يترسّب على شكل مسحوق أسود ناعم (FeS - Mackinawite) أو بلورات صلبة (FeS₂ - Pyrite)، وهو ملوث خطير لمياه الحقن إذ يسد المرشحات بسرعة ويُعيق تدفق الحقن في البئر. كما أنه موصل كهربائي يُعجّل التآكل الغلفاني⁷:



- أكاسيد الحديد (Iron Oxides / Oxyhydroxides)

تشمل مجموعة متنوعة من المركبات تتشكّل بمسارات ترسيب مختلفة:

- الجوثيت (α-FeOOH): أكثر أكاسيد الحديد ثباتاً، لون بني مصفر، يُشكّل قشوراً صلبة في الأنابيب.
- الهيماتيت (α-Fe₂O₃): لون بني محمر، يُشكّل طبقات كثيفة على جدران المعدات.
- المغنيتيت (Fe₃O₄): أسود اللون، ناتج عن التآكل في درجات حرارة مرتفعة (< 80 م°).
- الأكاوجينيت (γ-FeOOH / Lepidocrocite): برتقالي مصفر، رخو وسهل التفتت، يُسبّب إشكاليات في الترشيح.

- الحديد البكتيري (Biogenic Iron)

تؤكسد بكتيريا *Gallionella ferruginea* و *Sphaerotilus natans* الحديد الثنائي إلى حديد ثلاثي بيولوجياً، مُكوّنة تجمعات هلامية خيطية ذات لون بني. هذه البيوفيليمات تُضعف معدلات التآكل وتُعيق المعالجة الكيميائية، وتتطلب برامج تحكم بيولوجي خاصة.⁸

جدول (1-1): تصنيف أشكال الحديد في المياه البترولية وخصائصها.⁹

النوع	الصيغة الكيميائية	الحالة في الماء	مستوى pH المفضل	ملاحظات إضافية
حديد ثنائي (ذائب)	Fe ²⁺	ذائب وشفاف	< 6.5	يتأكسد بسهولة عند التعرض للأكسجين
حديد ثلاثي (مترسب)	Fe ³⁺	راسب / أكاسيد بنية	> 6.5	أقل ذواباً بكثير
حديد كبريتيدي	FeS / FeS ₂	راسب أسود / رمادي	(< 7 غير هوائي)	يتكون في وجود H ₂ S
هيدروكسيدات الحديد	Fe(OH) ₂ / Fe(OH) ₃	هلامي / بني محمر	> 7	غير مستقر Fe(OH) ₂
حديد بكتيري (بيولوجي)	إنزيمات بكتيريا مؤكسدة للحديد	طبقات لزجة بنية	5.5 – 8.5	يسبب التآكل الميكروبي

⁷ Wikjord, A.G., Rummery, T.E., Doern, F.E. & Owen, D.G. (1980). Corrosion and deposition during the exposure of carbon steel to hydrogen sulphide-water solutions. Corrosion Science, 20(5), 651–671.

⁸ Emerson, D., Field, E.K., Chertkov, O. et al. (2010). Comparative genomics of freshwater Fe-oxidizing bacteria. Nature, 467, 849–854.

⁹ Emerson, D., Field, E.K., Chertkov, O. et al. (2010). Comparative genomics of freshwater Fe-oxidizing bacteria. Nature, 467, 849–854.

I-4-3. آلية تشكّل الحديد ودوره في التآكل

تسير عملية تآكل الحديد في المنشآت البترولية وفق آلية كيميائية وكهروكيميائية معقدة تشمل: تكوّن خلايا تآكل محلية (Galvanic Cells) بين مناطق الأنود والكاثود على سطح الفولاذ، حيث تتأكسد حبيبات المعدن في مناطق الأنود مُطلقةً أيونات Fe^{2+} إلى المحلول، بينما يختزل الأكسجين أو أيونات H^+ في مناطق الكاثود. ويُسرّع هذا التفاعل بوجود كلوريدات الصوديوم والمغنيسيوم وغاز CO_2 الذائب الذي يُشكّل حمض الكربونيك H_2CO_3 ذي التأثير الحمضي القوي.¹⁰

I-4-4. المشكلات الناتجة عن وجود الحديد

- انسداد أغشية الترشيح الفائق والتناضح العكسي وإرتفاع تكاليف التشغيل.
- الترسبات وانسداد الأنابيب والصمامات وأنظمة الحقن.
- تنشيط نمو بكتيريا الحديد التي تُكوّن أغشية حيويةً وتُسرع التآكل الميكروبي.
- تغيير لون المياه (أصفر/بني) وتجاوز الحدود المسموح بها للتصريف البيئي.
- استهلاك جزء من المؤكسدات والمواد الكيميائية المضافة، ما يقلّل كفاءة المعالجات اللاحقة.¹⁰

I-5. طرق معالجة المياه البترولية

I-5-1. مفهوم المعالجة وأهدافها

تهدف معالجة المياه البترولية إلى رفع جودتها لتلائم أحد التوجهات التالية: إعادة حقنها في البئر ، أو صرفها إلى البيئة ضمن حدود المعايير التنظيمية، أو إعادة استخدامها في عمليات حفر أخرى أو في أغراض صناعية. وتنقسم المعالجة إلى ثلاثة مستويات رئيسية: المعالجة الأولية، والمعالجة الثانوية ، والمعالجة المتقدمة.²

I-5-2. المعالجة الأولية - الفصل الفيزيائي

I-5-2-1. الفصل الجاذبي

يُعدّ أبسط أساليب المعالجة الأولية وأكثرها انتشاراً. يعتمد على فارق الكثافة بين الماء والنفط والغاز في أحواض ثلاثية المراحل أو وعاء التفريغ. تُفصل القطيرات الزيتية بمعدل تحدّده معادلة ستوكس:

$$v = (d^2 \cdot \Delta\rho \cdot g) / (18 \mu) \dots \dots \dots (4-1)$$

تستغرق هذه العملية من دقائق إلى ساعات تبعاً لدرجة الاستحلاب ولزوجة البترول وتصميم الوعاء.

¹⁰ deWaard, C. & Milliams, D.E. (1975). Carbonic acid corrosion of steel. Corrosion, 31(5), 177-181.

I-2-5-2. أحواض الترسيب المُعجَّل (Induced Gas Flotation – IGF)

تعتمد تقنية IGF على حقن فقاعات دقيقة من الغاز (هواء أو نيتروجين) خلال المياه المعالجة، فتلتصق الفقاعات بالقطيرات الزيتية الدقيقة والجسيمات العالقة وترفعها إلى السطح حيث تُجمَع وتُزال ميكانيكياً. وقد أثبتت هذه التقنية كفاءةً تصل إلى 95% في إزالة الزيت المشتّت عند تصاميم تشغيلية مثلى:¹¹

- معدل تدفق الغاز: 0.2 – 0.5 قدم³/غالون من المياه المعالجة.
- وقت المكوث: 3 – 5 دقائق.
- حجم الجسيمات المُزالة > 10 ميكرومتر.

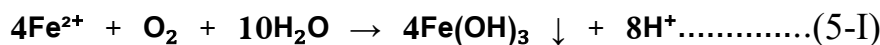
I-2-5-3. الطرد المركزي والمائي (Hydrocyclones)

تعتمد الهيدروسايكلونات على القوى الطاردة المركزية لفصل الجسيمات الثقيلة والقطيرات الزيتية. لا تحتوي على أجزاء متحركة وتتميز بصغر حجمها وسهولة تركيبها. تُزال الجسيمات ذات قطر أكبر من 5-10 ميكرومتر بكفاءة تصل إلى 90%. وتُستخدم في مراحل المعالجة الأولية كوحدة ترشيح خشن قبل المراحل اللاحقة.

I-3-5-3.5 المعالجة الثانوية – الأكسدة والترشيح

I-3-5-1. التهوية والأكسدة بالهواء (Aeration/Air Stripping)

يُعدّ أسلوب التهوية الآلية الحل الأولي لأكسدة الحديد الثنائي الذائب إلى حديد ثلاثي يسهل ترسيبه. تتم عبر أحواض مفتوحة أو أبراج تهوية أو أنظمة ضخ الهواء تحت الضغط. تُعزّز الأكسدة بتقليل وقت الملامسة وزيادة المساحة السطحية للتلامس الهوائي. تكون أكثر فاعلية عند $pH > 7$:¹²



I-3-5-2. الكلورة (Chlorination)

تُضاف مركبات الكلور (كلور سائل Cl_2 ، هيبوكلوريت الصوديوم $NaOCl$ ، ثاني أكسيد الكلور ClO_2) كعامل مؤكسد قوي ومبيد بكتيري. يُنتج الكلور حمض الهيبوكلوروز (HOCl) في الأوساط الحامضية:



يُؤكسد حمض الهيبوكلوروز الحديد الثنائي ويُسيطر على بكتيريا SRB ، غير أن الجرعة الزائدة منه تُسرّع تآكل المعدات. تتراوح الجرعة الفعالة بين 0.5-2 ملغ/ل مع مراقبة مستمرة.¹³

¹¹ Sherwood, T. (2005). Induced gas flotation (IGF) for produced water treatment. Oilfield Technology, 2(4), 12–18.

¹² Lee, G. & Lee, J. (2005). Aeration fundamentals for groundwater iron removal. Water Environment Research, 77(1), 45–52.

¹³ Videla, H.A. & Herrera, L.K. (2005). Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. International Microbiology, 8(3), 169–180.

I-3-5-3. الترشيح الرملي والتلامسي (Sand/Media Filtration)

تُعتبر أعمدة الترشيح الرملي من أكثر تقنيات معالجة المياه إنتشاراً وفعاليةً. تحتوي على طبقات من الرمل الكوارتزي بأحجام متدرّجة (0.4-1.2 مم)، يختلط فيها الماء ببطء فتلتقط الجسيمات الدقيقة والرواسب الحديد الثلاثي. تبلغ كفاءة إزالة TSS بحدود 80-95%، وتستوجب غسلاً عكسياً دورياً لتجديد الطاقة الاستيعابية. في الحالات الأكثر حساسية تُضاف طبقة من الفحم النشط أو أنثراسيت لتحسين إزالة المواد العضوية.¹⁴

I-4-3-5. الترشيح الغشائي (Membrane Filtration)

تشمل سلسلة متكاملة من التقنيات ذات الكفاءة العالية:

- الترشيح الدقيق: يُزيل الجسيمات > 0.1 ميكرومتر والبكتيريا، ضغط تشغيلي منخفض (0.1-0.5 بار).
- الترشيح الغشائي: يُزيل معظم البكتيريا والكولويدات وبعض الفيروسات حسب حجم المسام ونوع الغشاء، ضغط (0.5-3 بار).
- الترشيح النانوي: يُزيل الأيونات الثنائية (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) والمركبات العضوية الكبيرة.
- التناضح العكسي: يُزيل أكثر من 95-99% من الأملاح الذائبة والمركبات العضوية الصغيرة عبر ضغوط (15-80 بار).

I. 4.5. المعالجة الكيميائية المتخصصة

I-4-5-1. المواد المانعة للتآكل

تُضاف بتركيزات 10-100 ملغ /ل وتعمل باليتين رئيسيتين: التثبيط الأنودي بتكوين طبقة أكسيد سلبية على السطح، أو التثبيط الكاثودي بحجب مناطق الإختزال. أكثر أنواعها شيوعاً في صناعة البترول: الأمينات الدهنية ، والإيميدازولينات، والفوسفونات¹⁵.

I-4-5-2. المواد المانعة للترسيب

تُمنع ترسيبات كربونات الكالسيوم وكبريتات الباريوم بإضافة مواد كيميائية تُعيق نمو بلورات الترسيب. يعمل بعضها بالتأثير على مواقع نمو البلورة وبعضها الآخر بتشويه الشكل البلوري أبرز أنواعها:

- بولي فوسفونات - HEDP, DTPMP : فعالة ضد $CaCO_3$ و $BaSO_4$
- بوليمرات كربوكسيلية : تمنع ترسيب $CaSO_4$
- مركبات الفوسفات الأستيري : فعالة ضد $SrSO_4$

¹⁴ Kawamura, S. (2000). Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

¹⁵ Andreeva, N. & Pugacheva, N. (2015). Corrosion inhibitors for oil and gas industry. Journal of Corrosion Science and Engineering, 18, 1-14.

I-5-4-3. المبيدات البكتيرية

تُطبَّق دورياً (كل 2-4 أسابيع) أو بشكل مستمر لمكافحة بكتيريا SRB و GAB تنقسم إلى مبيدات مؤكسدة (كلور، بروم، ثاني أكسيد الكلور، الأوزون) ومبيدات غير مؤكسدة (كواترنييري الأمونيوم، ألدهيدات الغلوتار).

يُتبع في إختيار الجرعة والتناوب بين الأنواع أسلوب المراقبة الميكروبيولوجية اللازمة (نماذج عد الخلايا)¹⁶

جدول (1-2): مقارنة طرق معالجة المياه البترولية من حيث الكفاءة والتكلفة.

