



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي-
كلية العلوم الدقيقة
قسم الكيمياء



رقم الترتيب:.....

رقم التسلسل:.....

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة ماستر مهني في الكيمياء

مجال: علوم المادة

تخصص: كيمياء تحليلية

من اعداد الطالبتين:

مكي هاجر و ساعي ريان

تحت عنوان:

تحسين كفاءة الإمتزاز للجبس المعاد تدويره لإزالة صبغة أحمر الكونغو
من المياه الملوثة

نوقشت يوم: 2026/06/14

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيسا

أستاذ محاضر -ب-

مصباحي محمد عادل

مناقشا

أستاذ تعليم عالي

زبيدي عمار

مشرفا

أستاذ تعليم عالي

محبوب محمد الصادق

الموسم الجامعي: 2026/2025

أنجز هذا العمل في مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES)



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي
كلية العلوم الدقيقة
قسم الكيمياء



رقم الترتيب:.....

رقم التسلسل:.....

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة
ماستر مهني في الكيمياء

مجال: علوم المادة

تخصص: كيمياء تحليلية

من اعداد الطالبتين:

مكي هاجر و ساعي ريان

تحت عنوان:

تحسين كفاءة الإمتزاز للجبس المعاد تدويره لإزالة الأصباغ العضوية
من مياه الصرف الصحي

نوقشت يوم: 2026/06/13

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيسا

أستاذ محاضر -ب-

مصباحي محمد عادل

مناقشا

أستاذ تعليم عالي

زبيدي عمار

مشرفا

أستاذ تعليم عالي

محبوب محمد الصادق

الموسم الجامعي: 2026/2025

أنجز هذا العمل في مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اقْرَأْ بِاسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ

الشكر والعرفان

قال تعالى: ﴿وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللّٰهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ﴾ صدق الله العظيم.

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوفيقه تُنجز الأعمال وتُكَلَّل الجهود بالنجاح، والصلاة والسلام على سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

في ختام هذا العمل المتواضع، نتقدم بأسمى عبارات الشكر والعرفان والامتنان إلى أستاذنا المشرف الدكتور محمد الصادق محبوب، مدير مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES) بجامعة الوادي، على إشرافه المباشر على هذه المذكرة، وما قدمه لنا من توجيهات سديدة ونصائح قيّمة ومتابعة علمية دقيقة ومستمرة.

ولم يخل علينا بعلمه وخبرته، فكان سنداً علمياً حقيقياً لنا، حريصاً على توجيهنا في مختلف مراحل هذا البحث، وكان لحرصه ومتابعته الأثر الكبير في تطوير هذا العمل والارتقاء به إلى المستوى العلمي المطلوب.

جعل الله للخير نوراً، وللعلم ذخراً، وأنار بعلمه الدروب.

كما نتوجه بخالص الشكر والتقدير إلى السادة أعضاء لجنة المناقشة الموقرين:

الدكتور مصباحي محمد عادل، رئيساً للجنة المناقشة،
والدكتور زيدي عمار، مناقشاً،

على تفضلهما بقبول مناقشة هذا العمل، وما سيقدمانه من ملاحظات علمية قيّمة تثري هذه المذكرة وترفع من مستواها العلمي.

ولا يفوتنا أن نتقدم بجزيل الشكر والعرفان إلى مهندسي المخبر:

قده عثمان وعلي طليبة، على ما أبدياه من تعاون ومساعدة وتوجيهات عملية خلال فترة إنجاز هذا البحث، وكان لهما دور مهم في تسهيل مختلف المراحل التطبيقية للعمل.

وفي الختام، نسأل الله أن يجزي كل من ساهم من قريب أو بعيد خير الجزاء، وأن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم.

الأهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ﴾

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تتحقق الأمنيات، وبعونته تُدرك الغايات.

إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب، ومنحني من دعمه بلا حدود وعطائه بلا مقابل، إلى من علّمني أن الدنيا كهفاح، وأن سلاحها العلم والمعرفة، فكان لي النور الذي يضيء دربي، والسند الذي أستند إليه في شدّتي، والقوة التي أستمد منها عزيمتي، وملاذي بعد الله... إلى فخري واعتزازي... أبي الغالي .

إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها واحتضني قلبها قبل يدها وسهلت لي الشدائد بدعائها إلى القلب الحنون والشمعة التي كانت لي في الليالي المظلمات سر قوتي ونجاحي... أمي حبيبي .

إلى ضلعي الثابت وأمان أيامي، إلى من شددت عضدي بهم فكانوا خير سند وخير رفقة، إلى إخوتي الأعزاء:

حسن، حسين، عبد الرحمان، ومعاذ

وإلى صغيرتي ومدلتي، قرة عيني وهبة أيامي، أختي الغالية:

يسمينة

وإلى صديقة المشوار ورفيقة النجاح ريان، شكراً لصدق المودة، وجميل الصحبة، ولكل لحظة دعم وتقاسم للأمل والطموح، أسأل

الله أن يكتب لك من النجاح أضعاف ما تتمنين

إليكم جميعاً أهدي هذا الإنجاز المتواضع، ثمرة سنوات من الجد والاجتهاد، راجيةً من الله أن يجعل فيه الخير والبركة، وأن يديم عليكم نعمة الصحة والسعادة.

وأخيراً، أحمّد الله الذي أكرمني ببلوغ هذه اللحظة، فما كان هذا النجاح ليتحقق لولا فضله وتوفيقه، وأسأله سبحانه أن يجعل ما هو قادم أجمل وأعظم.

هاجر

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فرحين بما آتاهم الله من فضله

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات وبفضله تتحقق الأمنيات وبعونته تصل الخطى إلى غاياتها

له الشكر أولا واخرا

وبكل حب وفخر أهدي ثمرة نجاحي وتخرجي إلى نفسي الطموحة التي بدأت بلهفة . . . وإتتهت بنجاح

بكل فخر أهدي تخرجي وفرحتي التي انتظرتها طويلا إلى من كانوا مصدر الدعم والعطاء دائما . . .

إلى النور الذي أضاء دربي، إلى العزيز الذي حملت اسمه فخرا ، إلى معلمي الأول

الرجل الذي سعى طوال حياته لتكون الأفضل..... أبي الغالي

إلى من كانت الداعم الأول لتحقيق طموحي إلى من كانت ملجأ يدي اليمنى في هذه المرحلة . . .

إلى من أبصرت بها طريق حياتي واعتزازي بذاتي . . إلى القلب الحنون

إلى من كانت دعواتها تحيطني..... أُمي الحبيبة.

إلى من كانت محبتهم سنداً، ووجودهن مصدراً للطمأنينة، وإلى من شاركني

لحظات التعب قبل الفرح أخواتي الغاليات

هبة ، إسراء، تسنيم وماريا

إلى أخي الصغير، مدلل العائلة، وبهجة أيامنا، ونور عيوننا

محمد أصيل

إلى رفيقة المشوار هاجر صاحبة المواقف الصادقة، التي كان وجودها في حياتي

مصدرا للدعم والمساندة أدام الله محبتنا

هاريان

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية استغلال مخلفات ألواح الجبس المعاد تدويرها ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) كمادة مازة منخفضة التكلفة وصديقة للبيئة لإزالة صبغة أحمر الكونغو (CR) من المحاليل المائية. وقد تم توصيف الجبس باستعمال تقنيات انعراج الأشعة السينية (XRD)، ومطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، والمجهر الإلكتروني الماسح المقترن بالتحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة (SEM/EDX)، كما تم استعمال مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis) لتحديد تراكيز الصبغة قبل وبعد الامتزاز ومتابعة كفاءة الإزالة.

تمت دراسة تأثير بعض العوامل التشغيلية على كفاءة الامتزاز، والمتمثلة في التركيز الابتدائي للصبغة في 5، 10، 15، 20، 25 و 50 mg/L، وزمن التلامس (20-140 دقيقة)، والرقم الهيدروجيني للمحلول (5، 7، 9)، و أظهرت النتائج أن أفضل أداء للجبس تحقق عند pH=5 وتركيز ابتدائي قدره 20 mg/L، حيث بلغت كفاءة الإزالة حوالي 93%، مما يدل على القدرة العالية للجبس على إزالة الصبغة في الظروف المناسبة. كما بينت دراسة نقطة انعدام الشحنة السطحية أن قيمة pH_{PZC} للجبس بلغت 7.47، وهو ما ساهم في تفسير تأثير الرقم الهيدروجيني على سلوك الامتزاز وكفاءة إزالة الصبغة.

كما تم تحليل سلوك التوازن باستعمال نماذج لانغموير وفروندليش وسيبس وتمكين. وقد أظهر نموذج سيبس أفضل توافق مع النتائج التجريبية عند مختلف قيم الرقم الهيدروجيني المدروسة، مما يشير إلى أن عملية الامتزاز تتأثر بخصائص سطح المادة المازة وتوزيع مواقع الامتزاز.

تشير النتائج المتحصل عليها إلى أن الجبس المعاد تدويره يمتلك قدرة واعدة كمادة مازة فعالة ومستدامة لإزالة الأصباغ العضوية من المياه الملوثة، مما يجعله خياراً اقتصادياً وبيئياً مناسباً يمكن أن يساهم في تطوير تقنيات معالجة مياه الصرف الصناعي.

الكلمات المفتاحية: الجبس المعاد تدويره؛ أحمر الكونغو؛ الامتزاز؛ pH_{PZC} ؛ نموذج سيبس؛ معالجة المياه الملوثة.

Abstract :

This study aims to evaluate the potential use of recycled gypsum board waste ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) as a low-cost and environmentally friendly adsorbent for the removal of Congo Red (CR) dye from aqueous solutions. Gypsum was characterized using X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDX). Ultraviolet–Visible Spectroscopy (UV–Vis) was also employed to determine dye concentrations before and after adsorption and to evaluate the dye removal efficiency.

The effects of several operating parameters on adsorption efficiency were investigated, including the initial dye concentration (5, 10, 15, 20, 25, and 50 mg/L), contact time (20–140 min), and solution pH (5, 7, and 9). The results showed that the best adsorption performance was achieved at pH= 5 and an initial dye concentration of 20 mg/L, where a removal efficiency of approximately 93% was obtained, demonstrating the high capability of gypsum for dye removal under favorable conditions. The point of zero charge analysis revealed a pH_{PZC} value of 7.47, which helped explain the influence of solution pH on the adsorption behavior and dye removal efficiency.

The equilibrium behavior was analyzed using four adsorption isotherm models: Langmuir, Freundlich, Sips, and Temkin. The Sips model exhibited the best agreement with the experimental data at all investigated pH values, indicating that the adsorption process is influenced by the surface characteristics of the adsorbent and the distribution of adsorption sites.

The obtained results indicate that recycled gypsum possesses significant potential as an effective and sustainable adsorbent for the removal of organic dyes from contaminated water. Therefore, it represents an economical and environmentally friendly material that could contribute to the development of industrial wastewater treatment technologies.

Keywords: Recycled gypsum; Congo Red; Adsorption; pH_{PZC} ; Sips model; Wastewater treatment.