طريقة المعالجة	المبدأ	الكفاءة	التكلفة النسبية	الملاحظات
التهوية والأكسدة	$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$	جيدة للحديد الذائب	منخفضة	أولى في السلسلة
الترشيح الرملي	احتجاز الرواسب	80-95 %	منخفضة	بعد الأكسدة
الكلورة	مؤكسد كيميائي + مبيد بكتيري	ممتازة	منخفضة-متوسطة	تحكم في الجرعة
حقن مواد مانعة للترسب	فسفونات / بوليمرات	منع الترسب +90 %	متوسطة	يحتاج مراقبة مستمرة
نظام الترشيح بالغشاء (UF/NF)	حواجز فيزيائية دقيقة	ممتازة 99 % >	مرتفعة	للتطبيقات الحساسة
المعالجة الكيميائية بالكاشفات	إزالة CO_2 و H_2S	جيدة جداً	متوسطة-مرتفعة	اختيار بحسب التركيب

I-5-5. الطرق التقليدية لمعالجة الحديد

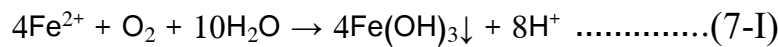
تعتمد معظم تقنيات إزالة الحديد على تحويله من الشكل الذائب (Fe^{2+}) إلى شكل غير ذائب (Fe^{3+}) ثم ($Fe(OH)_3$) يمكن فصله فيزيائياً، أو على احتجازه مباشرة عبر التبادل الأيوني أو الإمتزاز أو الأغشية. وفيما يلي أبرز هذه الطرق.¹⁷

I-5-5-1. الأكسدة ثم الترسيب والترشيح

وهي الطريقة الأكثر شيوعاً، وتقوم على أكسدة Fe^{2+} القابل للذوبان إلى Fe^{3+} الذي يتحلماً مكوناً راسب هيدروكسيد الحديد، ثم يُفصل بالتريسيب والترشيح. وتختلف المؤكسيدات المستخدمة في سرعتها وتكلفتها ونواتجها الثانوية:

أ- التهوية

أبسط الطرق وأقلها تكلفةً، إذ يُستخدم أكسجين الهواء كمؤكسد، وهي فعّالة عند pH أعلى من 7 تقريباً، لكنها بطيئة في الأوساط الحمضية أو في وجود معقدات عضوية:

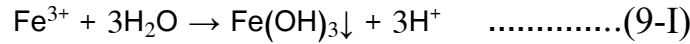
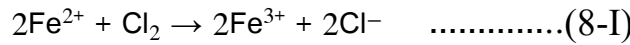


¹⁶ Grigoryan, A.A., Cornish, S.L., Buziak, F.M. et al. (2008). Competitive oxidative and reductive biodegradation of crude oil by a mixed thermophilic microbial community from a high-temperature oil reservoir. Applied and Environmental Microbiology, 74(14), 4580-4591.

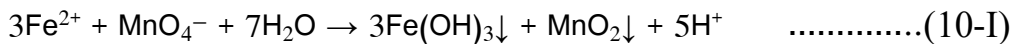
¹⁷ Moshfeghian, M. (2013). Overview of produced water treatment technologies. PetroSkills Online, Technical Note Series.

ب - الكلورة

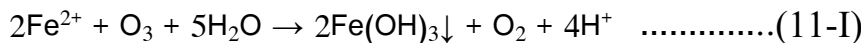
الكلور مؤكسد أسرع من الأكسجين ويعمل في مدى أوسع من pH، لكنه قد يُنتج نواتج ثانوية مكلورة غير مرغوبة:

**ج - برمنغنات البوتاسيوم**

مؤكسد قوي يؤكسد الحديد والمنغنيز معاً، ويُستخدم غالباً مع وسائط الرمل الأخضر. من ميزاتِه أنّ ناتج MnO_2 يعمل كوسيط حفّاز مساعد:

**د - الأوزون**

الأوزون مؤكسد قوي وسريع جداً، يؤكسد الحديد ويحلّل جزءاً من المركّبات العضوية في آنٍ واحد، لكنه مرتفع التكلفة ويتطلّب توليداً موقعياً:

**هـ - ثاني أكسيد الكلور (ClO_2)**

بدل للكلور يقلّل تكوين النواتج الثانوية المكلورة، وفَعّال في أكسدة الحديد والمنغنيز ضمن نطاق واسع من pH، لكنه أعلى تكلفةً ويتطلّب احترازاات سلامة.²³

I-5-5-2. التخثير والتليبد

يُستخدم لإزالة الحديد الغروي والمعدّد عبر إضافة مخثّرات مثل كبريتات الألمنيوم أو كلوريد الحديد الثلاثي (FeCl_3) أو متعدّد كلوريد الألمنيوم، حيث تُعادل الشحنات السطحية وتتجمّع الجسيمات في كتلٍ أكبر قابلة للتريسيب أو التطويف، يليه ترشيح، إضافة إلى أن فعالية التخثير تعتمد على جرعة المخثر وقيمة الـ pH.

I-5-5-3. التريسيب بالجير/التلطيف

برفع pH بإضافة الجير $\text{Ca}(\text{OH})_2$ إلى ما فوق 9.5 يترسّب الحديد على هيئة هيدروكسيد إلى جانب إزالة العسر. الطريقة فعّالة لكنها تنتج كمياتٍ كبيرة من الحمأة وتتطلّب معادلة pH لاحقاً.

I-5-5-4. التبادل الأيوني

تُستخدم مبادلات كاتيونية لإحتجاز Fe^{2+} مقابل إطلاق Na^+ ، وهي مناسبة للتراكيز المنخفضة من الحديد، لكنها حسّاسة جداً لإنسداد المبادل بأكاسيد الحديد. إذا تأكسد الحديد قبل المبادل، كما تتأثّر بالملوحة العالية للمياه البترولية.

I-5-5-5. الترشيح الغشائي

تُزيل أغشية الترشيح الفائق والترشيح النانوي والتناضح العكسي الحديد الغروي والذائب بكفاءة عالية، إلا أن ترسب أكاسيد الحديد على سطح الغشاء يُعدّ من أهم أسباب الإنسداد وتدهور الأداء، لذا يُسبق عادةً بمرحلة أكسدة/ترشيح تمهيدي.

I-6-5-5. الإمتزاز

يعتمد على مواد مازة مثل الفحم المنشط، وأكاسيد المنغنيز، وأكاسيد الحديد الحبيبية، والزيوليت، والمواد النانوية. تتميز بسهولة التشغيل وكفاءتها عند التراكيز المنخفضة، لكنّ سعتها محدودة وتتطلب إعادة تنشيط دوري.

I-7-5-5. الإزالة البيولوجية

تُستثمر فيها بكتيريا مؤكسدة للحديد (مثل Gallionella و Leptothrix) لأكسدة Fe^{2+} تحت ظروف مضبوطة من الأوكسجين و pH، فترسب أكاسيد الحديد ضمن كتلة حيوية يسهل فصلها. منخفضة استهلاك المواد الكيميائية لكنها أبطأ وأكثر حساسية لظروف التشغيل.

I-8-5-5. الترشيح بالوسائط الحفّازة

تستخدم وسائط مثل الرمل الأخضر المنغنيزي (Manganese Greensand) و Birm و Pyrolusite التي تحفّز أكسدة الحديد على سطحها ثم تحتجز الراسب. شائعة في المعالجة اللامركزية لكفاءتها وبساطتها.¹⁸

جدول (3-I): مقارنة موجزة بين الطرق التقليدية لإزالة الحديد.¹⁸

القيود	المزايا	الطريقة
بطيئة وغير فعالة مع الحديد المعقد أو في الوسط الحمضي	منخفضة التكلفة، بلا مواد كيميائية	التهوية
نواتج ثانوية مكلورة، احترازاات سلامة	أكسدة سريعة، مدى pH واسع	الكلور / ClO_2
تكلفة أعلى، جرعة دقيقة لتجنّب اللون الوردي	تزيل الحديد والمنغنيز معاً	برمغنات البوتاسيوم
إنتاج حمأة، حاجة لضبط الجرعة	فعال للحديد الغروي والمعقد	التخثير والتليبد
انسداد الراتنج، حساس للملوحة العالية	كفاء عند التراكيز المنخفضة	التبادل الأيوني
انسداد بأكاسيد الحديد، تكلفة وطاقة	كفاءة إزالة عالية جداً	الأغشية (UF/NF/RO)
سعة محدودة، إعادة تنشيط دورية	بساطة التشغيل، كفاء عند التراكيز الدنيا	الامتزاز
أبطأ، حساسة لظروف التشغيل	مواد كيميائية أقل	الإزالة البيولوجية

¹⁸ Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). MWH's Water Treatment: Principles and Design (3rd ed.). John Wiley & Sons.

I-5-6. عمليات الأكسدة المتقدمة

تُعرف عمليات الأكسدة المتقدمة بأنها مجموعة من العمليات التي تعتمد على توليد جذور حرّة عالية الفعالية، وفي مقدّمتها جذر الهيدروكسيل ($\text{OH}\cdot$)، الذي يمتلك جهد أكسدة يبلغ نحو 2.8 فولت، وهو من أعلى جهود الأكسدة بعد الفلور. ولهذا الجذر قدرة على أكسدة شبه انتقائية للملوثات العضوية وتحويلها في النهاية إلى ثاني أكسيد الكربون والماء وأملاح معدنية.

تشمل عمليات الأكسدة المتقدمة عدّة منظومات منها: فنتون، والأكسدة الضوئية الحفّازة، وأنظمة الأوزون المتقدمة ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$)، والأشعة فوق البنفسجية مع فوق أكسيد الهيدروجين ($\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$)، والأكسدة الكهروكيميائية. وتتميز هذه العمليات بأنها لا تنقل الملوث من وسط إلى آخر فحسب، بل تُدمّره، ما يجعلها مناسبة للمياه البترولية ذات المحتوى العضوي العالي والمقاوم للتحلل البيولوجي.

I-5-6-1. الأكسدة المتقدمة بطريقة فنتون

أ- الأساس التاريخي وكاشف فنتون

يعود إكتشاف هذا التفاعل إلى العالم هنري جون هورستمان فنتون عام 1894 حين لاحظ أنّ مزيجاً من بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) وأملاح الحديد الثنائي (Fe^{2+}) يؤكسد حمض الطرطريك ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$) بكفاءة عالية. ويُسمّى هذا المزيج «كاشف فنتون».

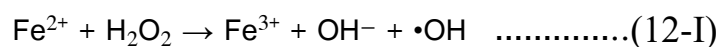
وقد جرى توضيح آليته الجذرية الحرّة لاحقاً، لا سيّما في أعمال والينغ (Walling) عام 1975 التي رسّخت دور جذر الهيدروكسيل.¹⁹

ب- جذر الهيدروكسيل ودوره

يُعدّ جذر الهيدروكسيل ($\text{OH}\cdot$) العنصر الفعّال في عملية فنتون؛ فهو جذر غير انتقائي عالي الفعالية يهاجم المركّبات العضوية بثلاث آليات رئيسية: انتزاع ذرّة هيدروجين، والإضافة إلى الروابط المزدوجة، ونقل الإلكترون. وتؤدي هذه التفاعلات إلى تفكيك الجزيئات الكبيرة المعقّدة إلى جزيئات أصغر قابلة للتحلل، وصولاً إلى التمدن الكامل.²⁰

ج- الآلية الكيميائية والمعادلات

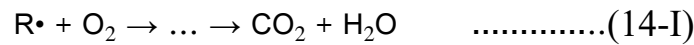
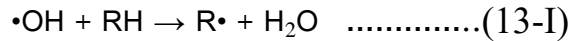
التفاعل الأساسي والمحرّك للعملية هو تفاعل أيون الحديد الثنائي مع بيروكسيد الهيدروجين لتوليد جذر الهيدروكسيل (ثابت سرعة التفاعل ≈ 76 مول.ل⁻¹.ثا⁻¹).



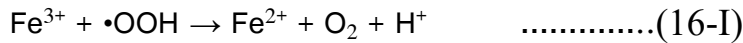
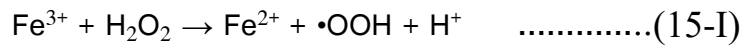
¹⁹ Fenton, H. J. H. (1894). Oxidation of tartaric acid in presence of iron. Journal of the Chemical Society, Transactions, 65, 899-910.

²⁰ Walling, C. (1975). Fenton's reagent revisited. Accounts of Chemical Research, 8(4), 125-131.

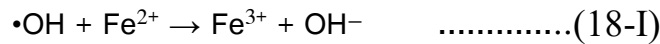
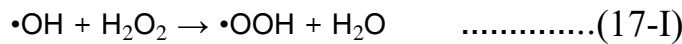
ثم يهاجم جذر الهيدروكسيل المركبات العضوية (RH) ليبدأ سلسلة الأكسدة:



ويُستعاد الحديد الثنائي عبر التفاعلات الشبيهة بفتون التي يتفاعل فيها الحديد الثلاثي مع بيروكسيد الهيدروجين، لكنها بطيئة نسبياً (ثابت السرعة ≈ 0.01 مول.ل⁻¹.ثا⁻¹) وتُعدّ الخطوة المحددة للسرعة:



وهناك تفاعلات جانبية تستهلك الجذور وتقلل الكفاءة عند الجرعات الزائدة من بيروكسيد الهيدروجين أو الحديد:



د- العوامل المؤثرة في كفاءة عملية فتون

تتأثر كفاءة عملية فتون بعدة متغيرات تشغيلية مترابطة يجب ضبطها بعناية للحصول على أعلى كفاءة وأقل تكلفة:

- **درجة الحموضة (pH):** أهم عامل على الإطلاق؛ المدى الأمثل غالباً بين 2.5 و3.5، فعند pH أعلى يترسب الحديد على هيئة هيدروكسيد ويفقد فعاليته، وعند pH أدنى تتكوّن معقدات حديدية أقل نشاطاً ويتثبّت تفكك H_2O_2 .
- **جرعة بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2):** تزيد الكفاءة بزيادة الجرعة حتى حدّ معين، ثم ينقلب التأثير لأنّ الفائض يلتقط جذور الهيدروكسيل (المعادلة (17-I)) ويقلل الكفاءة ويرفع التكلفة.
- **نسبة $[\text{H}_2\text{O}_2]:[\text{Fe}^{2+}]$:** النسبة المثلى تُحدّد تجريبياً وتتراوح عادةً بين 3:1 و15:1 حسب طبيعة الملوّث؛ فالحديد القليل يبطئ التفاعل والحديد الزائد يلتقط الجذور (المعادلة (18-I)) ويزيد الحمأة.
- **درجة الحرارة:** ترفع الحرارة سرعة التفاعل عموماً، لكنّ تجاوز نحو 40-50 م° يُسرّع التحلل الذاتي لبيروكسيد الهيدروجين إلى ماء وأكسجين دون توليد جذور مفيدة.
- **زمن التفاعل:** يحدث الجزء الأكبر من الأكسدة في الدقائق الأولى السريعة، تتبعها مرحلة بطيئة؛ ويُحدّد الزمن الأمثل بمتابعة إزالة الطلب الكيميائي للأكسجين.
- **الملوّثات المتداخلة:** أيونات مثل الكلوريد والكبريتات والكربونات والفوسفات قد تلتقط الجذور أو تعقد الحديد، وهي وفيرة في المياه البترولية، ما يستلزم تحسيناً خاصاً للجرعات.²¹

²¹ Neyens, E., & Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. Journal of Hazardous Materials, 98(1-3), 33-50. DOI: 10.1016/S0304-3894(02)00282-0

جدول (4-I): القيم التشغيلية الإرشادية لعملية فنتون التقليدية.²¹

المتغير	المدى الإرشادي
درجة الحموضة pH	3.5 – 2.5
نسبة $H_2O_2 : Fe^{2+}$ (مولي)	3:1 إلى 15:1 (تُحدّد تجريبياً)
درجة الحرارة	20 – 40 م°
زمن التفاعل	30 – 120 دقيقة (حسب الملوّث)
الخطوة التالية	معادلة pH ثم ترسيب/ترشيح الحمأة

هـ- تطبيق عملية فنتون على المياه البترولية وإزالة الحديد

تُعدّ عملية فنتون مناسبةً بشكلٍ خاص للمياه البترولية لأنها تعالج هدفين في آنٍ واحد: أكسدة المركّبات الهيدروكربونية والفينولية المقاومة للتحلّل البيولوجي من جهة، وتحويل الحديد الذائب Fe^{2+} إلى Fe^{3+} القابل للترسيب من جهةٍ أخرى، وميزة فريدة هنا أنّ الحديد الموجود أصلاً في المياه البترولية يمكن أن يقوم جزئياً بدور المحفز، فيتحوّل التلوّث بالحديد إلى عاملٍ مساعد في المعالجة.

في الممارسة العملية تُجرى المعالجة عبر مراحل: إضافة كاشف فنتون بنسبٍ مضبوطة ، ضبط pH إلى نحو 3، التحريك لفترة التفاعل، ثم رفع pH إلى نحو 7-8 لترسيب الحديد والمركّبات على هيئة حمأة، يليها ترسيب/ترشيح. وتُقيّم الكفاءة بقياس نسبة إزالة الطلب الكيميائي للأكسجين (COD) وإجمالي الكربون العضوي (TOC) وتركيز الحديد المتبقي، إضافةً إلى تحسّن قابلية المياه للتحلّل الحيوي (BOD_5/COD).²²

جدول (5-I): القيود و المزايا لعملية فنتون²²

القيود	المزايا
الحاجة إلى ضبط pH منخفض ثم معادلته لاحقاً	كواشف رخيصة وأمنة نسبياً وغير سامة (بيروكسيد الهيدروجين)
إنتاج حمأة حديدية تتطلّب معالجة وتخلّصاً	تشغيل بسيط في ظروف الضغط ودرجة الحرارة العاديتين
استهلاك الجذور بواسطة الأيونات المتداخلة (كلوريد/كربونات)	تدمير فعلي للملوّثات (تمعدن) وليس مجرد نقلها
تكاليف بيروكسيد الهيدروجين عند التراكيز العالية	ترفع قابلية المياه للتحلّل الحيوي كمعالجة تمهيدية

²² Pignatello, J. J., Oliveros, E., & MacKay, A. (2006). Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(1), 1–84. DOI: 10.1080/10643380500326564

I-6. مياه الحقن في الآبار البترولية

I-6-1. مفهوم الحقن المائي وأهدافه

يُعدّ الحقن المائي التقنية الأكثر إنتشاراً وتطبيقاً في أساليب الإسترداد الثانوي للبترول عالمياً. يعتمد المبدأ على ضخ كميات كبيرة من المياه في طبقات البئر البترولي عبر آبار الحقن بهدف رفع ضغط البئر ودفع البترول نحو آبار الإنتاج ، تستهلك عمليات الحقن المائي ما يزيد على 90% من إجمالي حجم المياه المستخدمة في الصناعة البترولية²³.

تتسم فاعلية هذه التقنية بإرتفاعها مقارنة بأساليب الإسترداد الأولية إذ ترفع معامل الإسترداد من نطاق 15-25% إلى 30-50% من إجمالي البترول الموجود في البئر تعتمد الفاعلية على عوامل هندسية وجيولوجية : نمط شبكة الآبار، وتجانس البئر، ونسبة لزوجة البترول بالنسبة إلى الماء، وخصائص الصخر.²⁴

I-6-2. مصادر مياه الحقن

- تتعدد مصادر مياه الحقن المستخدمة في العمليات البترولية تبعاً للموقع الجغرافي وتوافر الموارد المائية وطبيعة البئر:
- مياه البحر : الأكثر استخداماً في الحقول البحرية، تتميز بالوفرة غير المحدودة لكنها تحتوي على نسبة عالية من كبريتات SO_4^{2-} قد تترسب مع Ba^{2+} و Sr^{2+} مكونة $BaSO_4$ و $SrSO_4$ شديدي الصلابة.
 - المياه الجوفية : مياه تكوينات الجيولوجية القريبة، تتسم عادة بملوحة متوسطة وتوافق جيد مع مياه المكمن.
 - مياه الإنتاج المُعالَجة : إعادة تدوير المياه المصاحبة للنفط بعد معالجتها، وهو النهج البيئي والاقتصادي الأمثل.
 - المياه السطحية : تحتاج معالجة مكثفة قبل الاستخدام بسبب تنوع التلوث البيولوجي والكيميائي.
 - مياه محطات تحلية المياه : نادرة الاستخدام في الحقن نظراً لتكلفتها المرتفعة، تُستخدم في حالات خاصة.

I-6-3. منظومة الحقن المائي

I-6-3-1. التصميم الهندسي لشبكة الآبار

يُعدّ التصميم الهندسي لشبكة الحقن من أهم عوامل نجاح العملية. تُصمَّم الشبكة وفق أنماط هندسية معيارية تتحدد بالتوزيع الجغرافي لآبار الحقن والإنتاج:

- نمط الخماسي العكسي : أكثر الأنماط شيوعاً، تحيط 4 آبار إنتاج بكل بئر حقن مركزية في مربع متساوي الأضلاع.
- نمط السباعي : بئر حقن مركزية تحيط بها 6 آبار إنتاج بشكل سداسي - مناسب للآبار المتجانسة.

²³ Metcalf & Eddy / Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill.

²⁴ Craig, F.F. (1971). The Reservoir Engineering Aspects of Waterflooding. SPE Monograph Series, Society of Petroleum Engineers, Dallas.

- نمط الصف : صفوف متوازية من آبار الحقن والإنتاج - يُفضّل في البئر المتطاولة.
- نمط الخطي المتعكس : يمنح توزيعاً أكثر انتظاماً للضغط مع الحد من الاختراق المبكر للمياه.

I-6-3-2. مكونات منظومة الحقن

تتكون منظومة الحقن المائي من سلسلة متكاملة من المعدات والوحدات التشغيلية:

1. وحدة سحب المياه وجمعها: تشمل مضخات السحب من المصدر، ومحطات الجمع الأولية.
2. محطة المعالجة المتكاملة : تضم الترشيح الابتدائي، والأكسدة، والكلورة، والترشيح الدقيق، وحقن المواد الكيميائية.
3. مضخات الحقن عالية الضغط : توفر الضغط اللازم لتجاوز ضغط المكمن، تتراوح ضغوط التشغيل 200-700 بار.
4. شبكة خطوط التوزيع : أنابيب فولاذية مطلية داخلياً أو مصنوعة من سبائك مقاومة للتآكل.
5. آبار الحقن : مجهزة بمعدات إكمال مصممة لتحمل الضغط العالي ومقاومة التآكل.
6. نظام المراقبة والتحكم (SCADA) : مستشعرات ضغط وتدفق وجودة متصلة بمركز تحكم مركزي.

I-6-4. شروط جودة مياه الحقن

- تُعدّ جودة مياه الحقن العامل الحاسم في نجاح العملية وطول عمر المنشآت. تؤدي المياه رديئة الجودة إلى ثلاثة أضرار رئيسية: تلف التكوين، وتآكل المعدات، وانسداد آبار الحقن. أشار إيسينجر (Esinger, 1989) إلى أن أكثر من 60% من حالات انخفاض معدلات قبول الحقن ترجع إلى رداءة جودة مياه الحقن. تتحكم في جودة مياه الحقن معايير متعددة ترتبط ارتباطاً وثيقاً بخصائص البئر المُستقبل:
- نفاذية البئر: كلما قلت النفاذية، زادت الحاجة إلى ترشيح أدق.
 - نوع الصخر: الحجر الجيري الكلسي أكثر حساسية للتفاعلات الكيميائية من الحجر الرملي.
 - درجة حرارة البئر: تؤثر في معدلات الترسيب والنشاط البكتيري.
 - ضغط البئر ودرجة تشبعه بالبترول والماء: تحدد معدل تدفق الحقن المطلوب.

I-6-5 آلية تلف التكوين جراء الحقن

يحدث تلف التكوين بمجموعة من الآليات التي تُقلّص نفاذية البئر وتعيق تدفق البترول نحو آبار الإنتاج. يُعدّ هذا التلف من أخطر العوامل المؤثرة في كفاءة المكمن وقد يُخفّض معدل الإنتاج بنسبة 20-60% في الحالات الشديدة

جدول (6-I): أسباب تلف التكوين أثناء الحقن وأساليب الوقاية²⁵

أسلوب الوقاية	الآلية	سبب التلف
ترشيح دقيق $2 \mu\text{m}$ < قبل الحقن	تراكم المواد العالقة عند وجه البئر	انسداد المسام بالجسيمات الصلبة
دراسة توافق المياه قبل الحقن	تفاعل أيونات $\text{Ca}^{2+}/\text{Ba}^{2+}$ مع كبريتات الحقن	تبادل التوافق بين المياه
حقن مبيدات بكتيرية دورية	إنتاج H_2S و FeS داخل التكوين	النشاط البكتيري (SRB)
ملوحة المياه موافقة لمياه التكوين	انتفاخ معادن الطين بالماء العذب	تورم الطين
ضبط pH ضمن 6.5 – 8.0	نشاط حمضي / قلوي	الانحلال الكيميائي للطين

7. I. المعايير العالمية و الوطنية لمياه الحقن

1-7-I نظرة عامة على المعايير الدولية

تُحدد المنظمات الدولية المتخصصة معايير دقيقة لجودة مياه الحقن تهدف إلى حماية الآبار ومنشآت الحقن والبيئة المحيطة. وتختلف هذه المعايير تبعاً لطبيعة البئر (كربوناتي/ رملي)، والنفاذية، ومستوى الضغط، وغيرها من المتغيرات التشغيلية. تأتي في مقدمة هذه المعايير وأكثرها استخداماً عالمياً:^{26,27,28}

1-1-7-I. معيار المعهد الأمريكي للبترول (American Petroleum Institute) API RP 45

يُصدر المعهد الأمريكي للبترول (API) توصياته القياسية الشاملة للحقن المائي ضمن الوثيقة API RP 45، التي تُغطي تحديد معايير الجودة الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لمياه الحقن، وبروتوكولات أخذ العينات وتحليلها، ومنهجيات تصميم منظومات المعالجة. يُولي هذا المعيار اهتماماً خاصاً لقياس نفاذية الترشيح عبر اختبار نسبة الإنسداد الذي يُحاكي ظروف الحقن في البئر.²⁶

2-1-7-I. معيار المنظمة الدولية لتوحيد القياس (International Standards ISO 13500

Organization)

تُقَدِّم الوثيقة ISO 13500 إرشادات موحدة على المستوى الدولي لإختبار مواد الحفر وموائع الحقن المُستخدمة في الصناعة البترولية. يحدد المعيار متطلبات دقة التحليل المختبري وأدوات القياس ومتطلبات الجودة الشاملة.²⁷

²⁶ API RP 45 (2003). Recommended Practice for Analysis of Oilfield Waters, 3rd Edition. American Petroleum Institute, Washington D.C.