فهرس الجداول

الصفحة	الجدول
24	الجدول (1-I): الخواص الفيزيائية والبصرية للجبس
30	الجدول (2-I): أهم مجموعات Chromophore و Auxochrome مصنفة حسب زيادة الشدة
33	الجدول (3-I): تصنيف حسب التركيب الكيميائي
35	الجدول (4-I): الخصائص الكيميائية والفيزيائية لأحمر الكونغو
50	الجدول (5-I): الفرق بين الامتزاز والامتصاص
55	الجدول (6-I): مقارنة عامة بين الامتزاز الفيزيائي والكيميائي
75	الجدول (7-I): المواد والأدوات الزجاجية المستخدمة
94	الجدول (1-IV): جدول يوضح نسب عوامل الثقة وتواجد الأطوار
99	الجدول (2-IV): جدول نتائج EDS
101	الجدول (3-IV): جدول نتائج EDS
108	الجدول (4-IV): كفاءة الامتزاز لصبغة (CR) عند تراكيز مختلفة pH=5
110	الجدول (5-IV): كفاءة الامتزاز لصبغة (CR) عند تراكيز مختلفة pH=7
112	الجدول (6-IV): كفاءة الامتزاز لصبغة (CR) عند تراكيز مختلفة pH=9
115	الجدول (7-IV): ثوابت نماذج إيزوتارم الامتزاز لصبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عند pH=5
117	الجدول (8-IV): ثوابت نماذج إيزوتارم الامتزاز لصبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عند pH=7
119	الجدول (9-IV): ثوابت نماذج إيزوتارم الامتزاز لصبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عند pH= 9

فهرس الأشكال

الصفحة	الشكل
8	الشكل (1-1): صورة بالجبس داخل الاهرامات بمصر
9	الشكل (2-1): مجموعة تماثيل تل أسمر
9	الشكل (3-1): الثيران المجنحة
9	الشكل (4-1): تجويف جداري مقوس، حجرة استحمام الكاردينال بيباينا (Stufetta)، 1516، لوحة جدارية، القصر الرسولي بالفاتيكان.
10	الشكل (5-1): زخارف الفسيفساء الأموية في قبة الصخرة من الداخل.
10	الشكل (6-1): ضريح إمدغاسن.
11	الشكل (7-1): قصر فونتنبلو
14	الشكل (8-1): الجبس على شكل الجبسيات
15	الشكل (9-1): حجر من الجبس نوع السيلينيت
15	الشكل (10-1): الجبس على شكل الألباستر يُستعمل في صناعة العديد من أدوات وقطع الزينة.
16	الشكل (11-1): حجر من الجبس نوع Satin spar
16	الشكل (12-1): وردة الصحراء: تجمع صفائح لبلورات الجبس المتداخلة مع حبيبات الرمل.
17	الشكل (13-1): تستخدم محطة الطاقة Drax التي تعمل بالفحم في المملكة المتحدة أنظمة إزالة الكبريت، التي تم تركيبها بين عامي 1993 و 1996
27	الشكل (14-1): استخدام الجبس في تحضير القوالب السنية
29	الشكل (15-1): يوضح أمثلة لمجموعات Auxochrome و Chromophore
32	الشكل (16-1): رسم تخطيطي يبين تصنيف الأصباغ بناءً على شحنة الأيون
34	الشكل (17-1): التركيب الكيميائية لأحمر الكونغو CR
36	الشكل (18-1): العوامل الجينية السامة (Genotoxic Agents) المرتبطة بسرطان المثانة .
49	الشكل (1-II): رسم تخطيطي يوضح عملية الامتزاز
53	الشكل (2-II): مخطط الامتزاز الفيزيائي
54	الشكل (3-II): مخطط الامتزاز الكيميائي
55	الشكل (4-II): مجالات وجود المادة الممتزة أثناء الامتزاز على المواد المازة
77	الشكل (1-III): مخلفات ألواح الجبس
77	الشكل (2-III): قياس كتلة أحمر الكونغو

77	الشكل (III-3): محلول مائي لأحمر الكونغو بتركيز 1000 ppm
78	الشكل (III-4): المحاليل المخففة ذات التراكيز المختلفة
79	الشكل (III-5): العينات تحت التحريك باستعمال مخلاط مغناطيسي بسرعة 350 rpm
80	الشكل (III-6): عملية سحب وجمع العينات من محاليل صبغة أحمر الكونغو
80	الشكل (III-7): العينات أثناء عملية الطرد المركزي
83	الشكل (III-8): جهاز الانعراج الألي من نوع PROTO AXRD Benchtop powder diffraction
85	الشكل (III-9): جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء Spectrometer A gilent Technologies Cary 630 FTIR
86	الشكل (III-10): جهاز مطيافية الأشعة فوق البنفسجية - المرئية (UV-Vis)
87	الشكل (III-11): جهاز المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بالتحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة Phenom Prox DESKTOP SEM/EDS
88	الشكل (III-12): تحريك عينات الجبس مغناطيسيا أثناء دراسة pHPZC
89	الشكل (III-13): منحني الطول الموجي الأعظمي لصبغة أحمر الكونغو عند pH=9 (a)، pH=7 (b)، pH=5 (c)
93	الشكل (IV-1): تحسين ريتفالد لمخطط انعراج الأشعة السينية (XRD) لعينة الجبس
95	الشكل (IV-2): طيف الأشعة تحت الحمراء للجبس قبل الإمتزاز (GY)، بعد الإمتزاز (GY-CR) ولصبغة أحمر الكونغو (CR).
97	الشكل (IV-3): منحني الشحنة الصفري للجبس
98	الشكل (IV-4): صورة SEM للجبس قبل الامتزاز عند تكبير 10 μm
99	الشكل (IV-5): منحني طيف EDS للجبس قبل الإمتزاز
100	الشكل (IV-6): صورة SEM للجبس بعد الامتزاز عند تكبير 10 μm
101	الشكل (IV-7): منحني طيف EDS للجبس بعد الإمتزاز
102	الشكل (IV-8): المنحني البياني لقيم الامتصاصية بدلالة التراكيز المختلفة لصبغة CR
102	pH=5 (a), pH=7 (b), pH=9 (c)
104	الشكل (IV-9): منحني طيف الامتصاص لصبغة CR ذات التراكيز عند pH=5
105	الشكل (IV-10): منحني طيف الامتصاص لصبغة CR ذات التراكيز عند pH=7
106	الشكل (IV-11): منحني طيف الامتصاص لصبغة CR ذات التراكيز عند pH=9
108	الشكل (IV-12): تأثير التركيز الابتدائي للصبغة (CR) على كفاءة الامتزاز على الجبس عند pH=5

110	الشكل (13-IV): تأثير التركيز الابتدائي للصبغة (CR) على كفاءة الامتزاز على الجبس عند pH=7
112	الشكل (14-IV): تأثير التركيز الابتدائي للصبغة (CR) على كفاءة الامتزاز على الجبس عند pH=9
115	الشكل (15-IV): نماذج الايزوتارم المدروسة عند pH=5
117	الشكل (16-IV): نماذج الايزوتارم المدروسة عند pH=7
119	الشكل (17-IV): نماذج الايزوتارم المدروسة عند pH=9

قائمة الرموز والاختصارات

الرمز	مدلوله	الترجمة بالعربية
Abs	Adsorbance	الامتصاصية
A	Reference Sample	العينة المرجعية
AA	Aromatic Amines	أמיئات عطرية
Bt	Temkin constant related to heat of adsorption	ثابت تيمكن المرتبط بحرارة الامتزاز
C	Solution Concentration	تركيز محلول
C ₀	Initial Solvent Concentration	التركيز الابتدائي
C _e	Solute Concentration at Equilibrium	التركيز عند التوازن
CR	Congo Red	أحمر الكونغو
DR%	Dye Removal	نسبة الإزالة (كفاءة الامتزاز)
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy	مطيافية تشتت الطاقة
FDA	Food and Drug Administration	إدارة الغذاء والدواء الأمريكية
FGD	Flue Gas Desulfurization	إزالة الكبريت من غازات المداخن
FG200	Ultra-fine ground gypsum	جبس مطحون فائق النعومة
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه
K _L	Langmuir Constant	ثابت لانجمير
K _F	Freundlich constant	ثابت فروندليتش
K ₁	Pseudo-first-order kinetic rate constant	ثابت السرعة لحركية شبه الرتبة الأولى
K ₂	Pseudo-second-order kinetic rate constant	ثابت السرعة لحركية شبه الرتبة الثانية
K _c	Distribution constant	ثابت التوزيع
K _b	Fixed Equilibrium Binding	ثابت ربط التوازن
L	Reference cell thickness	سمك الخلية المرجعية
M	Mass of adsorbent material	كتلة المادة الماصة
pH	Hydrogen Potential	الرقم الهيدروجيني
q _e	Equilibrium adsorbate quantity	الكمية الممتزة عند التوازن

السعة العظمى للامتزاز	Maximum adsorbate quantity	q_m
سعة الامتزاز عند اللحظة	Adsorption capacity at a moment	q_t
معامل التوازن	Equilibrium constant	R_L
ثابت الغازات المثالية	Perfect gas constant	R
عامل الموثوقية المتوقع	Expected reliability factor	R_{exp}
عامل موثوقية الشكل الجانبي الموزون	Weighted profile reliability factor	R_{WP}
عامل شكل الانعراج	Diffraction shape factor	R_p
المجهر الإلكتروني الماسح	Scanning Electron Microscope	SEM
زمن الاتصال	Time of contact	T
درجة الحرارة المطلقة	Temperature	T
الأشعة فوق البنفسجية - المرئية	UV and visible rays	UV-Vis
حجم المحلول	Solution Volume	V
كمية المادة الماصة عند التوازن	Amount of adsorbent material at equilibrium	X
انحراف الأشعة السينية	X-ray diffraction	XRD
معامل التوافق أو معامل وجود التطابق	Goodness-of-fit parameter or matching factor	χ^2
معامل الامتصاصية الجزيئي	Adsorption intensity	$1/n$
الطول الموجي الأعظمي	Maximum wavelength	λ_{max}
زاوية الانعراج لبراغ	Bragg diffraction angle	Θ
التغير في الطاقة الحرة	Change in free energy	ΔG°
التغير في الإنتروبي	Change in entropy	ΔS°
التغير في الإنتالبي	Change in enthalpy	ΔH°
معامل الامتصاصية الجزيئي	Polani factor	E

فهرس المحتويات

i	الشكر والعرفان.....
i	الاهداء
iv	الملخص :
v	Abstract :
vi	فهرس المحتويات
vi	فهرس الجداول.....
vii	فهرس الأشكال.....
vii	قائمة الرموز والاختصارات.....
1	مقدمة عامة:

الجزء النظري

الفصل الأول: الأسس النظرية حول الجبس والأصباغ

8	1-I الجبس
8	1-1-I نبذة تاريخية.....
11	2-1-I تعريف الجبس
13	3-1-I مكونات الجبس
14	4-1-I أصناف الجبس
14	1-4-1-I الجبس الطبيعي
14	أ-الجبسيت (Gypsite):
14	ب-السيلينايت (Selenite):
15	ج-المرمر (Alabaster):
15	د-الساتينسبار (Satinspar):
16	و-وردة الصحراء (Desert Rose):
16	2-4-1-I الجبس الصناعي
17	5-1-I الجبس المعاد تدويره
18	1-5-1-I مصادر الجبس المعاد تدويره.....
18	أ-مخلفات البناء والهدم: (C&D Waste)
18	ب-جبس إزالة الكبريت من غازات المداخن: (FGD Gypsum)
19	ج-الفسفو-جبس (Phosphogypsum):
19	د-نفايات الصناعات الجبسية:
19	2-5-1-I تقنيات إعادة التدوير

أ-الطحن والفصل الميكانيكي:	19
ب-التعويم (Flotation):	19
ج-الفصل المغناطيسي:	20
د-الغسل الكيميائي:	20
و-المعالجة الحرارية (التكليس):	20
خ-التفعيل السطحي:	20
I-1-3-5 مزايا وعيوب إعادة التدوير	20
أ-المزايا:	20
ب-العيوب:	21
I-1-6 تعديل وتفعيل الجبس لتحسين خواصه.	21
I-1-6-1 المعالجة الحرارية	21
I-1-6-2 المعالجة الكيميائية	22
I-1-6-3 التفعيل السطحي	22
I-1-7 الخصائص الفيزيائية للجبس	22
I-1-8 الخصائص الكيميائية للجبس	23
I-1-9 الخصائص السطحية للجبس (المسامية، المساحة السطحية)	23
I-1-10 سلوك الجبس في الوسط المائي	24
I-1-11 مخاطر الجبس وتأثيراته البيئية	25
I-1-12 استخدامات الجبس	26
I-1-12-1 صناعة مواد البناء	26
I-1-12-2 في مجال الزراعة	26
I-1-12-3 في المجال الطبي	27
I-2- الأصباغ:	29
I-2-1 تعريف الأصباغ:	29
I-2-2 مصادر الأصباغ :	30
I-2-2-1-1 الأصباغ الطبيعية:	30
أ- الأصباغ النباتية :	30
ب- الاصباغ الحيوانية :	31
ج - الأصباغ المعدنية :	31
I-2-2-2-1 الأصباغ الاصطناعية:	31
I-2-3- تصنيف الأصباغ:	31