²⁷ ISO 13500:2008 (2008). Petroleum and Natural Gas Industries – Drilling Fluid Materials – Specification and Testing. International Organization for Standardization, Geneva.

I-7-1-3. معيار NACE MR0175 / ISO 15156

وضعت جمعية مهندسي التآكل والصناعة هذا المعيار بشكل مشترك مع ISO لتحديد متطلبات المواد المستخدمة في البيئات الكبريتية لتفادي ظاهرة الهشاشة بالإجهاد الكبريتي . يلزم هذا المعيار بضبط تركيز H_2S في مياه الحقن بأقل من 0.1 ملغ/ل.²⁸

I-7-1-4. معايير أرامكو السعودية ومعايير إقليمية

تُطبق شركة أرامكو السعودية معايير داخلية بالغة الدقة في مجال الحقن المائي، وكثيراً ما تفوق في صرامتها المعايير الدولية المذكورة، مما يعكس الطبيعة الفريدة للآبار السعودية وحجم الإنتاج الإستثنائي المطلوب المحافظة عليه. تُشدد هذه المعايير بشكل خاص على الحديد الكلي (> 0.2 ملغ/ل) حجم الجسيمات (< 2 ميكرومتر) و الأكسجين الذائب (> 0.03 ملغ/ل).²⁹

I-7-2. نظرة عامة على المعايير الوطنية

في الجزائر، تتبنى شركة سوناطراك بالتنسيق مع المعهد الجزائري للبترول (IAP) توصيات API RP 45 و ISO 13500 كمرجع أساسي في مواصفات مياه حقن الحقول، مع تكتيقات تراعي طبيعة المكامن الصحراوية العميقة ، حيث تُمثّل مكامن الحجر الرملي الكامبري والأوردوفيسي النصيب الأكبر من حقول الحقن.

جدول (I-7): مقارنة المعايير الدولية لجودة مياه الحقن^{26,27,28,29}

المعيار / البند	NACE MR0175	ISO 13500	API RP 45	المملكة (ARAMCO)
الأكسجين الذائب (DO)	> 0.2 ملغ/ل	> 0.05 ملغ/ل	> 0.05 ملغ/ل	> 0.03 ملغ/ل
إجمالي الصلابة العالقة (TSS)	> 2 ملغ/ل	> 5 ملغ/ل	> 5 ملغ/ل	> 2 ملغ/ل
الحديد الكلي	> 0.5 ملغ/ل	> 0.5 ملغ/ل	> 1 ملغ/ل	> 0.2 ملغ/ل
حجم الجسيمات (D_{98})	< 2 ميكرومتر	< 5 ميكرومتر	< 10 ميكرومتر	< 2 ميكرومتر
الكبريتيدات (H_2S)	> 0.1 ملغ/ل	> 0.5 ملغ/ل	> 1 ملغ/ل	> 0.1 ملغ/ل
بكتيريا SRB	< 1 و ت م / مل	< 10 و ت م / مل	< 10 م ت م / مل	< 1 و ت م / مل
درجة الحرارة	—	≥ 60 °م	\leq ambient	≥ 60 °م
الرقم الهيدروجيني (pH)	8.0 – 6.5	8.0 – 6.5	8.5 – 6.5	8.0 – 6.5

²⁸ NACE MR0175/ISO 15156 (2005). Petroleum and Natural Gas Industries – Materials for Use in H_2S Containing Environments in Oil and Gas Production. NACE International, Houston.

²⁹ Saudi Aramco Engineering Standards (2019). SAES-A-007: Corrosion Prevention for Oil and Gas Facilities. Saudi Aramco, Dhahran.

I-8. إختبارات قياس جودة مياه الحقن

تتضمن المتطلبات المختبرية الأساسية لمراقبة جودة مياه الحقن مجموعة من الاختبارات القياسية:

- اختبار نسبة الانسداد : يقيس مدى قدرة الماء على اجتياز غشاء ترشيح بقطر مسام 0.45 ميكرومتر، ويكون المعدل المقبول > 1.2 ، فوقه يدل على احتمال انسداد التكوين.
 - تحديد الأكسجين الذائب بمسبار كيميائي أو بطريقة: قياس حرج لأن الأكسجين يُسرّع تآكل الفولاذ بمعدل 4 مرات عند كل ارتفاع بمقدار 1 ملغ/ل.
 - عدد الجسيمات بمخضبة أحجام الجسيمات : يُعطي توزيعاً دقيقاً للجسيمات يُعين في اختيار درجة الترشيح المطلوبة.
 - تعداد بكتيريا SRB بزجاجات : الإختبار القياسي اللاهوائي للكشف عن وجود البكتيريا وقياس تركيزها (نتائج خلال 28 يوماً).
 - قياسات الحديد الكلي والذائب: بمنهجية تحليل اللون أو مطيافية الامتصاص الذري (AAS).
 - قياس التوافق الكيميائي : خلط نماذج من مياه الحقن ومياه التكوين بنسب مختلفة ومراقبة الترسيب³⁰.
- تشكل هذه المفاهيم الأساسية مقدمة ضرورية للفصول اللاحقة، التي سنتناول بشكل مفصل العمليات التطبيقية و النتائج التجريبية المتعلقة بهذه المذكرة.

³⁰ ASTM D5907-18 (2018). Standard Test Methods for Filterable Matter (Total Dissolved Solids) and Nonfilterable Matter (Total Suspended Solids) in Water. ASTM International.

الفصل الثاني

التعريف بوحدة المعالجة، المواد والأنوات
المستخدمة

تمهيد

تهدف معالجة المياه البترولية إلى تقليل محتوى الزيت والمواد الصلبة العالقة فيها. مما يسمح بإعادة حقنها أو تصريفها في البيئة بأمان، ورغم فعاليتها إلا أنها لا تكفي لإزالة شوارد الحديد الذائبة والمرتسبة التي غالباً ما تكون مرتفعة في المياه البترولية. حيث يشمل هذا الفصل الجانب التطبيقي من الدراسة، حيث تم العمل على عينة من المياه البترولية الناتجة عن معالجة البترول الخام وفق بروتوكولات وتقنيات محددة.

قمنا في هذا العمل التجريبي بإجراء سلسلة من التجارب والتحليل الفيزيائية والكيميائية خلال الفترة الممتدة من 9 أبريل 2026 إلى 13 أبريل 2026 بهدف المساهمة في تحسين جودة المياه المعالجة بإزالة شوارد الحديد وفق طرق معينة. وتعد هذه الطرق خطوة تكميلية ضرورية وهو ما يشكل محور هذا الفصل.

II-1. وحدة معالجة البترول الخام الجنوبية "UTBS"**II-1-1. التعريف بالوحدة**

وحدة معالجة البترول الخام الجنوبية (UTBS) تم تشغيلها في سبتمبر 2010، وهي وحدة مصممة لاستقبال ومعالجة البترول الخام المنتج من ستة حقول فرعية قائمة في منطقة حاسي مسعود الجنوبية، وشحن البترول المستقر إلى منشأة التخزين الواقعة في حوض الحمراء.

تقع الوحدة على بعد 7 كيلومترات جنوب غرب المركز الصناعي الجنوبي (CIS). (الشكل II-01)

صُممت هذه الوحدة لمعالجة البترول الخام من حقل حاسي مسعود، الذي يضم حالياً أكثر من 1000 بئر. وقد قامت شركة Saipem إيطالية متخصصة في استكشاف البترول وحفر الآبار، وهي جزء من مجموعة ENI ببناء هذه الوحدة، خُصصت وحدة المعالجة في حقل حاسي مسعود لمعالجة البترول الخام المفصول من ست وحدات فرعية أي لإنتاج ما يصل إلى 300,000 برميل من البترول الخام المستقر يومياً (47,700 متر مكعب/يوم).¹

¹ Document de SONATRACH. 2010 Manuel opératoire de L'unité traitement brut HASSI MESAUD sud UTBS.



الشكل (II-01): الموقع الجغرافي لوحدة المعالجة الجنوبية (UTBS).

2-II. وحدة معالجة المياه البترولية "EXPRO"

1-2-II. التعريف بالوحدة

قامت شركة إكسبرو (EXPRO) الإيطالية، المتخصصة في استكشاف البترول وحفر الآبار والتابعة لمجموعة ENI، ببناء وحدة معالجة المياه الزيتية عام 2022.

تقع هذه الوحدة الجديدة في وحدة معالجة البترول الخام الجنوبية (UTBS) التابعة لشركة سوناپارك في حاسي مسعود. يهدف نظام معالجة المياه الزيتية إلى معالجة ما يصل إلى 120 م³/سا من المياه المنتجة في وحدة معالجة البترول الخام الجنوبية قبل تصديرها إلى حقل OMN-77.

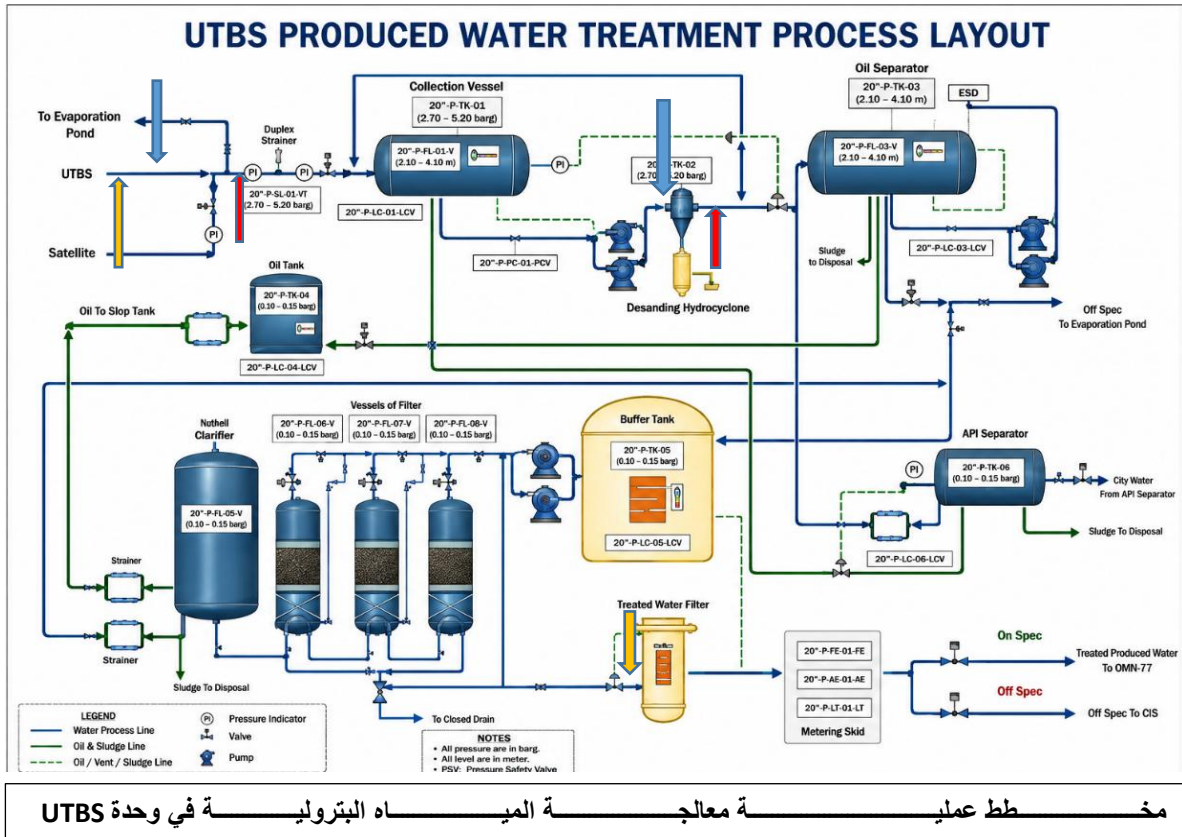


الشكل (II-02): وحدة معالجة المياه البترولية UTBS من شركة EXPRO.

2-2-II. وصف عملية الوحدة

يتم توجيه المياه البترولية من أجهزة الفصل ثلاثية الأطوار وأجهزة إزالة الملح التابعة لوحدة معالجة البترول الخام الجنوبية (UTBS) أولاً إلى خزان تجميع المياه (CV)، ومنه تُضخ عبر فاصل هيدروسيكلون لإزالة الشوائب إلى وحدة التعويم بالغاز المُستحث (IGF).

تُنقل المياه المُعالجة من وحدة التعويم بالغاز المُستحث إلى خزان وسيط، ثم تُضخ عبر مرشحات (قشور الجوز)، ومرشحات المياه المُعالجة الدقيقة إلى حقل OMN-77 لإعادة حقنها.