31	أ- التصنيف بناءً على شحنة الأيون :
33	ب- تصنيف حسب التركيب الكيميائي:
33	I-4-2- صبغة أحمر الكونغو:
34	I-4-2-1- تحضيرها:
35	I-4-2-2- خصائصها الكيميائية والفيزيائية:
35	I-4-2-3- سميتها:
37	I-5-2- تقنيات المعالجة:
37	I-5-2-1- الطرق الكيميائية:
38	I-5-2-2- الطرق الفيزيائية:
39	I-5-2-3- الطرق البيولوجية:
41	قائمة المراجع

الفصل الثاني: الإطار النظري لدراسة ظاهرة الامتزاز

47	تمهيد
48	II-1- نبذة تاريخية عن الامتزاز (Historical Overview of Adsorption)
49	II-2- تعريف الامتزاز (Definition of Adsorption)
50	II-3- الفرق بين الامتزاز والامتصاص
51	II-4- أهمية الامتزاز
51	II-4-1- في معالجة المياه
51	II-4-2- إزالة الملوثات
52	II-4-3- التطبيقات الصناعية
52	II-5- أنواع الامتزاز
52	II-5-1- الامتزاز الفيزيائي
53	II-5-2- الامتزاز الكيميائي
55	II-6- آلية الامتزاز
56	II-6-1- الانتقال في طور السائل
56	II-6-2- الانتشار عبر الغشاء السائل
56	II-6-3- الانتشار داخل الحبيبات
56	II-6-4- التفاعل والامتزاز على المواقع النشطة
57	II-7- العوامل المؤثرة على ظاهرة الامتزاز

57	(Effect of Solvent) تأثير المذيب	II-7-1
57	 تأثير التركيز	II-7-2
58	 تأثير الرقم الهيدروجيني	II-7-3
58	 طبيعة المادة الممتزة	II-7-4
58	 طبيعة المادة المازة	II-7-5
59	 تأثير درجة الحرارة	II-7-6
59	 زمن التلامس	II-7-7
60	 سرعة التحريك:	II-7-8
60	 نماذج إيزوتارم الامتزاز	II-8-8
60	 نموذج لانجمير (Langmuir):	II-8-1
61	 نموذج فروندليش (Freundlich):	II-8-2
62	 نموذج لانجمير -فروندليش (Sips)	II-8-3
63	 نموذج تمكين (Temkin Isotherm Model)	II-8-4
65	 حركية الامتزاز (Adsorption Kinetics)	II-9-9
65	 نموذج الرتبة الأولى الكاذبة (Pseudo-First Order Model)	II-9-1
66	 نموذج الرتبة الثانية الكاذبة (Pseudo-Second Order Model)	II-9-2
67	 تطبيقات الامتزاز (Applications of Adsorption)	II-10-10
67	 معالجة المياه (Water Treatment)	II-10-1
67	 التطبيقات الصناعية (Industrial Applications)	II-10-2
68	 المجال الطبي (Medical Applications)	II-10-3
68	 التطبيقات البيئية (Environmental Applications)	II-10-4
69	 خلاصة الفصل	
70	 قائمة المراجع	

الجزء العملي

الفصل الثالث: المواد، الأجهزة والإجراءات التجريبية

75	 تمهيد	
75	 المواد والطرق المستخدمة:	III-1
76	 تحضير الجبس :	III-2
77	 تحضير المحلول المائي لصبغة:	III-3

77	4-III- تحضير المحاليل المخففة ذات التراكيز المختلفة:
79	5-III- البروتوكول التجريبي لدراسة امتزاز صبغة أحمر الكونغو وتحديد المعلمات الامتزازية:
81	6-III- دراسة الخصائص:
81	1-6-III- إنعراج الأشعة السينية (XRD):
83	2-6-III- مطيافية الأشعة تحت الحمراء FTIR:
85	3-6-III- مطيافية الأشعة فوق البنفسجية (UV-Vis):
86	4-6-III- المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بالتحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة :
88	5-6-III- دراسة شحنة السطح عند نقطة الشحنة الصفرية (pH_{PZC}) :
88	6-6-III- تحديد القيمة التجريبية لأقصى طول موجي لصبغة أحمر الكونغو (RC):
89	7-6-III- تحديد منحنى المعايرة لصبغة أحمر الكونغو:
91	قائمة المراجع:

الجزء العملي

الفصل الرابع: النتائج والمناقشة

93	1-IV- توصيف المادة المازة:
93	1-1-IV- تحليل إنعراج الأشعة السينية XRD:
95	2-1-IV- التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء FTIR:
97	3-1-IV- دراسة شحنة السطح pH_{PZC} :
	4-1-IV- المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بالتحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة
98	(SEM/EDS):
102	2-IV- دراسة سلوك الامتزاز:
102	1-2-IV- منحنى المعايرة لصبغة أحمر الكونغو:
103	2-2-IV- دراسة تأثير زمن التلامس:
103	1-2-2-IV- تطور الامتصاصية بدلالة الزمن:
107	3-2-IV- تأثير التركيز الابتدائي على كفاءة الامتزاز:
108	1-3-2-IV- تأثير التركيز الابتدائي عند $pH=5$:
110	2-3-2-IV- تأثير التركيز الابتدائي عند $pH=7$:
112	3-3-2-IV- تأثير التركيز الابتدائي عند $pH=9$:
113	4-3-2-IV- مقارنة تأثير الرقم الهيدروجيني على كفاءة الامتزاز:
114	3-IV- دراسة ايزوتارم الامتزاز:

115.....	IV-3-1-دراسة إيزوتارم الامتزاز عند pH=5
117.....	IV-3-2-دراسة إيزوتارم الامتزاز عند pH=7
119.....	IV-3-3-دراسة إيزوتارم الامتزاز عند pH=9
121.....	IV-3-4-المناقشة العامة لنماذج الإيزوتارم :
121.....	IV-4- خلاصة الفصل.....
125.....	خاتمة.....
I.....	الملاحق.....

مقدمة عامة

مقدمة عامة:

يُعدّ التلوث المائي من أخطر المشكلات البيئية التي تواجه العالم في الوقت الحاضر نتيجة التوسع الصناعي المتزايد والنمو السكاني السريع والتطور التكنولوجي المستمر. فقد أصبحت الموارد المائية عرضة لاستقبال كميات كبيرة من الملوثات الناتجة عن الأنشطة الصناعية والمنزلية والزراعية، إضافة إلى مياه الصرف الصحي ومخلفات المؤسسات الصحية، مما أدى إلى تدهور نوعية المياه السطحية والجوفية وإحداث اختلالات خطيرة في الأنظمة البيئية المائية [1،2]. وتُعد الأنهار والمسطحات المائية من أكثر البيئات تأثراً بهذه الملوثات، حيث يؤدي تصريف النفايات السائلة دون معالجة كافية إلى الإضرار بالتنوع البيولوجي وتهديد صحة الإنسان والكائنات الحية الأخرى [1]. كما يساهم الاستخدام المكثف للأسمدة والمبيدات الكيميائية في زيادة الأحمال الملوثة للمياه وتفاقم المشكلات البيئية المرتبطة بالموارد المائية [2].

وتكتسب الملوثات العضوية أهمية خاصة ضمن ملوثات المياه نظراً لما تتميز به من ثبات كيميائي ومقاومة عالية للتحلل الطبيعي، فضلاً عن قدرتها على التراكم الحيوي داخل الأنسجة الحية وانتقالها عبر السلسلة الغذائية، مما يزيد من خطورتها البيئية والصحية [3،4]. وتُعد الأصباغ الصناعية من أبرز هذه الملوثات، إذ تُستخدم بكميات ضخمة في صناعات النسيج والورق والجلود والبلاستيك ومستحضرات التجميل والأدوية، ويتم طرح جزء معتبر منها في مياه الصرف الصناعي دون معالجة كافية [5،6]. ويؤدي وجود هذه الأصباغ في المياه إلى تغير خصائصها الفيزيائية والكيميائية وخفض نفاذية الضوء داخل الوسط المائي، مما يؤثر سلباً على الكائنات الحية والأنظمة البيئية المائية [5].

ومن بين الأصباغ الصناعية واسعة الانتشار تبرز صبغة أحمر الكونغو (Congo Red)، وهي من الأصباغ الأزوية الأنيونية التي تُستخدم على نطاق واسع في الصناعات النسيجية والطباعة والورق [7]. وتمثل هذه الصبغة مصدر قلق بيئي وصحي كبير بسبب مقاومتها العالية للتحلل واحتوائها على مجموعات آزوية يمكن أن تتحول إلى مركبات أمينية عطرية ذات تأثيرات سامة ومسرطنة للكائنات الحية [7،8]. كما أن استمرار وجودها في البيئة المائية يؤدي إلى تدهور جودة المياه ويهدد التوازن البيئي [9].

ونظراً لتزايد المخاطر المرتبطة بتلوث المياه، أصبحت معالجة مياه الصرف وإزالة الملوثات منها ضرورة بيئية وصحية واقتصادية ملحة [10]. وقد تم تطوير العديد من التقنيات لمعالجة المياه الملوثة، من بينها الترسيب الكيميائي والتبادل الأيوني والأكسدة والاختزال والترشيح والتحليل الكهربائي والعمليات البيولوجية المختلفة [10،11]. وعلى الرغم من فعالية هذه التقنيات في إزالة العديد من الملوثات، إلا أن بعضها يعاني من ارتفاع تكاليف التشغيل والصيانة أو محدودية الكفاءة تجاه بعض الملوثات العضوية المعقدة، مما حفز البحث عن تقنيات أكثر كفاءة واستدامة [11].

وخلال العقود الأخيرة شهدت تقنيات معالجة المياه تطوراً ملحوظاً، حيث برزت طرق حديثة تعتمد على التحفيز الضوئي وعمليات الأكسدة المتقدمة والامتزاز [12،21]. ويُعد الامتزاز من أكثر التقنيات استخداماً في معالجة المياه الملوثة نظراً لكفاءته العالية وسهولة تشغيله وانخفاض تكلفته النسبية مقارنة بالعديد من التقنيات الأخرى [12،13]. كما يتميز بقدرته على إزالة طيف واسع من الملوثات العضوية وغير العضوية حتى عند التراكيز المنخفضة، مما جعله من أكثر الطرق انتشاراً في معالجة مياه الصرف الصناعي المحتوية على الأصباغ [13].

ويعتمد نجاح عملية الامتزاز بصورة كبيرة على خصائص المادة المازة المستخدمة، لذلك اتجهت الأبحاث الحديثة نحو استغلال المواد الطبيعية والمخلفات الصناعية كممتزات منخفضة التكلفة وصديقة للبيئة [14]. وتتميز هذه المواد بتوفرها بكميات كبيرة وانخفاض تكاليفها وسهولة الحصول عليها، إضافة إلى مساهمتها في تقليل النفايات وتحقيق مبادئ التنمية المستدامة [15]. ولتحقيق أداء امتزازي مرتفع ينبغي أن تمتلك المادة المازة مساحة سطحية مناسبة ومواقع فعالة للارتباط بالملوثات وقدرة امتزاز عالية وانتقائية جيدة تجاه المركبات المستهدفة [16].

ويعتبر الكربون النشط من أكثر المواد المازة استخداماً في معالجة المياه بفضل مساحته السطحية الكبيرة وكفاءته العالية في إزالة الملوثات العضوية وغير العضوية [17]. إلا أن استخدامه على نطاق واسع يواجه بعض التحديات المرتبطة بارتفاع تكاليف التجديد وإعادة التنشيط وصعوبة عمليات الفصل والاسترجاع بعد المعالجة [17،18]. وقد دفعت هذه القيود الباحثين إلى تطوير مواد مازة بديلة أكثر استدامة وأقل تكلفة تعتمد على الموارد الطبيعية أو المخلفات الصناعية المختلفة [18].

ومن بين هذه المواد تبرز مخلفات الجبس باعتبارها مادة واعدة يمكن استغلالها في معالجة المياه الملوثة. فالجبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) مادة متوفرة بكميات كبيرة وتنتج عنها مخلفات متعددة خلال عمليات التصنيع والبناء والهدم [19]. وتمتلك هذه المخلفات خصائص فيزيائية وكيميائية مناسبة تجعلها قابلة للاستخدام كمادة مازة منخفضة التكلفة، مثل طبيعتها المسامية واحتوائها على مواقع سطحية فعالة للتفاعل مع الملوثات المختلفة [19،20]. وقد أظهرت العديد من الدراسات إمكانية استخدام الجبس الطبيعي أو المعدل في إزالة الأصباغ والمركبات العضوية من المحاليل المائية بكفاءة جيدة، مما يجعله خياراً مناسباً ضمن استراتيجيات إعادة تدوير النفايات وتحويلها إلى مواد ذات قيمة مضافة [20].

وانطلاقاً من هذه المعطيات، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم كفاءة الجبس المعاد تدويره كمادة مازة لإزالة صبغة أحمر الكونغو من المحاليل المائية، مع دراسة تأثير أهم العوامل التشغيلية المؤثرة في عملية الامتزاز مثل الزمن التماسي وتركيز الصبغة الابتدائي ودرجة الحموضة (pH) وكمية المادة المازة، بالإضافة

إلى دراسة سلوك الحركية والاتزان لعملية الامتزاز وتحديد مدى فعالية الجبس في تحسين جودة المياه الملوثة بالأصباغ الصناعية.

وتكمن أهمية هذه الدراسة في مساهمتها في تطوير حلول بيئية مبتكرة لمعالجة مياه الصرف الصناعي اعتماداً على مواد منخفضة التكلفة ومتوفرة محلياً، وفي تعزيز مفهوم الاقتصاد الدائري من خلال إعادة تدوير مخلفات الجبس والاستفادة منها كمادة مازة فعالة. كما يُتوقع أن توفر نتائج هذه الدراسة قاعدة علمية تدعم توسيع استخدام المواد الطبيعية والنفايات الصناعية في معالجة المياه، بما يساهم في الحد من الأعباء البيئية والاقتصادية المرتبطة بعمليات المعالجة التقليدية.

ولتحقيق أهداف هذه الدراسة، تم تقسيم هذه المذكرة إلى أربعة فصول رئيسية كما يلي:

الفصل الأول: الأسس النظرية حول الجبس والأصباغ.

الفصل الثاني: الإطار النظري لدراسة ظاهرة الامتزاز.

الفصل الثالث: المواد، الأجهزة والإجراءات التجريبية.

الفصل الرابع: النتائج والمناقشة.

واختُتمت المذكرة بخلاصة عامة تضمنت أهم النتائج المتوصل إليها وبعض الآفاق والتوصيات المستقبلية.

قائمة المراجع:

- [1] Mihaiescu, T., et al. (2021). Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption; Desorption Studies: A Review. *Molecules*, 26(22), 6920.
- [2] Bharathi, K. S., & Ramesh, S. T. (2013). Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: a review. *Applied Water Science*, 3(4), 773-790.
- [3] Mahdi, A. B., Aljeboree, A. M., & Alkaim, A. F. (2021). Adsorption and Removal of Pollutants (Dyes) from Wastewater Using Different Types of Low-cost Adsorbents: A Review. *Journal of Chemical Health Risks*, 11(4), 383-398
- [4] Harja, M., Buema, G., & Bucur, D. (2022). Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*, 12(1), 1-15
- [5] Adeyemo, A. A., Adeoye, I. O., & Bello, O. S. (2017). Adsorption of dyes using different types of clay: a review. *Applied Water Science*, 7(2), 543-568
- [6] Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061-1085
- [7] Namasivayam, C., & Arasi, D. J. S. (1997). Removal of Congo Red from wastewater by adsorption onto waste red mud. *Chemosphere*, 34(2), 401-417
- [8] Mittal, A., Mittal, J., Malviya, A., & Gupta, V. K. (2009). Adsorptive removal of hazardous anionic dye Congo Red from wastewater using waste materials and recovery by desorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 340(1), 16-26
- [9] Alamrani, N. A., AL-Aoh, H. A., & Kyzas, G. Z. (2021). Elimination of Congo Red Dye from Industrial Wastewater Using Teucrium polium L. as a Low-Cost Local Adsorbent. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 1-12
- [10] Ali, I. (2012). New generation adsorbents for water treatment. *Chemical Reviews*, 112(10), 5073-5114
- [11] M. Vakili, M. Rafatullah, B. Salamatnia, A. Z. Abdullah, M. H. Ibrahim, K. B. Tan, Z. Gholami, P. Amouzgar (2014). *Application of chitosan and its derivatives as adsorbents for dye removal from water and wastewater: A review*. **Carbohydrate Polymers**, 113, 115–130.
- [12] Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145-155
- [13] Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10
- [14] Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal—A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342

-
- [15] Kyzas, G. Z., &Kostoglou, M. (2014). Green adsorbents for wastewaters: A critical review. *Materials*, 7(1), 387-414
- [16] Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., &Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172-184
- [17] Ali, I., Asim, M., & Khan, T. A. (2012). Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 113, 170-183
- [18] Salvador, F., Martin-Sanchez, N., Sanchez-Montero, M. J., et al. (2015). Regeneration of carbonaceous adsorbents. *Microporous and Mesoporous Materials*, 202, 281-296
- [19] Dogan, M., Alkan, M., Demirbas, O., et al. (2010). Investigation of adsorption characteristics of Basic Red 46 onto gypsum: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Desalination*, 262(1-3), 178-185
- [20] Hassan, M. J., Islam, M. F., Akter, N., et al. (2021). Applicability of gypsum in selective removal of anionic dye molecules from aqueous medium. *Applied Water Science*, 11(11), 1-9.
- [21] Ben Ali, O., Mahboub, M. S., Zeroual, S., Bayou, S., Beggas, A., Ghougali, M., Benarfa, A., & Meneceur, S. (2024). $\text{La}_{0.8}\text{Bi}_{0.2}\text{FeO}_3$ Perovskite-Type: High-Performance of Photocatalytic Degradation of Ortho-Toluidine Blue Under Visible Light Irradiation. *East European Journal of Physics*, (1), 278-287.

الجزء النظري

الفصل الأول

الأسس النظرية حول الجبس والأصباغ

1-I الجبس

1-1-I نبذة تاريخية

يرجع استخدام الجبس إلى عصور موعلة في القدم، حيث تُشير الأدلة الأثرية إلى أن الإنسان استغل هذا المعدن منذ ما يقارب 9000 سنة، خاصة في مناطق الأناضول وسوريا، أين وُجدت بقايا استخدامه في الكهوف كصبغة بيضاء أو مادة لاصقة بدائية. ويُعد ذلك دليلاً على إدراك الإنسان القديم لخصائصه الفيزيائية المميزة، رغم محدودية المعرفة العلمية آنذاك [1,2].

وفي الحضارة المصرية القديمة، احتل الجبس مكانة بارزة في مجال البناء، حيث استُخدم منذ حوالي 6000 سنة قبل الميلاد في تشييد الأهرامات، خاصة كموّك أساسي في الملاط الجبسي-الكلسي الذي ساهم في تثبيت الأحجار الضخمة. كما استُخدم في طلاء الجدران الداخلية للمقابر، حيث عُثر على طبقات من الجص الأبيض الناعم مزينة بنقوش تمثل الحياة اليومية والمعتقدات الدينية. وقد أشار المؤرخ الإغريقي هيرودوت إلى استخدام الجبس في مصر، وذكر وجود غرف مخصصة لاستخراجه من مناجم الجيزة [1,2].



الشكل (1-I): صورة بالجبس داخل الاهرامات بمصر [3]

كما عُرف الجبس في حضارات بلاد الرافدين، مثل السومريين والبابليين، حيث استُخدم في صناعة التماثيل والأختام، وهو ما يعكس قيمته الفنية إلى جانب قيمته الوظيفية. وفي الحضارة الآشورية، استُخدم نوع من الجص المعروف بالمرمر، حيث صُنعت منه تماثيل ضخمة مثل الثيران المجنحة، والتي لا تزال معروضة في المتاحف العالمية. أما في الحضارة اليونانية، فقد استُخدم الجبس في صناعة أدوات منزلية وزخرفية، بالإضافة إلى النقوش الكتابية [1,2].



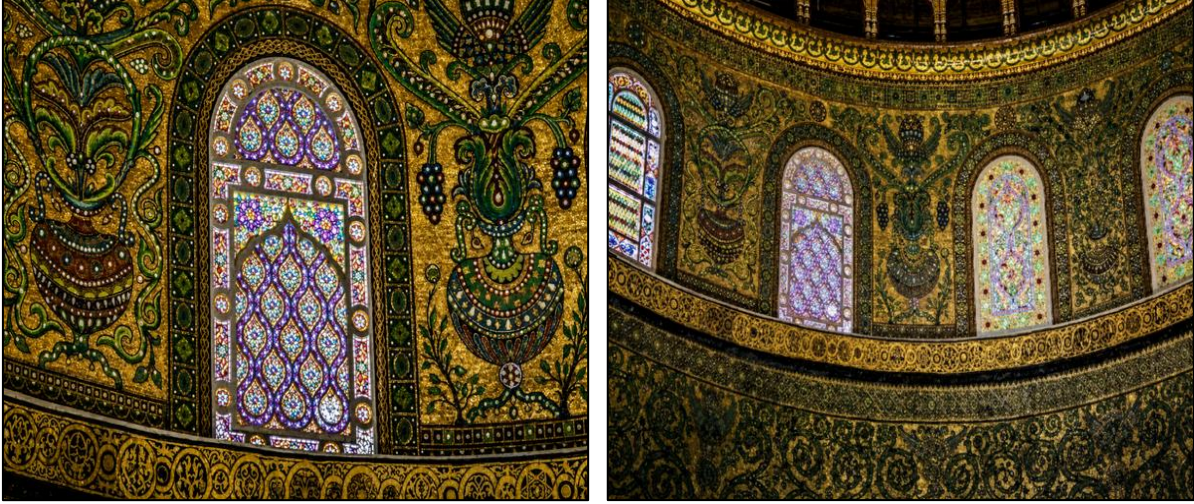
الشكل (I-2): مجموعة تماثيل تل أسمر [4] الشكل (I-3): التيران المجنحة [5]

مع تطور الحضارة الرومانية، شهد استخدام الجبس نقلة نوعية، حيث تم تطوير تقنية التكليس لإنتاج ما يُعرف بالجبس الباريسي (Piaster of Paris)، وذلك من خلال تسخين الجبس لفقدان جزء من مائه البلوري. وقد استُخدم هذا المنتج في الزخرفة المعمارية وصناعة التماثيل، كما في قصور النخبة الرومانية مثل قصر الإمبراطور نيرون. وقد ساهم هذا التطور في توسيع نطاق استخدام الجبس ليشمل تطبيقات أكثر تعقيداً [6].



الشكل (I-4): تجويف جداري مقوس، حجرة استحمام الكاردينال بيباينا (Stufetta)، 1516، لوحة جدارية، القصر الرسولي بالفاتيكان [7].

وفي العصور الوسطى، خاصة في الحضارة الإسلامية، تم توظيف الجبس بشكل واسع في العمارة والفنون، حيث استُخدم في تزيين المساجد والقصور، كما في قبة الصخرة، التي زُينت جدرانها بطبقات جبسية منقوشة بدقة عالية. كما اهتم العلماء المسلمون، مثل جابر بن حيان وابن سينا، بدراسة خصائصه الكيميائية، واستخدموه في بعض التطبيقات الطبية، مما يعكس بداية الفهم العلمي لطبيعة هذا المعدن [1,6].



الشكل (I-5): زخارف الفسيفساء الأموية في قبة الصخرة من الداخل [8].



الشكل (I-6): ضريح إمدغاسن [9].

خلال عصر النهضة الأوروبية، تطورت تقنيات استخدام الجبس بشكل كبير، حيث برع الفنانون والمعماريون في توظيفه في الزخرفة، كما في “اللوجيا” الجبسية في الفاتيكان. وقد أدى ذلك إلى انتشار استخدامه في القصور الأوروبية، خاصة بعد أن أمر الملك الفرنسي فرانسوا الأول بتزيين قصر فونتينبلو باستخدام الجبس، مما ساهم في ازدهار هذا الفن [6].



الشكل (I-7): قصر فونتنبلو [10]

في القرن التاسع عشر، شهدت صناعة الجبس تطوراً صناعياً ملحوظاً، خاصة بعد اختراع آلات حديثة لإنتاج الجبس سريع التصلب، مما ساهم في توسيع استخدامه في البناء. أما في القرن العشرين، فقد اتجه الاهتمام نحو إنتاج الجبس الصناعي، خاصة من خلال تقنيات إزالة الكبريت من غازات المداخن (FGD)، مما أتاح مصدراً جديداً لهذه المادة [6,11].