مخطط عملية معالجة المياه البترولية في وحدة UTBS

الشكل (II-03): مخطط نقاط الحقن وأخذ العينات من وحدة معالجة المياه البترولية.

✓ السهم الأزرق: نقاط حقن المُخثِّر.

✓ السهم الأحمر: نقطة حقن المُرسَّب.

✓ السهم الأصفر: نقاط أخذ العينات عند المدخل والمخرج.

3-2-II. أخذ العينات

يتم أخذ عينة من مدخل الوحدة وأخرى من مخرجها، لإجراء التحاليل الفيزيائية والكيميائية في مختبر EXPRO-UTBS.

- فيما يلي المعايير التي تم قياسها:
- إجمالي الهيدروكربونات البترولية (TPH).
- إجمالي المواد الصلبة العالقة (TSS).
- الأس الهيدروجيني (pH).
- الأكسجين المذاب (OD).
- الطلب الكيميائي على الأكسجين (COD).
- تركيز الحديد الكلي المذاب في الماء (Fe TOT)
- الطلب البيولوجي على الأكسجين (BOD).

يتم أخذ عينتي المياه البترولية، عند المدخل والمخرج، باتباع شروط أخذ العينات المطلوبة بدقة (الشكل II-04).



الشكل (II-04): أخذ العينات من مدخل ومخرج وحدة معالجة المياه البترولية.

3-II. الطرق المعتمدة في التحاليل المخبرية

1-3-II. تحديد إجمالي الهيدروكربونات البترولية (TPH) في المياه عن طريق الامتصاص بالأشعة تحت الحمراء،

باستخدام جهاز **ASTM D7066-04: InfraCal 2 FOG TPH**

صُمم جهاز تحليل **InfraCal2 ATR-SP** (الشكل II-05) لقياس المواد القابلة للاستخلاص بالمذيبات (الزيوت والشحوم) في الماء باستخدام الهكسان (hexane) بتقنية الأشعة تحت الحمراء، ضمن نطاق قراءة يتراوح بين 0 و 200 ملغ/ل. تصف هذه الطريقة تحديد إجمالي الهيدروكربونات البترولية (TPH) في الماء عن طريق امتصاص

الأشعة تحت الحمراء. ويتم تحديد إجمالي محتوى الهيدروكربونات البترولية في العينة باستخدام إجراء InfraCal2 .FOG TPH



الشكل (II-05): محلل الهيدروكربونات البترولية الكلية InfraCal2.ATR-SP

II-3-2. تحديد تركيز إجمالي المواد الصلبة العالقة في الماء في الموقع باستخدام مرشح غشائي:

ASTMD5907

المواد الصلبة غير القابلة للترشيح (المواد الصلبة العالقة) هي كتلة الجسيمات العالقة غير الذائبة في عينة الماء، والتي يمكن احتجازها بواسطة مرشح مثبت على وحدة ترشيح خطية. يُعدّ رصد المواد الصلبة العالقة في الماء أمراً بالغ الأهمية في العديد من مجالات معالجة المياه. عندما تكون العينة عند درجة حرارة وضغط الغلاف الجوي، يُعدّ التحليل المختبري باستخدام الترشيح الفراغي أبسط طريقة لقياس كمية المواد الصلبة العالقة.

المبدأ

يتم ترشيح حجم معلوم من الماء عبر غشاء ترشيح اختباري ذي وزن محدد مسبقاً. يُقاس ازدياد وزن غشاء الترشيح بعد غسله وتجفيفه بفرن التجفيف. كما يُقاس تعيّر وزن غشاء الترشيح المرجعي، الموضوع أسفل غشاء الترشيح الاختباري مباشرةً. يُحدد إجمالي الملوثات بناءً على ازدياد وزن غشاء الترشيح الاختباري مقارنةً بوزن غشاء الترشيح المرجعي. تحديد كمية المواد الصلبة العالقة في حجم معلوم من العينة:

$$[TSS] = (Y - X)/V$$

Y = كتلة المرشح بعد الترشيح.

X = كتلة المرشح قبل الترشيح.

V = حجم العينة.



الشكل (II-06): جهاز ترشيح نموذجي من شركة (Millipore).

3-3-II. تحديد الـ pH باستخدام ASTM D1293:

يتم قياس الرقم الهيدروجيني لجميع العينات باستخدام جهاز قياس الـ pH (HACH). بعد معايرة الجهاز، اغمر القطب الكهربائي في العينة وانتظر حتى تستقر قيمة الأس الهيدروجيني.

4-3-II. تحديد الأكسجين المذاب (DO): ASTM D888

يتم قياس تركيز الأكسجين المذاب في الموقع باستخدام كاشف قياس الأكسجين المذاب (Dissolved Oxygen R-7501).

5-3-II. تحديد الطلب البيولوجي على الأكسجين (BOD₅): ASTM 888-05

1-5-3-II. مبدأ قياس BOD₅

يُعبّر عن BOD₅ بوحدة ملليغرام من الأكسجين لكل لتر من الماء (ملغم O₂/ل). لإجراء هذا القياس، تُحضن عينة من الماء تحتوي على بكتيريا مصنعة مع توفير الوسط الغذائي لها عند درجة حرارة 20 م° في الظلام لمدة خمسة أيام. يُقاس تركيز الأكسجين المذاب قبل هذه الفترة وبعدها. يشير الفرق بين القيمتين إلى كمية الأكسجين التي استهلكتها البكتيريا لتحليل المواد العضوية الموجودة في الماء.

الصيغة العامة لحساب BOD₅ هي:

$$BOD_5 = O_{2\text{initial}} - O_{2\text{final}}$$

الطريق المتبعة في هذا المختبر هي:

$$BOD_5 = \frac{((Day1 - Day 5) - (B1 - B2) * f)}{P}$$

$$P = \frac{V(E)}{V(T)} ; f = 1 - P$$

Day: اليوم ، B : بكتيريا ، V(E) : حجم العينة

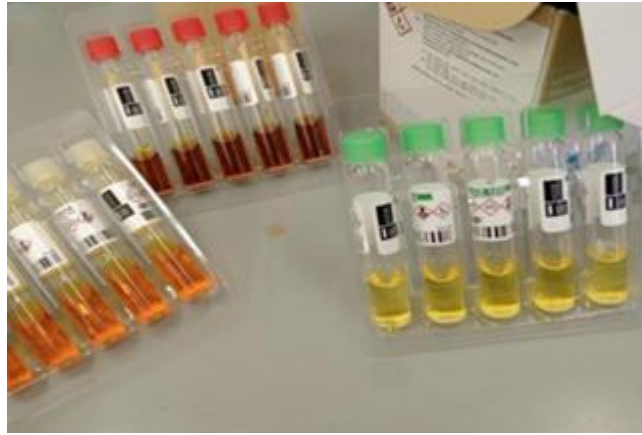
II-3-6. تحديد الطلب الكيميائي على الأوكسجين (COD)

يُعدّ تحديد الطلب الكيميائي على الأوكسجين (COD) قياسًا أساسيًا في معالجة مياه الصرف المستعملة، بما في ذلك المياه البترولية التي تحتوي على الهيدروكربونات.

II-3-6.1. مبادئ قياس الطلب الكيميائي للأوكسجين (COD)

تعتمد طريقة قياس الطلب الكيميائي للأوكسجين على استخدام عامل مؤكسد قوي، عادةً ثنائي كرومات البوتاسيوم، يتفاعل مع المواد القابلة للأكسدة في الماء. تتم العملية على عدة مراحل:

- تُخلط عينة من الماء مع عامل مؤكسد.
- يُسخن المحلول تحت التكتيف الارتجاعي لضمان اكتمال التفاعل.
- ثم تُحدد كمية الأوكسجين المستهلكة عن طريق المعايرة أو التحليل اللوني.
- يُقاس الطلب الكيميائي للأوكسجين عادةً في غضون ساعات قليلة، مما يجعله أسرع من قياس الطلب البيولوجي للأوكسجين (BDO)، الذي يتطلب فترة حضانة تصل إلى خمسة أيام.²



الشكل (II-07): نطاقات الكواشف [300-50]، [2000-100]، [10000-1000] (ملغ/ل)

² Expro Oily water treatment manuel Book projet UTBS 2020 English version.

II-4. الأدوات والمواد والأجهزة المستعملة :

الجدول (II-1) - الأدوات المستعملة.

الأدوات
مخبر مدرج سعته (1000+500+100) مل
بيشر سعته 500 مل
قارورة 1000مل
محرار
محرك مغناطيسي
زجاجة ساعة
اجاصة ماصة
ملعقة معدنية
قارورة ماء مقطر
ورق ترشيح 7um
قمع بوخنر
حوجلة بوخنر

الجدول (II-2) - المواد الكيميائية المستعملة.

المادة	النقاوة (%)	الكتلة المولية (غ/مول)
هيدروكسيد البوتاسيوم	86,1	56.11
ماء مقطر	99,9	18.02
كاشف الحديد (Ferrover) 10مل	/	350.4
بيروكسيد الهيدروجين	3	34.01
هيدروكسيد الكالسيوم	97	74.09

الجدول (II-3): الأجهزة المستعملة.

الجهاز
جهاز قياس الطيف الضوئي (DR 6000)
جهاز الرج المغناطيسي
ميزان إلكتروني حساس
جهاز قياس الأس الهيدروجيني

II-5. طريقة العمل

تم إجراء الاختبارات العملية لهذا العمل على مستوى المخبر في قسم مراقبة سوناطراك حاسي مسعود.

II-5-1. المبدأ والبروتوكول التجريبي لقياس تركيز شوارد الحديد في المياه البترولية

الموجهة لإعادة الحقن.

يُعدّ حساب تركيز الحديد في مياه البترول المُخصصة لإعادة الحقن أمراً بالغ الأهمية لتقييم مخاطر تلف الطبقات في ابار البترولية والحدّ منها. إذ يمكن لمياه الإنتاج المستخدمة لإعادة الحقن أن تحمل حديدًا ذائبًا ناتجًا عن تآكل خطوط الأنابيب، والذي يترسب في ظروف البئر، ويسد مسامه، ويقلل من قابلية الحقن، مما يؤدي إلى انخفاض معدلات الحقن وتراجع كفاءة الإزاحة.¹

- أخذ العينات:

قمنا بأخذ العينات من مخرج الوحدة (أنظر الشكل (II-03))، لمدة ستة أيام على التوالي وقياس لدرجة الحرارة في الموقع، مع مراعاة شطف نقطة أخذ العينات لمدة دقيقة واحدة تقريبًا قبل أخذ العينة الأولى لضمان أنها تمثل بدقة المياه المنتجة ووضع ملصق على القارورة يوضح الوقت والتاريخ و مكان أخذ العينة.

¹ A review on oilfield produced water and its treatment technologies, petroleum research [Volume 9, Issue 4](#), December 2024.



الشكل (II-08): أخذ العينة مع قياس درجة الحرارة.

- قياس الـpH:

- ❖ قمنا بغسل الإلكترود بالماء المقطر جيدا ثم تجفيفه بورق ماص.
- ❖ وضع العينة داخل بيشر.
- ❖ وضع لإلكترود pH داخل العينة.
- ❖ بعد ثبات القيمة نقرأ النتيجة على شاشة الجهاز.

- قياس تركيز شوارد الحديد في المياه:

يتم قياس تركيز شوارد الحديد باستخدام جهاز قياس الطيف الضوئي (Spectrophotomètre DR6000) و هو جهاز يقيس كمية الضوء التي يمتصها الماء عند مروره عبره. بعد إضافة الكواشف الكيميائية إلى عينة الماء، تتفاعل هذه الكواشف مع المواد المراد تحليلها لتكوين مركب ملون. ثم يستخدم جهاز قياس الطيف الضوئي معايرات داخلية لمطابقة هذا اللون مع تركيز المادة المراد قياسها.

يُعدّ قياس الطيف الضوئي من أكثر الطرق شيوعاً وفائدةً للتحليل الكمي للعديد من خصائص الماء في مختلف التطبيقات الصناعية.²

1. اختر برنامج التحليل.

2. املاً أنبوب اختبار مربع الشكل بالعينة (العينة المرجعية) حتى علامة 10 مل.

² <https://fr.hach.com/portable-lab-spectrophotometersit>. It was seen on Monday, april20, 2026 at 15:00.

3. امسح السطح الخارجي للعينة المرجعية وضعها في حجرة أنابيب الاختبار. غطّ أنبوب الاختبار بغطاء الجهاز.
4. نضع الجهاز عند الصفر. ستظهر القيمة 0.00 ملغ/ل على الشاشة. أزل العينة المرجعية.
5. انقل 10 مل من العينة إلى أنبوب اختبار آخر (أنبوب اختبار العينة).
6. انقل محتويات كيس واحد من كاشف الحديد (FerroVer) إلى أنبوب اختبار العينة. رجّ الأنبوب جيّدًا سيظهر لون برتقالي في وجود الحديد.
7. امسح السطح الخارجي لأنبوب الاختبار الذي يحتوي على العينة المُحضّرة، ثم ضعه في حجرة أنابيب الاختبار. غطّ أنبوب الاختبار بغطاء الجهاز.
8. اترك العينة المُحضّرة لمدة 3 دقائق. (اضغط على أيقونة المؤقت).
9. ستظهر كلمة "قياس" (اضغط على "قياس") على الشاشة: النتائج بوحدة ملغ/ل.