وفي العقود الأخيرة، ومع تزايد الاهتمام بالقضايا البيئية، أصبح الجبس المعاد تدويره محورياً مهماً في الأبحاث العلمية، خاصة في مجال معالجة المياه. وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن هذا النوع من الجبس، بعد تفعيله، يمكن أن يحقق كفاءة عالية في إزالة الأصباغ العضوية، مما يعكس تحولاً نوعياً في استخداماته، من مادة تقليدية في البناء إلى مادة متقدمة في التطبيقات البيئية [11,12].

وعليه، فإن التطور التاريخي لاستخدام الجبس يُبرز انتقاله من مادة بسيطة استخدمها الإنسان القديم، إلى مادة استراتيجية تلعب دوراً مهماً في تحقيق التنمية المستدامة، خاصة في مجالات حماية البيئة ومعالجة المياه، وهو ما يتماشى مع أهداف هذه الدراسة [11,12].

I-1-2 تعريف الجبس

يُعرّف الجبس (Gypsum) بأنه معدن طبيعي ينتمي إلى مجموعة الكبريتات، ويتكون أساساً من كبريتات الكالسيوم ثنائية الماء ذات الصيغة الكيميائية $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$. ويُعد من أكثر المعادن تبخرية الانتشار في الطبيعة، حيث يتشكل نتيجة ترسيب الأملاح من المحاليل المائية الغنية بالكبريتات، خاصة في البيئات الرسوبية التي تتميز بارتفاع معدلات التبخر مثل البحار الضحلة والبحيرات المالحة. ويرتبط أصل التسمية بمصطلح يوناني قديم يشير إلى "المادة المحروقة" أو "المعدن المُسخَّن"، في إشارة إلى خاصيته الأساسية المتمثلة في فقدان الماء البلوري عند التسخين [13,14].

يتواجد الجبس في الطبيعة على هيئة طبقات رسوبية سميكة، وغالبًا ما يكون مصحوبًا بمعادن أخرى مثل الأنهيدريت (CaSO_4)، الذي يُعد الشكل اللامائي للجبس. وتحت تأثير المياه السطحية، يمكن أن يتحول الأنهيدريت إلى جبس من خلال عملية الإماهة، وهو ما يعكس الطبيعة الديناميكية لهذا المعدن في الوسط الجيولوجي. كما يمكن أن يتشكل الجبس مباشرة من المحاليل المشبعة بالكبريتات، حيث يترسب على شكل بلورات متفاوتة الحجم، وقد تتراكم هذه البلورات لتكوّن رواسب ضخمة ذات أهمية اقتصادية [13,14].

من الناحية الفيزيائية، يتميز الجبس بكونه معدنًا لينًا نسبيًا، حيث تتراوح صلابته بين 1.5 و 2 على مقياس موهس، مما يجعله سهل الطحن والتشكيل. كما تتراوح كثافته النوعية عادة بين 2.2 و 2.4 g/cm^3 ، وقد تختلف هذه القيم تبعًا لنقاوة المعدن ونسبة الشوائب المصاحبة له. ويظهر الجبس في أشكال بلورية متنوعة، منها البلورات الشفافة أو شبه الشفافة، وأحيانًا في هيئة كتل دقيقة الحبيبات أو ليفية البنية. أما من حيث اللون، فيتدرج بين الأبيض النقي إلى الرمادي أو الأصفر أو الوردي، نتيجة وجود شوائب معدنية مثل أكاسيد الحديد أو المواد العضوية [13,14].

وتُعد البنية البلورية للجبس من العوامل المؤثرة في خصائصه، حيث يتبلور في النظام أحادي الميل (Monoclinic System)، وتُظهر بلوراته تحت المجهر أشكالًا منتظمة ذات خصائص ضوئية مميزة، مثل الشفافية الجزئية وقدرتها على تمرير بعض أنواع الإشعاع. كما أن التركيب الطبقي للجبس يُكسبه قابلية للانقسام بسهولة، وهو ما يسهل استغلاله صناعيًا [15].

من أبرز الخصائص الكيميائية للجبس قدرته على فقدان جزء من مائه البلوري عند تسخينه إلى درجات حرارة تتراوح بين 100 و 180 درجة مئوية، حيث يتحول إلى كبريتات الكالسيوم نصف المائية ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)، المعروفة تجاريًا باسم "جبس باريس". وعند إضافة الماء إليه مرة أخرى، يستعيد بنيته الأصلية ويتصلب بسرعة، وهي خاصية أساسية تُستغل في العديد من التطبيقات الصناعية، مثل مواد البناء والقوالب الطبية. كما يمكن للجبس أن يتحول إلى الأنهيدريت عند التسخين إلى درجات حرارة أعلى، مما يغير من خصائصه الفيزيائية والكيميائية [14,16].

وفي الوسط المائي، يُظهر الجبس سلوكًا مميزًا يتمثل في ذوبانيته المحدودة نسبيًا، حيث يذوب جزئيًا في الماء مكونًا أيونات الكالسيوم والكبريتات. وتلعب هذه الخاصية دورًا مهمًا في تفاعلاته مع الملوثات، خاصة في عمليات الامتزاز، حيث يمكن أن تتفاعل المواقع السطحية للجبس مع الجزيئات العضوية أو الأيونات الموجودة في المحلول. كما أن قدرته على امتصاص الماء تؤدي إلى حدوث انتفاخ طفيف في بنيته، مما قد يؤثر على خصائصه الميكانيكية والسطحية [12,17].

وتبرز أهمية الجبس في كونه مادة أولية متعددة الاستخدامات، تجمع بين البساطة التركيبية والتنوع الوظيفي، إذ يُستخدم في مجالات البناء، والصناعة، والزراعة، والطب. غير أن الاهتمام العلمي الحديث قد اتجه نحو استكشاف إمكانياته في التطبيقات البيئية، خاصة كمادة ممتزة (Adsorbent) منخفضة التكلفة.

وفي هذا السياق، يُعتبر الجبس، لا سيما بعد تعديله أو إعادة تدويره، مادة واعدة في إزالة الملوثات من المياه، بفضل خصائصه السطحية القابلة للتحسين، مثل المسامية والمساحة السطحية وتوزيع المواقع النشطة [12,17].

وعليه، فإن الجبس لا يُنظر إليه فقط كمعدن تقليدي، بل كمادة متعددة الوظائف ذات إمكانيات تطبيقية متقدمة، خاصة في ظل التوجه العالمي نحو استخدام مواد مستدامة وصديقة للبيئة في معالجة التلوث [12,17].

I-1-3 مكونات الجبس

إن الجبس مادة معدنية طبيعية ذات تركيب كيميائي بسيط نسبياً، حيث يتكون أساساً من كبريتات الكالسيوم ثنائية الماء ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، وهي البنية البلورية التي تمنحه خصائصه الفيزيائية والكيميائية المميزة. غير أن الجبس في حالته الطبيعية لا يكون نقياً تماماً، بل يحتوي غالباً على مجموعة من الشوائب والمعادن المصاحبة التي تختلف نسبتها باختلاف الظروف الجيولوجية وبيئة الترسيب [13,14].

من بين أهم هذه المكونات الثانوية كربونات الكالسيوم (CaSO_4)، التي تتواجد نتيجة التداخل مع الصخور الكلسية، بالإضافة إلى السيليكا (SiO_2) التي تظهر عادة في شكل رمل أو جسيمات دقيقة ناتجة عن عمليات الترسيب المختلط. كما قد يحتوي الجبس على آثار من أكاسيد الحديد، والتي تُكسبه ألواناً متفاوتة تتراوح بين الأصفر والوردي والبني، إلى جانب وجود مواد طينية أو عضوية تؤثر على درجة نقاوته وخصائصه الفيزيائية [13,14].

ويلاحظ أن نسبة الماء البلوري ($2\text{H}_2\text{O}$) تُعد مكوناً أساسياً في تركيب الجبس، حيث تلعب دوراً حاسماً في تحديد سلوكه الحراري والكيميائي. فعند تسخين الجبس، يفقد هذا الماء تدريجياً، مما يؤدي إلى تحوله إلى أطوار أخرى مثل نصف المائي (Plaster of Paris) أو الأنهيدريت، وهو ما يُستغل في التطبيقات الصناعية المختلفة. كما أن وجود هذا الماء ضمن البنية البلورية يُسهم في إكساب الجبس خاصية التفاعل مع الماء وإعادة التصلب، وهي خاصية فريدة تميزه عن العديد من المعادن الأخرى [13,14].

ومن منظور تطبيقي، تؤثر هذه المكونات والشوائب بشكل مباشر على أداء الجبس في التطبيقات البيئية، خاصة في عمليات الامتزاز، حيث يمكن أن تُساهم بعض الشوائب في زيادة عدد المواقع النشطة على السطح أو في تغيير الشحنة السطحية، مما يؤثر على تفاعل الجبس مع الملوثات المختلفة. وعليه، فإن فهم التركيب الكيميائي والمعدني للجبس يُعد خطوة أساسية لتقييم كفاءته وتوجيه عمليات تعديله وتحسين أدائه [13,14].

4-1-I أصناف الجبس

يمكن تصنيف الجبس إلى نوعين رئيسيين بناءً على مصدره وطريقة تكوّنه، وهما الجبس الطبيعي والجبس الصناعي، حيث يختلف كل منهما في خصائصه الفيزيائية والكيميائية، مما ينعكس على مجالات استخدامه المختلفة [13].

1-4-1-I الجبس الطبيعي

يتواجد الجبس الطبيعي في الطبيعة بعدة أشكال معدنية تختلف في بنيتها وخصائصها، وذلك تبعاً لظروف التكوين الجيولوجي ودرجة النقاوة. ومن أبرز هذه الأنواع [13] :

أ-الجبسيت (Gypsite):

يُعد من الرواسب السطحية غير المتماسكة، ويتكون من جسيمات دقيقة الحبيبات غالباً ما تكون مختلطة بمواد طينية أو رملية، مما يجعله منخفض النقاوة مقارنة ببقية الأنواع. ويُستخدم هذا النوع عادة في التطبيقات التي لا تتطلب درجة عالية من النقاء [13].



الشكل (8-I): الجبس على شكل الجبسيت [18]

ب-السيلينيت (Selenite):

يُعتبر من أنقى وأجود أنواع الجبس، حيث يتميز ببلوراته الشفافة أو شبه الشفافة ذات الشكل المنتظم. وغالباً ما تتكون بلوراته في بيئات ترسيبية هادئة، ويُستخدم في التطبيقات التي تتطلب خصائص بصرية أو بلورية مميزة [13].



الشكل (I-9): الشكل 09: حجر من الجبس نوع السيلينيت [19]

ج-المرمر (Alabaster):

يتميز ببنية دقيقة الحبيبات ومتجانسة، مما يجعله سهل التشكيل والنحت. وقد استُخدم منذ العصور القديمة في صناعة التماثيل والتحف الفنية والزخارف المعمارية، نظرًا لمظهره الجمالي ونعومته [13].



الشكل (I-10): الجبس على شكل الألباستر يُستعمل في صناعة العديد من أدوات وقطع الزينة [18].

د-الساتينسبار (Satinspar):

هو نوع ليفي من الجبس، يتميز بترتيب أليافه بشكل متوازٍ، مما يمنحه لمعانًا حريريًا مميزًا. وغالبًا ما يُستخدم لأغراض زخرفية، كما يعكس خصائص بنيوية مختلفة مقارنة بالأنواع البلورية الأخرى [13].



الشكل (I-11): حجر من الجبس نوع Satin spar [18]

و-وردة الصحراء (Desert Rose):

تُعد من الأشكال الطبيعية المميزة للجبس، حيث تتشكل نتيجة تبلور كبريتات الكالسيوم في البيئات الصحراوية تحت تأثير التبخر الشديد. وتأخذ هذه البلورات شكلاً يشبه الورود، نتيجة تداخل بلورات الجبس مع حبيبات الرمل، وتُعد مؤشراً على الظروف المناخية والجيوكيميائية الخاصة ببيئة التكوين [13].



الشكل (I-12): وردة الصحراء: تجمع صفائحي لبلورات الجبس المتداخلة مع حبيبات الرمل [20].