الشكل (II-09): قياس تركيز شوارد الحديد باستخدام جهاز الطيف الضوئي.

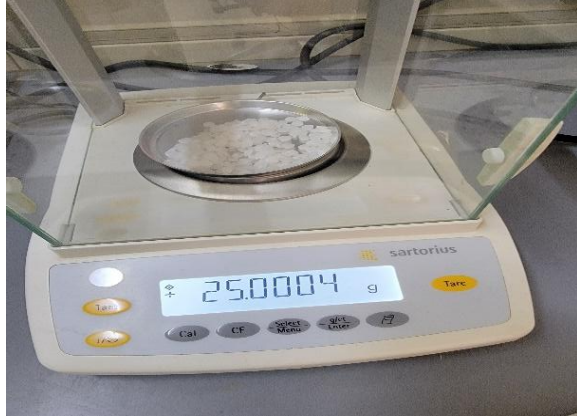
II-5-2. المبدأ والبروتوكول التجريبي المعتمد لإزالة شوارد الحديد من المياه البترولية الموجهة لإعادة الحقن.

II-5-2-1. تحضير المحاليل

تحضير محلول هيدروكسيد البوتاسيوم KOH بتركيز مختلفة:

نقوم بتحضير خمسة محاليل بتركيز مختلفة (5% , 10% , 15% , 20% , 25%) , بحجم 100مل لكل محلول.

- ❖ قمنا بوضع زجاجة ساعة وهي فارغة ونضع الميزان عند نقطة الصفر .
- ❖ وضع كمية من مسحوق هيدروكسيد البوتاسيوم.
- ❖ قراءة وزن العينة في كل مرة 5 غ، 10، غ، 15، غ، 20، غ، 25، غ.
- ❖ نضع 100مل من الماء المقطر .
- ❖ نضيف المسحوق الموزون في بيشر مع التحريك الجيد لإذابة المسحوق في الماء.



الشكل (II-10): تحضير محلول هيدروكسيد البوتاسيوم.

الجدول (II-4): بعض الخصائص الكيميائية لهيدروكسيد البوتاسيوم.

الشوائب (ملغ/ل)					النقاوة (%)	المرجع	المنف
Cl	Pb	Cu	Al	Fe			
5	5	2	5	1	86,1	26668,296	PROLABO

تحضير محلول هيدروكسيد الكالسيوم Ca(OH)_2 (10%)

نقوم بتحضير محلول هيدروكسيد الكالسيوم بتركيز 10% بحجم 1 ل .

- ❖ قمنا بوضع زجاجة ساعة فارغة على الميزان ونضبطه عند نقطة الصفر .
- ❖ نضع كمية من مسحوق هيدروكسيد الكالسيوم.
- ❖ قراءة وزن العينة 100 غ.

- ❖ نضع 800 مل من الماء المقطر في بيشر.
 - ❖ نضيف له المسحوق الموزون تدريجيا مع التحريك الجيد بواسطة جهاز الرج المغناطيسي لإذابة المسحوق في الماء .
 - ❖ ثم نضيف 200 مل من الماء المقطر.
 - ❖ نقوم بعملية الرج السريع لمدة 30 دقيقة بسرعة 1200 (دورة/دقيقة)
 - ❖ نقوم بتخفيض سرعة الرج إلى 200 (دورة/دقيقة) لمدة 60 دقيقة وهذا لترك مجال أكبر من الذوبان الجيد للجير وانحلاله في الماء.
- الجدول (II-5): بعض الخصائص الكيميائية هيدروكسيد الكالسيوم المستعمل.

الشوائب (%)				النقاوة (%)	المرجع	اسم الشركة
SO ₄	Cl	Pb	Fe			
0.05	0.02	0,005	0,1	97	12038	Riedel-de Haen



الشكل (II-11): تحضير محلول هيدروكسيد الكالسيوم.

II - 5-2-2. طريقة الأكسدة المتقدمة لفتون:

- ❖ نأتي بستة بيشر سعة 500 مل.
- ❖ نضع في كل بيشر حجم 500 مل من عينة الماء.
- ❖ نضيف حجم من بيروكسيد الهيدروجين بتركيز 10% لكل بيشر.
- ❖ ثم نقيس الـ pH ونسجل قيمته.

❖ نقوم بإضافة حجم من محلول هيدروكسيد البوتاسيوم بتركيز 5% في البيشر الأول ونقوم بعملية الرج، ثم نقيس الأس الهيدروجيني في كل مرة نضيف فيها حجم معين من محلول هيدروكسيد البوتاسيوم حتى نصل الى محلول قاعدي $pH=8$.

❖ نعيد نفس الخطوات في جميع البيشر مع مختلف التراكيز 10%، 20%، 15%، 25% .

❖ في البيشر السادس نضع حجم من محلول هيدروكسيد الكالسيوم بتركيز 10% الذي يخضع لنفس الخطوات السابقة.

❖ نترك العينات لمدة 4 ساعات لترسب شوارد الحديد ثم نقوم بعملية الترشيح .

❖ نقيس تركيز شوارد الحديد للعينات بجهاز الطيف الضوئي .

حسب ستيم (Stumm) و لي (Lee) (1961)، فإن حركية أكسدة الحديد بالأكسجين تكون حسب الأس الهيدروجيني، فمن أجل الوصول لسرعة تفاعل مقبولة يجب أن لا يقل الأس الهيدروجيني عن 7، فمثال ذلك أن أكسدة الحديد بالأكسجين عند الأس الهيدروجيني 7,25 تكون أكبر 4 مرات منه عند 6,5³.



الشكل (II-12): عينة المياه الموجهة لإعادة الحقن.

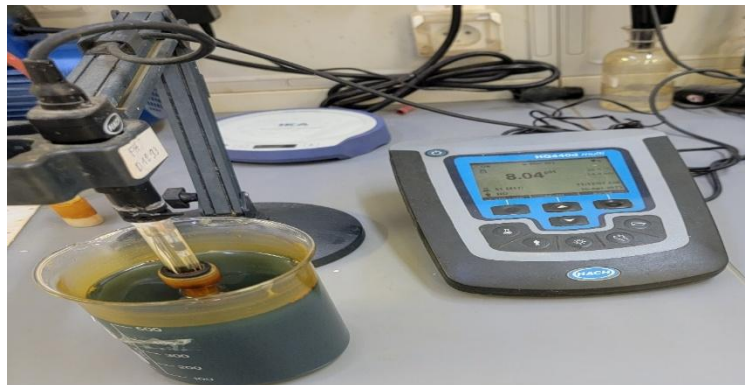
³ Raymond Desjardins. Le Traitement Des Eaux .2e Edition Revue Et Améliorée. P206



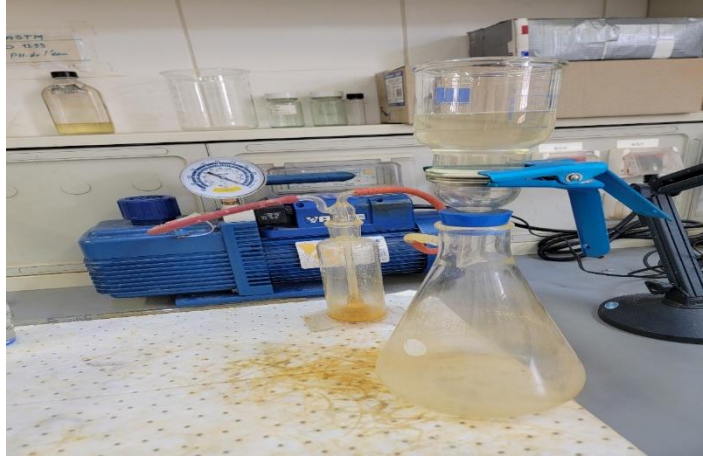
الشكل (II-13): العينة بعد إضافة بيروكسيد الهيدروجين (10%).



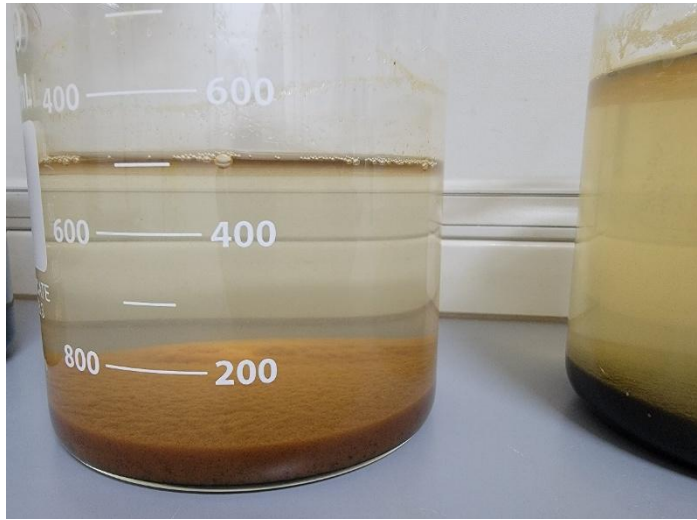
الشكل (II-14): رج العينة بعد إضافة هيدروكسيد البوتاسيوم.



الشكل (II-15): قياس الـ pH للعينة.



الشكل (16-11): ترشيح العينة.



الشكل (17-11): العينة بعد الترسيب.



الشكل (18-11): قياس تركيز شوارد الحديد في العينة بجهاز الطيف الضوئي.

الفصل الثالث

تحليل ومناقشة النتائج

تمهيد

يتناول هذا الفصل تحليل ومناقشة النتائج التجريبية المتعلقة بإزالة شوارد الحديد من المياه البترولية الموجهة لإعادة الحقن، بهدف تقييم فعالية عمليات الأكسدة المتقدمة المتبعة والى أي حد يصل تحقيقها للتركيز المطلوبة للحقن في البئر.

النتائج والمناقشة

1-III. قياس الـ pH وتركيز شوارد الحديد في عينات المياه البترولية.

يلخص الجدول التالي نتائج قياس تركيز شوارد الحديد والـ pH لعينات المياه البترولية على مدى خمسة أيام. الجدول (1-III): قيمة الـ pH وتركيز شوارد الحديد لعينات المياه البترولية.

التاريخ	العينة	الوقت	درجة الحرارة (م °)	pH	تركيز شوارد الحديد (ملغ/ل)
2026/04/09	الأولى	12 :00	56	5.75	480
2026/04/10	الثانية	09 :00	55	5.57	410
2026/04/11	الثالثة	09 :00	54	5.48	450
2026/04/12	الرابعة	08 :00	47	5.79	485
2026/04/13	الخامسة	08 :00	40	5.81	535

مناقشة النتائج :

بعد قياس الـ pH للعينة لمدة خمسة أيام لاحظنا أن العينة تتميز بطبيعة حامضية وتركيز حديد عال يفوق قيم المعايير الدولية و الوطنية المسموح بها للمياه الموجهة للحقن.

- حساب حجم بيروكسيد الهيدروجين اللازم إضافته لأكسدة 500مل من العينة:

1. تحديد كتلة الحديد الكلية في العينة (500مل):

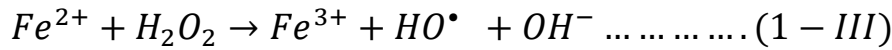
- تركيز الحديد = 480 ملغ/ل
- حجم العينة 500 مل = 0.5 ل
- كتلة الحديد = تركيز الحديد × حجم العينة = 0.5 × 480 = 240 ملغ = 0.24 غ

2. حساب عدد مولات الحديد:

لدينا الكتلة المولية للحديد = 55.85 غ/مول.

$$\text{عدد المولات} = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الكتلة المولية الجزيئية}} = \frac{0.24}{55.85} = 0.0043 \text{ مول}$$

3. كتابة معادلة التفاعل وتحديد النسبة المولية:



من المعادلة نجد ان واحد مول من بيروكسيد الهيدروجين يؤكسد 1 مول من الحديد الثنائي اذن عدد المولات المطلوبة هو:

$$\text{عدد مولات بيروكسيد الهيدروجين} = \frac{\text{عدد مولات الحديد}}{1} = \frac{0.0043}{1} = 0.0043 \text{ مول}$$

4. حساب كتلة بيروكسيد الهيدروجين:

الكتلة المولية الجزيئية لبيروكسيد الهيدروجين = 34.01 غ/مول.

كتلة بيروكسيد الهيدروجين = عدد المولات × الكتلة المولية الجزيئية

$$= 0.0043 \times 34.01 = 0.146243 \text{ غ}$$

5. حساب حجم المحلول بتركيز 10%:

بما أن المحلول 10% أي 10 غ من بيروكسيد الهيدروجين في كل 100 مل من المحلول.

$$\text{الحجم} = \frac{\text{الكتلة}}{\text{التركيز الكتلتي}} = \frac{0.146243}{0.1} = 1.46243 \text{ مل} \approx 1.5 \text{ مل}$$

2-III . تأثير بيروكسيد الهيدروجين على قيمة الـ pH

الجدول (2-III): تأثير بيروكسيد الهيدروجين على قيمة الـ pH.

العينة	الأولى	الثانية	الثالثة	الرابعة	الخامسة
حجم بيروكسيد الهيدروجين (H ₂ O ₂) (مل)	3	3	3	3	3
pH	2.59	2.37	2.49	2.30	2.42

مناقشة النتائج:

نلاحظ أن بيروكسيد الهيدروجين يؤثر على قيمة الـ pH حيث يؤدي الى انخفاضه لأن بيروكسيد الهيدروجين

حمض ضعيف يتفكك جزئيا في الماء الى أيون الهيدروجين H⁺ و أيون الهيدروبيروكسيد HO₂⁻ .

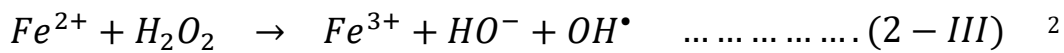


¹ <https://prezi.com/p/hqwegm0snxbe/exploring-hydrogen-peroxides-chemical-properties/>, Vu le 20 avril 2026 à 14 :00.

هذا التفكك يجعل العينة حمضية، و من جهة أخرى المياه البترولية تحتوي على مركبات عضوية معقدة (مثل الهيدروكربونات، الفينولات، الكبريتيدات و المركبات العطرية) خاصة مع الضوء أو محفزات مثل الحديد في عمليات photo-oxydation يولد جذور هيدروكسيل (OH^\bullet) التي تؤكسد هاته المركبات الى أحماض عضوية.

الاستنتاج:

أثبتت النتائج أن إضافة بيروكسيد الهيدروجين تؤدي إلى انخفاض قيمة الـ pH، وهذا الانخفاض ليس مجرد تغير في الحموضة بل دليل على حدوث عملية أكسدة كيميائية فعالة، حيث يتم تحويل الحديد من حالته الذائبة (Fe^{2+}) إلى الحالة القابلة للتسيب (Fe^{3+}) كما هو موضح في المعادلة التالية.



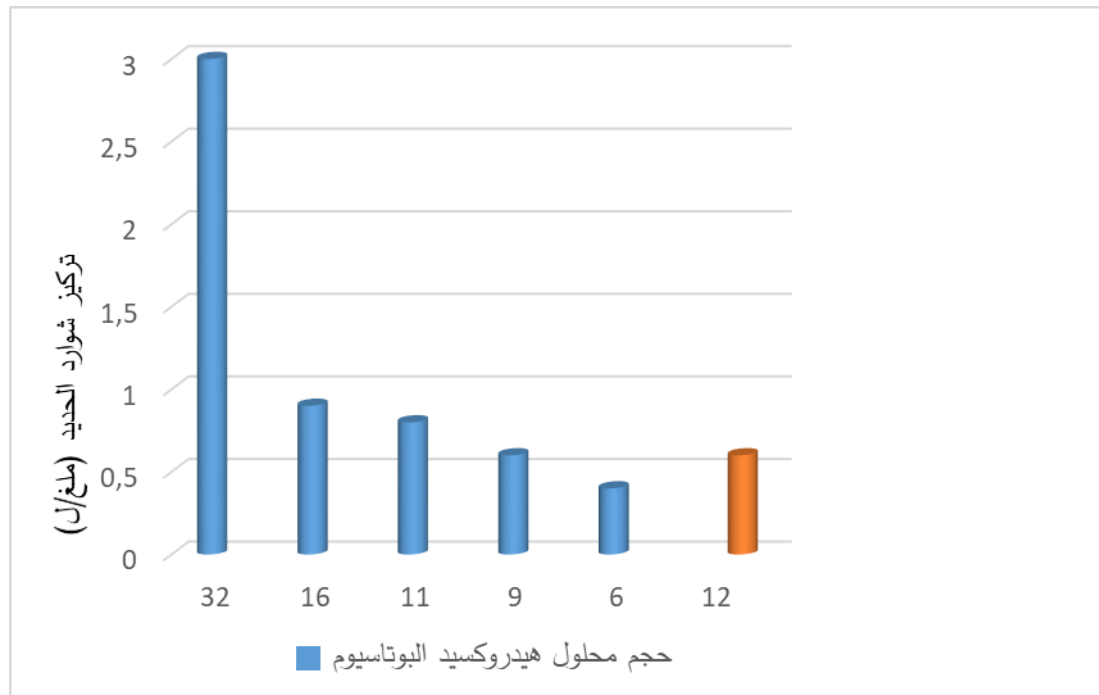
3-III. تأثير تركيز محلول هيدروكسيد البوتاسيوم و هيدروكسيد الكالسيوم على خفض تركيز الحديد.

الجدول التالي يلخص نتائج تأثير تركيز محلول هيدروكسيد البوتاسيوم و محلول هيدروكسيد الكالسيوم على خفض تركيز الحديد في عينات المياه الموجهة لإعادة الحقن في الابار البترولية. و قد تم اختيار نتائج اليوم الرابع نظرا لتقارب النتائج في سائر الأيام الأخرى .

الجدول (III-3): تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيزشوارد الحديد للعينة الرابعة.

المحلول المستعمل	محلول هيدروكسيد البوتاسيوم KOH					محلول هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$
التركيز (%)	25	20	15	10	5	10
العينة	الرابعة					
حجم المحلول (مل)	6	9	11	16	32	12
$[Fe^{3+}]$ (ملغ/ل)	0.4	0.6	0.8	0.9	3	0.6
المردود (%)	99.91	99.87	99.83	99.81	99.38	99.87

² Trapido, M. & Goi, A. Degradation of nitrophenols with the Fenton reagent. Proc. Estonian Acad. Sci. Chem, 1999, 48,4, 163–173 page 164.



الشكل (III-1): تأثير حجم محلول هيدروكسيد البوتاسيوم على خفض تركيز شوارد الحديد.

مناقشة النتائج:

من خلال الجدول (III-3) والشكل (III-1) نلاحظ أنه كلما زاد تركيز المحلول المستعمل (من 5% إلى 25%) تناقص حجم المحلول بشكل ملحوظ (من 32 مل إلى 6 مل)، حيث يؤدي زيادة التركيز إلى انخفاض كمية تركيز الحديد المتبقي في العينة (من 3 ملغ/ل عند تركيز 5% إلى 0.4 ملغ/ل عند 25%) وتتحسن نسبة المردود لتصل إلى أقصى قيمة لها وهي 99.91% عند التركيز 25%.

عند استخدام تركيز 10% نلاحظ أن محلول هيدروكسيد الكالسيوم استهلك حجم أقل مقارنة بمحلول هيدروكسيد البوتاسيوم حيث أعطى نتيجة أفضل على خفض تركيز الحديد في العينة، حيث انخفض تركيز الحديد المتبقي إلى 0.6 ملغ/ل وهي نسبة أقل مما حققه هيدروكسيد البوتاسيوم (0.9 ملغ/ل)، كما أنه أعطى مردود أعلى بنسبة 99.87%.

الجدول (III-4): تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينة الأولى.

محلول هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$	محلول هيدروكسيد البوتاسيوم KOH					المحلول المستعمل
10	25	20	15	10	5	التركيبة (%)
الأولى						العينة
37	6	7	12	14	19	حجم المحلول (مل)
8.95	7.60	7.76	8.91	7.61	7.55	pH
0	48.2	49.6	2	53.6	80	$[Fe^{3+}]$ (ملغ/ل)

الجدول (III-5): تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينة الثانية.

محلول هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$	محلول هيدروكسيد البوتاسيوم KOH					المحلول المستعمل
10	25	20	15	10	5	التركيبة (%)
الثانية						العينة
10	6	7	16	14	30	حجم المحلول (مل)
7.57	7.64	7.28	9.31	8.04	8.04	pH
10.5	16.6	20.6	0.2	1.5	4.6	$[Fe^{3+}]$ (ملغ/ل)

الجدول (III-6): تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينة الثالثة.

محلول هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$	محلول هيدروكسيد البوتاسيوم KOH					المحلول المستعمل
10	25	20	15	10	5	التركيبة (%)
الثالثة						العينة
14	5	9	12	15	32	حجم المحلول (مل)
8.20	7.97	7.95	8.00	8.12	8.09	pH
0.4	0.63	0.75	0.7	0.6	2	$[Fe^{3+}]$ (ملغ/ل)

الجدول (III-7): تأثير تركيز محلول الـ KOH و $Ca(OH)_2$ على خفض تركيز شوارد الحديد للعينه الخامسة.

المحلول المستعمل	محلول هيدروكسيد البوتاسيوم KOH					محلول هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$
التركيز (%)	25	20	15	10	5	10
العينه	الخامسة					
حجم المحلول (مل)	6	9	11	16	32	12
pH	8	8.00	8.06	8.04	8.12	8.05
$[Fe^{3+}]$ (ملغ/ل)	0.3	0.43	0.8	0.9	2.5	0.66

الاستنتاج:

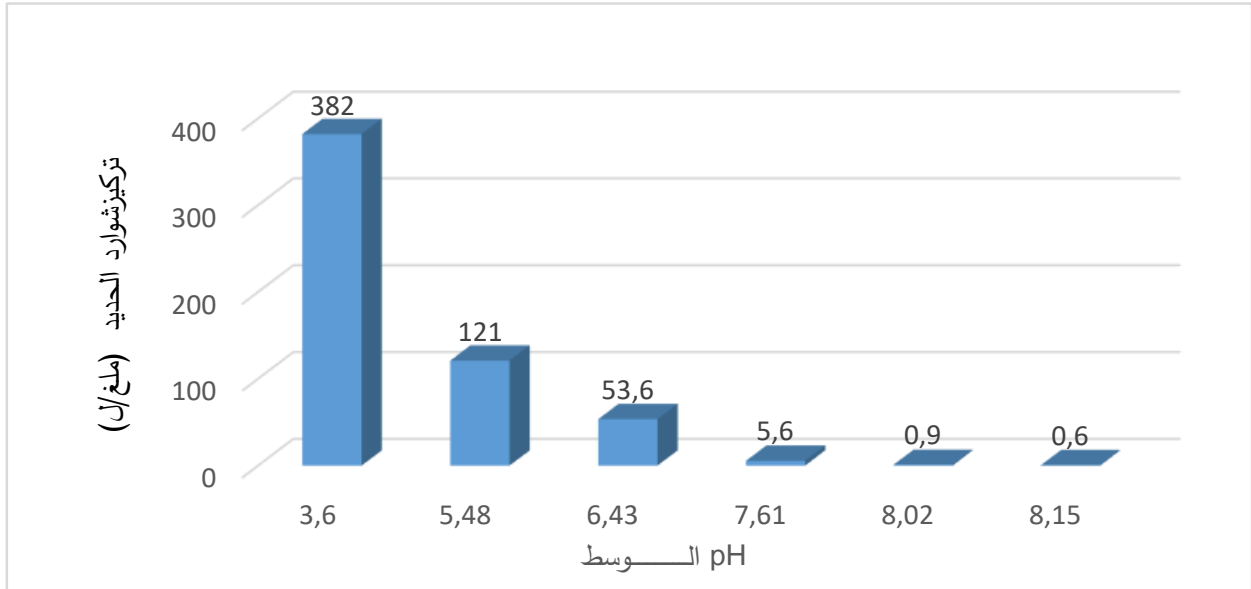
يعتبر هيدروكسيد الكالسيوم أكثر كفاءة واقتصادا في الحجم المستخدم مقارنة بهيدروكسيد البوتاسيوم في عملية خفض تركيز شوارد الحديد.

III-4. تأثير طبيعة الوسط (حامضي-قاعدي) على خفض تركيز الحديد.

من أجل دراسة تأثير pH الوسط على مردود خفض شوارد الحديد، قمنا بتحضير (06) عينات ذات pH مختلف (3.6، 5.48، 6.43، 7.61، 8.02، 8.15) وجرى تحضير هذه الأوساط المختلفة عن طريق إضافة قاعدة هيدروكسيد البوتاسيوم KOH، وهذا من أجل إيجاد الوسط المثالي لإعطاء أكبر مردود للتفاعل. النتائج المتحصل عليها ملخصة في الجدول التالي.

الجدول (III-8): نتائج تأثير pH الوسط على خفض تركيز شوارد الحديد.

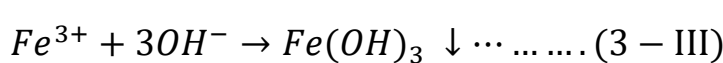
المحلول المستعمل	محلول هيدروكسيد البوتاسيوم KOH					محلول هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$
التركيز (%)	10	10	10	10	10	10
العينه	الرابعة					
PH	3.6	5.48	6.43	7.61	8.02	8.06
$[Fe^{3+}]$ (ملغ/ل)	382	121	53.6	5.6	0.9	0.6
المردود (%)	28.59	77.38	89.98	98.95	99.83	99.88



الشكل (III-2): تأثير pH الوسط على خفض تركيز شوارد الحديد.