وتعكس هذه الأنواع التنوع البنيوي والمعدني للجبس الطبيعي، وهو ما يؤثر بشكل مباشر على خصائصه الفيزيائية مثل المسامية، الكثافة، وقابلية التفاعل، وبالتالي على كفاءته في التطبيقات الصناعية والبيئية [13].

I-1-4-2 الجبس الصناعي

يُعرف الجبس الصناعي بأنه منتج ثانوي يتم الحصول عليه من العمليات الصناعية، خاصة من وحدات إزالة الكبريت من غازات المداخن (Flue Gas Desulfurization (FGD) في محطات توليد الطاقة التي تعتمد على الوقود الأحفوري. وتتم هذه العملية من خلال تفاعل ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) الموجود في الغازات مع مركبات الكالسيوم، مما يؤدي إلى تكوين كبريتات الكالسيوم المائية، أي الجبس [21,22].



الشكل (I-13): تستخدم محطة الطاقة Drax التي تعمل بالفحم في المملكة المتحدة أنظمة إزالة الكبريت، التي تم تركيبها بين عامي 1993 و 1996 [23]

وقد اكتسب هذا النوع من الجبس أهمية متزايدة في العقود الأخيرة، نظرًا لتوفره بكميات كبيرة وانخفاض تكلفته مقارنة بالجبس الطبيعي، إضافة إلى مساهمته في تقليل التلوث البيئي الناتج عن الانبعاثات الصناعية. كما يتميز الجبس الصناعي بدرجة نقاوة عالية نسبيًا، مما يجعله مناسبًا للعديد من التطبيقات، خاصة في صناعة مواد البناء [21,22].

وفي السياق البيئي، يُعد الجبس الصناعي خيارًا واعدًا في معالجة المياه، حيث يمكن استخدامه كمادة ممتزة بعد إجراء بعض عمليات التعديل أو التفعيل لتحسين خصائصه السطحية. وتشير الإحصائيات إلى أن نسبة استخدام الجبس الصناعي في بعض الدول الصناعية قد شهدت ارتفاعًا ملحوظًا، حيث بلغت في بعض الحالات أكثر من 30% من إجمالي استهلاك الجبس، وهو ما يعكس التحول نحو استغلال الموارد الثانوية في إطار التنمية المستدامة [21,22].

وبالتالي، فإن التمييز بين الجبس الطبيعي والصناعي لا يقتصر على المصدر فقط، بل يمتد إلى الخصائص والتطبيقات، خاصة في المجالات البيئية الحديثة، حيث يُمكن توظيف كلا النوعين، لا سيما بعد المعالجة، في تحسين كفاءة إزالة الملوثات من المياه [21,22].

I-1-5 الجبس المعاد تدويره

إن الجبس المعاد تدويره (Recycled Gypsum) من المواد ذات الأهمية المتزايدة في التطبيقات البيئية الحديثة، حيث يندرج ضمن استراتيجيات الاقتصاد الدائري التي تهدف إلى إعادة استغلال النفايات وتحويلها إلى مواد ذات قيمة مضافة. وفي مجال معالجة المياه، برز هذا النوع من الجبس كمادة ممتزة واعدة لإزالة

الملوثات العضوية، خاصة الأصباغ، بفضل خصائصه السطحية القابلة للتحسين وانخفاض تكلفته مقارنة بالمواد الممتزة التقليدية [11].

من الناحية الكيميائية، يحتفظ الجبس المعاد تدويره بنفس التركيب الأساسي للجبس الطبيعي ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، إلا أن خصائصه الفيزيائية، مثل حجم الجسيمات والمساحة السطحية والمسامية، تتأثر بعمليات المعالجة وإعادة التدوير. وغالبًا ما يتميز هذا النوع من الجبس بمساحة سطحية نوعية تتراوح بين $1 \text{ و } 5 \text{ g/m}^2$ ، وهي قيمة مناسبة لتعزيز ظاهرة الامتزاز، خاصة بعد إجراء عمليات التفعيل الفيزيائي أو الكيميائي [11].

كما أن استخدام الجبس المعاد تدويره يساهم في تقليل الضغط على الموارد الطبيعية، والحد من تراكم النفايات الصناعية والبنائية، مما يجعله خيارًا مستدامًا يتماشى مع أهداف التنمية المستدامة، لا سيما الهدف المتعلق بالاستهلاك والإنتاج المسؤولين. وتشير التقديرات إلى أن الإنتاج العالمي من الجبس المعاد تدويره يبلغ عشرات الملايين من الأطنان سنويًا، مع توجه متزايد نحو استغلاله في التطبيقات البيئية [11].

I-1-5-1 مصادر الجبس المعاد تدويره

تتعدد مصادر الجبس المعاد تدويره، ويمكن تصنيفها إلى مصادر رئيسية تشمل النفايات البنائية والصناعية، حيث تختلف هذه المصادر من حيث النقاوة والتركيب الكيميائي، وهو ما ينعكس على خصائص الجبس الناتج وإمكانية استخدامه في الامتزاز [11].

أ-مخلفات البناء والهدم: (C&D Waste)

تُعد المصدر الأكثر شيوعًا للجبس المعاد تدويره، حيث تمثل النسبة الأكبر من إجمالي الإنتاج. وتشمل هذه المخلفات ألواح الجبس (Drywall) المستخدمة في الجدران والأسقف، والتي يتم جمعها من مواقع الهدم أو مشاريع الترميم. يتكون هذا النوع عادة من نواة جبسية مغطاة بطبقة ورقية، ويتم فصل الورق عن الجبس باستخدام تقنيات ميكانيكية أو مائية. وتصل نسبة نقاوة الجبس المسترجع إلى أكثر من 90%، مما يجعله مناسبًا للاستخدام في التطبيقات البيئية بعد المعالجة [11].

ب-جبس إزالة الكبريت من غازات المداخن: (FGD Gypsum)

يُنتج هذا النوع كمنتج ثانوي في محطات توليد الطاقة الحرارية، حيث يتم امتصاص ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) باستخدام مركبات الكالسيوم، مما يؤدي إلى تكوين كبريتات الكالسيوم المائية. ويتميز هذا الجبس بدرجة نقاوة عالية قد تتجاوز 95%، إضافة إلى تجانسه البنيوي، مما يجعله مادة مثالية للاستخدام المباشر أو بعد تعديل بسيط في عمليات الامتزاز، خاصة للأصباغ الأنيونية [21,22].

ج-الفسفو-جبس (Phosphogypsum):

ينتج عن صناعة حمض الفوسفوريك من صخور الفوسفات، ويحتوي على نسبة جيدة من كبريتات الكالسيوم، إلا أنه قد يتضمن شوائب مثل الفوسفور والعناصر الثقيلة وآثاراً من المواد المشعة. ورغم هذه التحديات، فقد أظهرت الدراسات إمكانية معالجته وتنقيته باستخدام تقنيات كيميائية، مما يسمح باستخدامه في التطبيقات البيئية، بما في ذلك إزالة الملوثات من المياه [24].

د-نفايات الصناعات الجبسية:

تشمل هذه الفئة بقايا عمليات التصنيع في مصانع الجبس، مثل القصاصات والمنتجات غير المطابقة للمواصفات. وتتميز هذه النفايات بدرجة نقاوة عالية، نظراً لمصدرها الصناعي، ويمكن إعادة تدويرها بسهولة داخل نفس الوحدة الإنتاجية أو في وحدات معالجة مستقلة [24].

إن تنوع هذه المصادر يُوفر قاعدة واسعة لإنتاج الجبس المعاد تدويره، إلا أن اختلاف خصائصها يتطلب اختيار طرق معالجة مناسبة لضمان الحصول على مادة ذات أداء مرتفع في الامتزاز [11,25].

I-1-5-2 تقنيات إعادة التدوير

تعتمد تقنيات إعادة تدوير الجبس على مجموعة من العمليات الفيزيائية والكيميائية التي تهدف إلى فصل الشوائب، تقليل حجم الجسيمات، وتحسين الخصائص السطحية للمادة، بما يعزز من كفاءتها في التطبيقات البيئية [11,25].

أ-الطحن والفصل الميكانيكي:

تُعد الخطوة الأولى في معظم عمليات إعادة التدوير، حيث يتم تكسير المواد الجبسية إلى أحجام صغيرة، ثم فصل المكونات غير المرغوب فيها مثل الورق أو البلاستيك باستخدام مناخل أو أنظمة فصل هوائي. ويساهم تقليل حجم الجسيمات في زيادة المساحة السطحية، وهو عامل مهم في تعزيز الامتزاز [11,25].

ب-التعويم (Flotation):

تُستخدم هذه التقنية بشكل خاص لفصل المواد العضوية، حيث يتم غمر الخليط في وسط مائي مع إدخال فقاعات هواء، مما يؤدي إلى طفو المواد الخفيفة (مثل الورق) وبقاء الجبس في القاع. وتُعد هذه الطريقة فعالة جداً في معالجة مخلفات ألواح الجبس [11,25].

ج-الفصل المغناطيسي:

يُستخدم لإزالة الشوائب المعدنية، خاصة في حالة وجود بقايا معدنية من عمليات البناء أو التصنيع. ويتم ذلك بتمرير المادة عبر مجال مغناطيسي، مما يسمح باستخلاص الجسيمات المعدنية بدقة عالية [11,25].

د-الغسل الكيميائي:

يُعد من أهم التقنيات لتحسين نقاوة الجبس، حيث يتم استخدام محاليل حمضية أو قلوية لإزالة الشوائب العضوية وغير العضوية. كما يمكن استخدام هذه المرحلة لتعديل سطح الجبس، من خلال إدخال مجموعات وظيفية جديدة تُحسن من تفاعله مع الملوثات [11,25].

و-المعالجة الحرارية (التكليس):

تُستخدم لإزالة الماء البلوري جزئيًا وتحويل الجبس إلى شكل نصف مائي أكثر نشاطًا. كما تُساهم في تحسين البنية المسامية وزيادة عدد المواقع النشطة على السطح [11,25].

خ-التفعيل السطحي:

يُمكن إجراء تعديلات إضافية باستخدام أحماض عضوية أو مواد كيميائية معينة لزيادة المسامية وتعديل الشحنة السطحية، مما يُحسن من كفاءة الامتزاز تجاه أنواع مختلفة من الأصباغ. وتُظهر الدراسات أن الجمع بين هذه التقنيات يمكن أن يؤدي إلى تحسين كفاءة الامتزاز بنسبة تصل إلى 50-30% مقارنة بالجبس غير المعالج، وهو ما يُبرز أهمية التحكم في مراحل إعادة التدوير [11,25].

I-1-3-5-3 مزايا وعيوب إعادة التدوير

أ-المزايا:

يُوفر استخدام الجبس المعاد تدويره العديد من الفوائد، سواء من الناحية البيئية أو الاقتصادية أو التقنية. فمن جهة، يُساهم في تقليل كمية النفايات الصلبة المتراكمة، خاصة في قطاع البناء والصناعة، مما يحد من التأثيرات البيئية السلبية. كما يُقلل من استهلاك الموارد الطبيعية المرتبطة باستخراج الجبس الخام، ويُخفض من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن عمليات التعدين والنقل [11,24].

من الناحية الاقتصادية، يُعد الجبس المعاد تدويره خيارًا منخفض التكلفة، حيث يمكن أن يقلل من تكاليف الإنتاج بنسبة كبيرة مقارنة بالجبس الطبيعي أو المواد الممتزة الأخرى. أما من الناحية التقنية، فيتميز بإمكانية تعديل خصائصه السطحية بسهولة، مما يسمح بتكييفه مع أنواع مختلفة من الملوثات، خاصة الأصباغ العضوية. كما أن صغر حجم الجسيمات الناتج عن عمليات الطحن يُساهم في زيادة المساحة السطحية، وبالتالي تحسين كفاءة الامتزاز [11,24].

ب-العيوب:

رغم هذه المزايا، إلا أن الجبس المعاد تدويره يواجه بعض التحديات التي قد تؤثر على أدائه. من أبرز هذه التحديات وجود شوائب متبقية، سواء كانت عضوية أو معدنية، والتي قد تقلل من عدد المواقع النشطة أو تعيق تفاعل الجبس مع الملوثات. كما أن جودة الجبس المعاد تدويره قد تختلف بشكل كبير حسب مصدره، مما يؤدي إلى تباين في النتائج التجريبية.