مناقشة النتائج:

من خلال الجدول (III-8) والشكل (III-2)، نلاحظ أنه عند قيم الـ pH للوسط منخفض يكون تركيز الحديد في العينة عالي جدا ومنه نقص مردود التفاعل كما هو موضح في العينة الأولى والثانية، كما نلاحظ انخفاض قيم تركيز الحديد (5.6 ملغ/ل و 0.9 ملغ/ل و 0.6 ملغ/ل) كلما زادت قيمة الأس الهيدروجيني بسبب اتحاد ايونات الحديد مع أيونات الهيدروكسيل (OH^-) الناتجة عن محلول (بيروكسيد الهيدروجين أو هيدروكسيد الكالسيوم)، مما يؤدي الى تشكل هيدروكسيد الحديد $Fe(OH)_3$ وهو مركب صلب يترسب في قاع المحلول حسب المعادلة التالية.



الاستنتاج:

نستنتج أن الوسط القاعدي هو الوسط الأمثل لترسيب شوارد الحديد في المياه عن طريق تحويلها إلى رواسب صلبة يمكن فصلها بسهولة.

5-III. نتائج تحاليل المياه قبل و بعد المعالجة :

تلخص الجداول أدناه نتائج تحليل المياه البترولية عند مدخل ومخرج محطة معالجة المياه البترولية، بالإضافة إلى كفاءة المعالجة لكل معيار تم تحليله.

³ <https://fr.scribd.com/document/685635748/cors7> , IDENTIFICATION DES IONS DANS LES SOLUTION AQUEUSE, Mohamed LAHLALI , Vu le 24 avril 2026 à 15h30.

الجدول (III-9): نتائج تحاليل المياه البترولية عند مدخل وحدة معالجة المياه.

التاريخ	الوقت	درجة الحرارة (م°)	pH	[TPH] (ملغ/ل)
2025 /11 /01	10:05	50	5.72	32.80
	15 :10	48	5.68	30.70
2025 /11 /02	09 :20	44	5.64	50.50
	16 :20	48	5.67	56.40
2025 /11/03	08 :40	46	5.69	34.00
	15 :05	49	5.63	48,70
2025/11/04	09 :25	48	5.61	45.50
	18 :20	47	5.81	76.20

مناقشة النتائج:

من خلال الجدول (III-9) نلاحظ أن المياه البترولية الداخلة إلى محطة المعالجة تتميز بدرجة حموضة منخفضة قليلاً، ومستوى عالٍ من الهيدروكربونات البترولية الكلية (TPH).
بمقارنة النتائج المُحصَل عليها مع معايير الجودة المطلوبة للمياه المُعالَجة (الجدول (I-7)) نجد أن المعايير التي تم قياسها و تحليلها، باستثناء درجة الحرارة، تتجاوز المعايير المُحدَّدة، مما يُشير إلى تلوث المياه وعدم قابليتها لإعادة الحقن.

الجدول (III-10): نتائج تحاليل المياه البترولية عند مخرج وحدة معالجة المياه.

التاريخ	التوقيت	درجة الحرارة (°م)	pH	[TPH] (ملغ/ل)	مردود (TPH) (%)	[TSS] (ملغ/ل)
11/01/2025	10:00	50	5.72	4.40	86.58	13.00
	15 :05	48	5.68	3.20	89.57	12.00
11/02/2025	09 :15	44	5.64	1.10	97.82	10.50
	16 :15	48	5.67	1.90	96.63	12.00
11/03/2025	08 :35	46	5.69	1.80	94.70	13.20
	15 :00	49	5.63	1.50	96.91	7.00
11/04/2025	09 :20	48	5.61	2.50	94.51	14.80
	18 :15	47	5.81	1.60	97.90	19.00

مناقشة النتائج:

نلاحظ أن المياه البترولية الخارجة من محطة المعالجة تتميز بدرجة حموضة منخفضة قليلاً، ومستوى منخفض من المواد الصلبة العالقة (TSS) والهيدروكربونات (TPH). وتُظهر مقارنة النتائج المُحصَّل عليها مع معايير الجودة المطلوبة للمياه المُعالَجة (الجدول (I-7)) أن المعايير التي تم تحليلها، باستثناء درجة الحرارة، تتوافق مع المعايير المُحدَّدة، مما يُشير إلى أن وحدة معالجة المياه البترولية ذات كفاءة عالية في إزالة الهيدروكربونات و المواد الصلبة العالقة بعكس تركيز شوارد الحديد الذي بلغ ذروته عند مخرج الوحدة (انظر الجدول (III-1)).

الجدول (III-11): نتائج تحاليل المياه البترولية عند مخرج وحدة معالجة.

مناقشة النتائج:

التاريخ	الوقت	درجة الحرارة (م°)	pH	[TSS] (ملغ/ل)
2026/04/06	08 :30	45	5.63	1.30
	13 :00	51	5.60	0.80
2026/04/07	08 :00	50	5.63	1.10
	12 :00	52	5.61	1.50
2026/04/08	08 :00	46	5.60	1.10
	12 :00	50	5.68	0.90
2026/04/09	08 :00	48	5.63	0.70
	12 :00	56	5.75	0.70
2026/04/10	09 :00	55	5.57	1.50
	12 :30	56	5.60	2.00
2026/04/11	09 :00	54	5.48	1.70
	12 :00	55	5.61	0.60
2026/04/12	08 :00	47	5.79	1.70
	12 :30	53	5.91	1.40
2026/04/13	07 :55	40	5.81	2.20
	12 :00	47	5.91	1.50

يلخص الجدول (III-11) نتائج تحاليل المياه الموجهة للحقن في الابار البترولية عند مخرج وحدة معالجة المياه البترولية لشهر أبريل 2026 و الذي يؤكد صحة النتائج السابقة لشهر نوفمبر 2025 حيث تبين أن كفاءة وحدة المعالجة في خفض تركيز المواد الصلبة العالقة (TSS) و الهيدروكربونات (TPH) يتوافق مع معايير مياه اعادة الحقن.

الاستنتاج:

نستنتج أن وحدة معالجة المياه البترولية ذات كفاءة عالية في خفض تركيز المواد الصلبة العالقة و الهيدروكربونات بما يتماشى مع المعايير الوطنية لمياه اعادة الحقن في الابار البترولية الا أنها لم تنجح في خفض تركيز شوارد الحديد .

الخلاصة العامة

الخلاصة العامة

تحتوي المياه البترولية المعالجة على شوارد الحديد بتركيز عالية جداً، الذي يُسبب انسداد الآبار البترولية وتآكل المعدات وتدهور خصائص الإنتاج، ومن هنا نتطرق لطرح الإشكالية التالية: كيف يمكن تحسين معالجة الحديد في المياه البترولية الموجهة لإعادة الحقن من أجل ضمان مطابقتها لشروط إعادة الحقن، مع الحد من الآثار البيئية والتقنية المرافقة؟

من خلال النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة أثبتت عملية الأكسدة المتقدمة بفتون فعاليتها العالية كحل مناسب حيث ساهمت في أكسدة شوارد الحديد باستخدام بيروكسيد الهيدروجين لتحويل الحديد الثنائي إلى ثلاثي، مما سهل ترسيبه وإزالته بكفاءة تصل إلى نسب عالية. كما أكدت النتائج التجريبية أهمية الاس الهيدروجيني في عملية الإزالة بينما فشلت الأوساط الحمضية في إزالة أكثر من 28% من الحديد، أدت زيادة القلوية إلى قيمة تتجاوز 8 إلى رفع كفاءة الإزالة بشكل أفضل، ولقد أظهرت النتائج تقارباً كبيراً بين كفاءة كل من هيدروكسيد البوتاسيوم وهيدروكسيد الكالسيوم. ومع ذلك يبرز هيدروكسيد الكالسيوم كخيار مثالي نظراً لقدرته على تحقيق مردودية عالية وتركيز متوسط، مما يجعله أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية في التطبيقات الصناعية الكبرى.

لقد حققت العملية المقترحة في خفض تراكيز الحديد من مستويات مرتفعة جداً (تتجاوز 500 ملغ/ل) إلى مستويات ضئيلة جداً (0.6 ملغ/ل)، وهي قيم تتماشى مع المعايير المطلوبة لإعادة حقن المياه في البئر أو تصريفها الآمن.

وتؤكد هذه الدراسة على أهمية تبني تقنيات الأكسدة المتقدمة في معالجة المياه البترولية، ليس فقط لضمان مطابقة المياه لشروط إعادة الحقن، بل أيضاً للحد من الآثار البيئية السلبية المرتبطة بتصريف هاته المياه أو إعادة استخدامها. ومع ذلك، فإن مواجهة تحديات مثل تكلفة المواد تتطلب مزيداً من البحوث والتطبيقات على المياه في الحقول البترولية، وتطوير أنظمة معالجة متكاملة بين فنتون والطرق الفيزيائية والغشائية.

وأخيراً يوصى بتعزيز التعاون بين الجامعات وشركات النفط لتطبيق هاته التقنيات على نطاق واسع، مما يساهم في تحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية في قطاع الطاقة، ويفتح آفاقاً جديدة للبحث في مجال معالجة الملوثات في المياه الصناعية.

الملحق



كاشف قياس الأوكسجين المذاب



قياس الـ pH



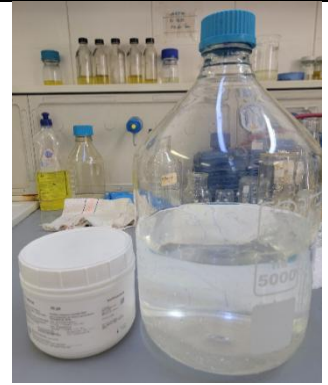
جهاز قياس الطيف الضوئي (DR6000)



جهاز قياس الطلب الكيميائي للأوكسجين



غذاء البكتيريا



تحضير عينة الـ BDO₅



عينة المياه الموجهة لإعادة الحقن بعد الترسيب

المخلص:

تهدف هذه الدراسة الى المساهمة في تحسين جودة المياه الموجهة لإعادة الحقن من خلال إزالة الحديد باستخدام عملية الأكسدة المتقدمة لفنتون. يعد الحديد من أبرز العناصر التي تسبب مشاكل في عمليات إعادة الحقن في الحقول البترولية، مما يستدعي ضرورة معالجته بطرق فعالة وصديقة للبيئة.

وقد تم في هذا العمل اجراء تجارب مخبرية لتقييم كفاءة عملية فنتون في أكسدة وإزالة الحديد من المياه. أظهرت النتائج أن طريقة الأكسدة المتقدمة لفنتون كانت فعالة جدا في إزالة الحديد، حيث حققت نسب إزالة مرتفعة تصل الى 99.91% في ظروف عملية محددة من وسط خاص للتفاعل (pH + محلول قاعدي).

كما تمت مقارنة فعالية مادتين قاعدتين في مرحلة ترسيب شوارد الحديد بعد عملية الأكسدة، وهما هيدروكسيد الكالسيوم وهيدروكسيد البوتاسيوم. أعطى كلا المحلولين نتائج ممتازة في ترسيب الحديد، حيث وصلت كفاءة محلول هيدروكسيد البوتاسيوم (تركيز 10%) الى 99.81% باستعمال حجم 16 مل من المحلول لعينة 500 مل من المياه البترولية، الا أن هيدروكسيد الكالسيوم (تركيز 10%) تفوق قليلا من حيث كفاءة الترسيب بنسبة 99.87% واستهلاك المحلول بحجم يصل الى 12 مل لنفس العينة من المياه البترولية، مما يجعله الخيار الأمثل اقتصاديا وتقنيا.

تبرز هذه النتائج أهمية استخدام تقنيات الأكسدة المتقدمة في معالجة المياه الصناعية، وتوفر حولا عملية وفعالة لتحسين جودة المياه المعاد حقنها، مما يساهم في الحفاظ على سلامة الخزانات البترولية ومنه زيادة الانتاج وحماية البيئة. الكلمات المفتاحية: معالجة المياه البترولية ، الأكسدة المتقدمة لفنتون، ترسيب الحديد، شوارد الحديد، إعادة الحقن.

Abstract:

This study aims to contribute to improving the quality of water intended for reinjection by removing iron using the Fenton Advanced Oxidation Process (FAOP). Iron is one of the most significant elements causing problems in oilfield reinjection operations, necessitating its treatment using efficient and environmentally friendly methods.

In this work, laboratory experiments were conducted to evaluate the efficiency of the Fenton process in oxidizing and removing iron from water. The results showed that the FAOP was highly effective in removing iron, achieving high removal rates of up to 99.91% under specific operating conditions in a special reaction medium (pH + alkaline solution).

The effectiveness of two bases in the precipitation stage of iron ions after the oxidation process was also compared: calcium hydroxide and potassium hydroxide. Both solutions yielded excellent results in iron precipitation. The potassium hydroxide (10%) solution achieved a precipitation efficiency of 99.81% using 16 ml of solution per 500 ml sample of petroleum water. However, the calcium hydroxide (10%) solution slightly surpassed it in terms of precipitation efficiency, reaching 99.87%, with a solution consumption of 12 ml per sample of petroleum water. This makes it the more economically and technically advantageous option. These results highlight the importance of using advanced oxidation techniques in industrial wastewater treatment and provide practical and effective solutions for improving the quality of reinjected water. This contributes to maintaining the integrity of petroleum reservoirs, thereby increasing production and protecting the environment.

Keywords: Petroleum water treatment, Fenton advanced oxidation, iron precipitation, iron ions, reinjection.