إضافة إلى ذلك، قد تتطلب بعض أنواع الجبس، مثل الفسفو-جبس، معالجات إضافية لإزالة العناصر الضارة، وهو ما يزيد من تعقيد العملية وتكلفتها. كما أن عمليات الجمع والنقل قد تشكل تحديًا لوجستيًا، خاصة في المناطق التي تقتصر على بنية تحتية مناسبة لإدارة النفايات [11,24].

I-1-6 تعديل وتفعيل الجبس لتحسين خواصه

يُعد تعديل وتفعيل الجبس خطوة محورية في تطوير أدائه كمادة ممتزة، خاصة في تطبيقات إزالة الأصباغ العضوية من المياه. فرغم أن الجبس في حالته الطبيعية يمتلك بنية بلورية مستقرة، إلا أن خصائصه السطحية تكون محدودة نسبيًا من حيث عدد المواقع النشطة والمساحة السطحية، وهو ما يستدعي إخضاعه لعمليات معالجة فيزيائية وكيميائية تهدف إلى تحسين تفاعليته وزيادة كفاءته في الامتزاز.

تعتمد هذه العمليات على تغيير البنية المجهرية للجبس، إما بإزالة الماء البلوري جزئيًا، أو بإدخال مجموعات وظيفية جديدة على سطحه، أو بزيادة مساميته، مما يؤدي إلى تعزيز التفاعل بين سطح الجبس وجزيئات الملوثات. وتُصنف تقنيات التفعيل بشكل عام إلى ثلاث فئات رئيسية: المعالجة الحرارية، المعالجة الكيميائية، والتفعيل السطحي [12,17].

I-1-6-1 المعالجة الحرارية

تُعد المعالجة الحرارية من أكثر الطرق شيوعًا في تعديل الجبس، حيث تعتمد على تسخينه عند درجات حرارة محددة بهدف تغيير بنيته البلورية وتحسين خصائصه الفيزيائية. فعند تسخين الجبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) إلى درجات حرارة تتراوح بين 100 و 180°C ، يفقد جزءًا من الماء البلوري ويتحول إلى الجبس نصف المائي ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$)، وهو شكل أكثر نشاطًا من الناحية الكيميائية.

وعند رفع درجة الحرارة إلى مستويات أعلى ($200-400^\circ\text{C}$)، يمكن أن يتحول الجبس إلى الأنهيدريت (CaSO_4)، وهو طور لا مائي يتميز بكثافة أعلى وببنية أكثر صلابة. وتؤدي هذه التحولات إلى تغييرات في البنية المسامية، حيث يزداد حجم المسام وعددها نتيجة فقدان الماء، مما يُحسن من قدرة الجبس على الامتزاز [16].

كما أن التحكم في درجة الحرارة وزمن المعالجة يُعد أمرًا حاسمًا، إذ أن التسخين المفرط قد يؤدي إلى تلبد الجسيمات وانخفاض المساحة السطحية، مما يؤثر سلبيًا على الأداء. وتشير الدراسات إلى أن المعالجة

الحرارية المثلى تُحقق توازنًا بين إزالة الماء البلوري والحفاظ على البنية المسامية، وهو ما ينعكس في زيادة كفاءة إزالة الأصباغ من المحاليل المائية [16].

I-1-6-2 المعالجة الكيميائية

تهدف المعالجة الكيميائية إلى تعديل التركيب السطحي للجبس من خلال تفاعلات كيميائية تُدخل مجموعات وظيفية جديدة أو تُزيل الشوائب التي تعيق التفاعل. وتُستخدم في هذا السياق محاليل حمضية أو قلوية، مثل حمض الكبريتيك (H_2SO_4) أو هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، حيث تؤدي هذه المعالجات إلى تنظيف السطح وزيادة نشاطه.

كما يمكن استخدام أملاح معدنية أو مركبات عضوية لتطعيم سطح الجبس، مما يُغير من شحنته السطحية ويُحسن من قدرته على جذب أنواع معينة من الأصباغ. فعلى سبيل المثال، يمكن تحسين امتزاز الأصباغ الكاتيونية من خلال زيادة الشحنة السالبة على سطح الجبس، والعكس صحيح. وتُظهر النتائج التجريبية أن المعالجة الكيميائية تُسهم في زيادة عدد المواقع النشطة، وتحسين التفاعل بين الجبس وجزيئات الملوثات، خاصة في ظروف pH محددة. غير أن هذه الطريقة تتطلب تحكمًا دقيقًا في التركيزات ومدة التفاعل، لتفادي تدهور البنية البلورية أو تكوين مركبات غير مرغوب فيها [12,25].

I-1-6-3 التفعيل السطحي

يُقصد بالتفعيل السطحي مجموعة العمليات التي تهدف إلى تحسين الخصائص السطحية للجبس دون تغيير بنيته الأساسية بشكل كبير، وذلك من خلال زيادة المسامية أو تعديل الشحنة السطحية. وتشمل هذه العمليات الطحن الدقيق، والمعالجة بالموجات فوق الصوتية، أو استخدام مواد مُفعّلة مثل الأحماض العضوية.

يساهم الطحن الدقيق في تقليل حجم الجسيمات، مما يؤدي إلى زيادة المساحة السطحية النوعية، وبالتالي زيادة عدد المواقع المتاحة للامتزاز. كما أن استخدام الموجات فوق الصوتية يُساعد في تفكيك التكتلات وزيادة تشتت الجسيمات في الوسط المائي.

أما التفعيل الكيميائي السطحي، فيتم من خلال إدخال مجموعات وظيفية مثل (OH^-) أو ($-COOH$)، والتي تُعزز من التفاعل بين الجبس وجزيئات الأصباغ. ويُعد هذا النوع من التفعيل مهمًا بشكل خاص في التطبيقات التي تتطلب انتقائية عالية تجاه نوع معين من الملوثات [12,17].

I-1-7 الخصائص الفيزيائية للجبس

يتميز الجبس بمجموعة من الخصائص الفيزيائية التي تجعله مادة مناسبة للعديد من التطبيقات. فهو معدن لين نسبيًا، حيث تتراوح صلابته بين 1.5 و 2 على مقياس موهس، مما يسهل طحنه وتشكيله. كما تتراوح كثافته النوعية بين 2.2 و 2.4 g/m^3 ، وهي قيمة متوسطة تعكس بنيته البلورية.

يظهر الجبس في أشكال بلورية متنوعة، وقد يكون شفافاً أو معتماً، ويتدرج لونه من الأبيض إلى الرمادي أو الوردي حسب الشوائب. كما يتميز بقدرته على امتصاص الماء، وهي خاصية تؤثر على سلوكه في التطبيقات البيئية [13,14].

ومن الخصائص المهمة أيضاً قابلية الجبس للتحويل الطوري عند التسخين، وهي خاصية تُستغل في تحضيره وتعديله. كما أن حجمه الحبيبي يؤثر بشكل مباشر على خصائصه السطحية، حيث أن الجسيمات الدقيقة توفر مساحة سطحية أكبر [14,16].

I-1-8 الخصائص الكيميائية للجبس

من الناحية الكيميائية، يُعتبر الجبس مركباً مستقرّاً نسبياً في الظروف العادية، إلا أنه يتفاعل مع الماء والحرارة بشكل مميز. فعند إذابته في الماء، يتحلل جزئياً إلى أيونات الكالسيوم (Ca^{2+}) والكبريتات (SO_4^{2-})، وهي عملية محدودة بسبب ذوبانيته المنخفضة [14,16].

كما يتأثر الجبس بدرجة الحموضة، حيث يمكن أن يذوب بشكل أكبر في الوسط الحمضي، بينما يبقى مستقرّاً نسبياً في الوسط القاعدي. وتلعب هذه الخاصية دوراً مهماً في عمليات الامتزاز، حيث تؤثر على تفاعل الجبس مع الأصباغ.

كما يمكن أن يتفاعل الجبس مع بعض المركبات الكيميائية لتكوين رواسب أو مركبات جديدة، وهو ما يمكن استغلاله في إزالة بعض الملوثات من المياه [13,14].

I-1-9 الخصائص السطحية للجبس (المسامية، المساحة السطحية)

تُعد الخصائص السطحية من أهم العوامل التي تحدد كفاءة الجبس في الامتزاز. وتشمل هذه الخصائص المساحة السطحية النوعية، حجم المسام، وتوزيعها، إضافة إلى طبيعة المواقع النشطة على السطح.

تتراوح المساحة السطحية للجبس الطبيعي بين 0.5 و 1 g/m^2 ، ويمكن زيادتها بشكل ملحوظ من خلال عمليات الطحن أو التفعيل، لتصل إلى أكثر من 5 g/m^2 . كما أن زيادة المسامية تُتيح دخول جزيئات الملوثات إلى داخل البنية، مما يزيد من كفاءة الامتزاز.

وتلعب الشحنة السطحية دوراً مهماً في تحديد نوع التفاعل مع الأصباغ، حيث تعتمد على درجة الحموضة وطبيعة المعالجة. وبالتالي، فإن التحكم في هذه الخصائص يُعد أمراً حاسماً في تحسين أداء الجبس كمادة ممتزة [13,14].

10-1-I سلوك الجبس في الوسط المائي

عند تواجد الجبس في الوسط المائي، يُظهر سلوكًا معقدًا يعتمد على عدة عوامل، منها درجة الحرارة، pH، وتركيز الأيونات. إذ يذوب الجبس جزئيًا، مما يؤدي إلى إطلاق أيونات Ca^{2+} و SO_4^{2-} وقد يُسهم ذلك في حدوث تفاعلات مع الملوثات.

كما يمكن أن يحدث امتصاص فيزيائي أو كيميائي لجزيئات الأصباغ على سطح الجبس، حيث تعتمد آلية الامتزاز على نوع الصبغة وشحنة السطح. وقد يؤدي وجود الماء إلى انتفاخ بسيط في البنية، مما يؤثر على المسامية.

ويُعد فهم هذا السلوك ضروريًا لتفسير نتائج التجارب وتحديد الظروف المثلى لعملية الامتزاز [13,14].

الجدول (1-I): الخواص الفيزيائية والبصرية للجبس [13]

الخاصية	القيمة / الوصف	ملاحظات علمية مرتبطة بالتطبيق
التصنيف المعدني	معادن الكبريتات (Sulfates)	ينتمي إلى مجموعة كبريتات الكالسيوم المائية
الصيغة الكيميائية	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	تحتوي على ماء بلوري مسؤول عن التحولات الحرارية
الكتلة المولية	172.17 g/mol	مهمة في الحسابات الستوكيومترية
النظام البلوري	أحادي الميل (Monoclinic)	يحدد ترتيب الذرات والخواص البصرية
المجموعة الفراغية	C2/c	تعكس تماثل البنية البلورية
الشكل البلوري	بلورات منشورية، ليفية، أو كتل ضخمة	يؤثر على المساحة السطحية
الانفصام (Cleavage)	تام في اتجاه (010)	يسهل تفكك البلورات أثناء الطحن
الصلابة (موس)	1.5 – 2	يدل على ليونته وسهولة معالجته ميكانيكياً
الكثافة النوعية	2.30 – 2.33 g/cm ³	تتأثر بنسبة الشوائب
اللون	أبيض، رمادي، وردي، أصفر	نتيجة وجود شوائب معدنية
المخدش (Streak)	أبيض	خاصية تشخيصية ثابتة
البريق (Luster)	زجاجي إلى حريري أو لؤلؤي	يرتبط بالبنية البلورية
الشفافية	شفاف إلى شبه شفاف	خاصة في نوع السيلينايت

المسامية	منخفضة إلى متوسطة (طبيعي)	تزداد بعد التفعيل
المساحة السطحية	($1 \text{ g/m}^2 - 0.5 \text{ g/m}^2$ طبيعي)	بعد المعالجة تصل إلى 5 g/m^2
الخواص البصرية	ثنائي المحور (Biaxial)	مهمة في التحليل المعدني
قرائن الانكسار	$n\alpha = 1.519 - 1.521$ $n\beta = 1.522 - 1.523$ $n\gamma = 1.529 - 1.530$	تدل على التباين البصري
الانكسار المزدوج (Birefringence)	$\delta \approx 0.008 - 0.010$	منخفض نسبياً مقارنة بمعادن أخرى
زاوية المحور البصري (2V)	$58^\circ - 60^\circ$ تقريباً	تتغير حسب النقاوة
التمدد الحراري	متوسط	يؤثر على الاستقرار الحراري
الذوبانية في الماء	$2 - 2.5 \text{ g/L}$ عند 25°C	ذوبانية محدودة مفيدة للامتزاز
درجة التحول الحراري	($100 - 180^\circ\text{C}$) نصف مائي	مهمة في التفعيل الحراري
التوصيل الحراري	منخفض	مفيد في التطبيقات العازلة
السلوك الميكانيكي	هش وسهل التفتت	يساعد في زيادة المساحة السطحية
الشحنة السطحية	pH تعتمد على	عامل أساسي في الامتزاز
قابلية الامتزاز	متوسطة (طبيعي) - عالية (معدل)	تتحسن بعد التفعيل

I-1-11 مخاطر الجبس وتأثيراته البيئية

رغم أن الجبس يُعتبر مادة آمنة نسبياً، إلا أن له بعض التأثيرات البيئية التي يجب أخذها بعين الاعتبار. إذ يمكن أن يؤدي التخلص غير السليم من مخلفاته إلى تلوث التربة والمياه، خاصة إذا كان يحتوي على شوائب صناعية.

كما أن الجبس المعاد تدويره قد يحتوي على آثار من المعادن الثقيلة أو المركبات العضوية، مما يستدعي معالجته قبل الاستخدام. إضافة إلى ذلك، فإن استنشاق غبار الجبس قد يُسبب مشاكل صحية للعاملين في مجال تصنيعه.

ومن جهة أخرى، يُعد استخدام الجبس في معالجة المياه خياراً بيئياً إيجابياً، حيث يُسهم في تقليل التلوث وتحسين جودة المياه، خاصة عند استخدامه بشكل مدروس ومراقب [24,25].

I-1-12 استخدامات الجبس

يُعد الجبس مادة متعددة الاستخدامات ذات أهمية كبيرة في الصناعات الكيميائية، البيئية، الغذائية، الزراعية والطبية، نظرًا لخواصه الفيزيائية والكيميائية الفريدة، والتي تشمل الكثافة المنخفضة، المسامية، الانحلال الجزئي في الماء، والتفاعل الكيميائي مع المركبات الأخرى. ويمكن تصنيف استخداماته إلى عدة مجالات رئيسية [6] :

I-1-12-1 صناعة مواد البناء

يُعتبر الجبس أحد أهم المواد الخام في قطاع البناء، حيث يُستخدم في تصنيع مجموعة واسعة من المنتجات، بما في ذلك [6] :

أ- **الأسمنت**: يدخل الجبس كمثبط للتصلب لتأخير زمن تصلب الأسمنت وتحسين خصائصه الميكانيكية [6,13].

ب- **ألواح الجبس (Drywall)**: تُستخدم لتغطية الجدران والأسقف، وتتميز بخفة الوزن والقدرة على عزل الصوت والحرارة [6,13].

ج- **جبس باريس (Plaster of Paris)**: مسحوق نصف مائي يُستخدم في أعمال الزخرفة والبناء السريع، ويتميز بسرعة تصلبه وتحقيقه للأسطح الملساء.

كما توجد أصناف خاصة من الجبس مثل صارية الساتان (Satinspar) والمرمر (Alabaster)، وتستخدم أساسًا في الأعمال الزخرفية والتماثيل الفنية نظرًا للسهولة في تشكيلها على الرغم من صلابتها المحدودة [6,13].

I-1-12-2 في مجال الزراعة

يمتلك الجبس الزراعي استخدامات عديدة لتحسين بنية التربة الطينية وتعزيز خصائصها الفيزيائية والكيميائية نذكر منها:

- تعديل التربة: يعمل على تفتيت الطبقات الصلبة، مما يسهل اختراق الجذور وامتصاص العناصر الغذائية.

- مكافحة الملوحة: يقلل من تراكم الأملاح الضارة ويعزز استيعاب النباتات للمغذيات.

- خفض سمية الألمنيوم: في التربة الحمضية، يحسن البيئة الكيميائية لنمو النباتات.

• تعزيز إنتاجية المحاصيل: يرفع الكفاءة الزراعية على المدى الطويل، على الرغم من أن تأثيره قد يستغرق حتى 2-3 سنوات ليصبح ملموسًا.

يُعتبر الجبس الزراعي خيارًا فعالًا لتحقيق الاستدامة البيئية والزراعية من خلال تحسين خصائص التربة بشكل مستمر دون الحاجة لاستخدام الأسمدة الكيميائية بشكل مفرط [26].

I-12-3 في المجال الطبي

لعب الجبس دورًا مهمًا في التطبيقات الطبية التقليدية والحديثة نظرًا لخواصه الفيزيائية والكيميائية: طب الأسنان: يُستخدم في تصنيع القوالب السنية لتحديد مقاسات الأسنان بدقة، وإعداد التعويضات الصناعية.



الشكل (I-14): استخدام الجبس في تحضير القوالب السنية [27]

• جراحة العظام: يعد الجبس من المواد الأساسية لتجبير العظام المكسورة وتصحيح التشوهات، حيث يُطبق مباشرة بعد مزجه بالماء لتكوين عجينة سريعة التصلب تتصلب ضمن 10-15 دقيقة.

• الأمراض الجلدية: يمكن استخدامه موضعيًا لعلاج التهابات الجلد، الأكزيما، الحروق والتقرحات الجلدية، كما يمكن خلطه بمستخلصات نباتية لزيادة الفعالية العلاجية.

• التغذية الطبية: مصدر غني بالكالسيوم (23-29%)، مما يعزز صحة العظام والأسنان، ويدعم مكملات فيتامين D للوقاية من هشاشة العظام [28].

وللجبس خواص كيميائية مفيدة في مجال الطب نذكر منها:

- قابلية الجبس للتفاعل مع الماء لإنتاج الجبس النصف مائي، ما يسمح بتشكيل قوالب متينة وسريعة التصلب.
- خمول كيميائي نسبي يحافظ على سلامة الأنسجة المحيطة عند استخدامه موضعياً.
- قابلية التعديل السطحي لاستيعاب إضافات طبية أو غذائية لتعزيز الوظائف العلاجية [28].
- يتضح أن الجبس مادة متعددة الأغراض، تجمع بين الخواص الفيزيائية، الكيميائية، والوظيفية، ما يجعلها أساسية في:
- البناء: تحسين التصميم الداخلي، العزل، مقاومة الحريق، والتزيين.
- الغذاء: تحسين الدقيق، تعزيز المكملات الغذائية، وتطبيقات خاصة في بعض الصناعات الآسيوية [13,26].
- الزراعة: تعديل التربة، مكافحة الملوحة، تحسين الإنتاجية، وتقليل سمية المعادن الثقيلة.
- الطب: تجبير العظام، تصنيع القوالب السنية، معالجة الأمراض الجلدية، ودعم التغذية بالكالسيوم [6,26].
- توضح هذه الاستخدامات تنوعية الجبس، والتي ترتبط ارتباطاً وثيقاً بخصائصه الكيميائية والفيزيائية، مما يجعله مادة استراتيجية في التطبيقات الصناعية والبيئية والطبية الحديثة، خصوصاً عند العمل على تعديله أو تفعيله لتحسين الامتزاز والكفاءة الوظيفية في إطار الدراسات الكيميائية المتقدمة [13,26].

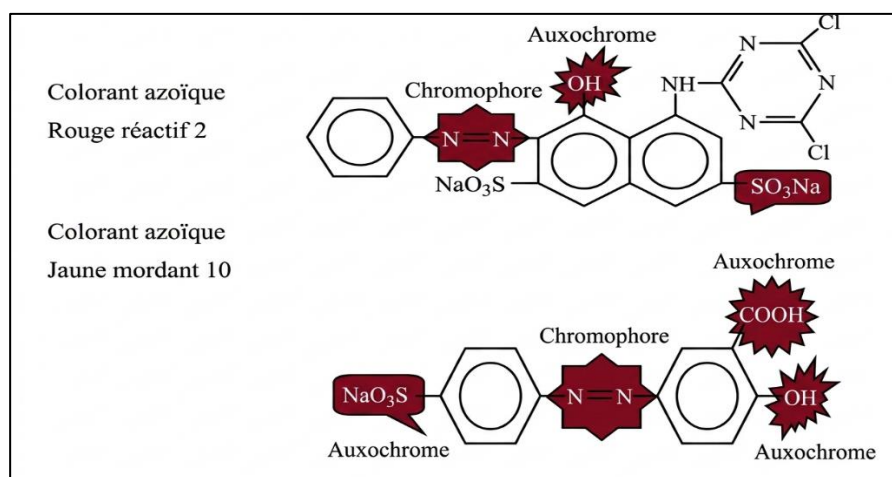
2-I- الأصباغ:

1-2-I- تعريف الأصباغ:

تُعد الأصباغ مركبات كيميائية تمتاز بخصائص لونية واضحة، ولها القدرة على الارتباط بالعديد من أنواع الأسطح المختلفة، مما يؤدي إلى إكساب هذه الأسطح درجات لونية مميزة ومرئية بشكل واضح. ولا يقتصر دور الأصباغ على منح اللون فقط، بل تمتد وظيفتها لتشمل حماية السطوح المصبوغة من مختلف العوامل البيئية الخارجية، مثل التعرض المستمر للإشعاعات الضوئية، والتأثيرات المؤكسدة الناتجة عن الأكسجين، بالإضافة إلى مقاومة التأثيرات الكيميائية للأحماض والقواعد، وكذلك التغيرات الناتجة عن عمليات الغسل المتكررة التي قد تؤدي إلى تدهور اللون أو زواله مع الزمن [29].

ومن الناحية البنوية، تتكون جزيئات الأصباغ من منظومة كيميائية تعتمد أساسًا على وجود مجموعتين رئيسيتين تتحكمان في سلوكها الفيزيائي والكيميائي. تتمثل المجموعة الأولى في الكروموفورات (Chromophores)، وهي المسؤولة بشكل مباشر عن ظهور اللون، وذلك من خلال قدرتها على امتصاص الضوء ضمن المجال المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي، مما يؤدي إلى انعكاس اللون الملاحظ. أما المجموعة الثانية فتتمثل في الأوكسوكرومات (Auxochromes)، والتي لا تنتج اللون بشكل مباشر، وإنما تلعب دورًا مهمًا في تعزيز شدة اللون وتحسين ثباته، بالإضافة إلى زيادة قدرة جزيء الصبغة على الارتباط والتفاعل مع الأسطح المختلفة.

وفي إطار تصنيف الأصباغ، يُعتمد بشكل أساسي على معيار شدة اللون (كما هو موضح في الجدول (2- I)، حيث تتميز هذه المركبات بقدرتها على امتصاص الإشعاع الضوئي ضمن المجال المرئي الذي يتراوح بين 380 nm و 750 nm، وهو المجال المسؤول مباشرة عن تحديد اللون الذي تتركه العين البشرية، وبالتالي فإن اختلاف الامتصاص داخل هذا النطاق يؤدي إلى تنوع كبير في الألوان الظاهرة [30].



الشكل (15-I): يوضح أمثلة لمجموعات Chromophore و Auxochrome [31]

الجدول (2-1): أهم مجموعات Chromophore و Auxochrome مصنفة حسب زيادة الشدة [32]

مجموعات حامل اللون (Chromophore)	مجموعات معزز اللون (Auxochromes)
أزو (Azo (-N=N-))	أمينو (Amino (-NH ₂))
نيتروزو (Nitroso (-N-OH أو -NO))	ميثيل أمينو (Methylamino (-NHCH ₃))
كربونيل (Carbonyl (=C=O))	ثنائي ميثيل أمينو (Dimethylamino (-N(CH ₃) ₂))
فينيل (Vinyl (-C=C-))	هيدروكسيل (Hydroxyl (-OH))
نيترو (Nitro (=N-OH أو -NO ₂))	ألكوكسيل (Alkoxy (-OR))
سلفر (Sulphure (>C=S))	مجموعات مانحة للإلكترونات

2-2-I - مصادر الأصباغ :

I - 2-2-1- الأصباغ الطبيعية:

تُستخلص الأصباغ الطبيعية من مصادر طبيعية، وبناءً على أصلها تُصنّف بشكل عام إلى أصباغ نباتية، وحيوانية، ومعدنية، على الرغم من أن النباتات تُعد المصدر الرئيسي للأصباغ الطبيعية [33]

أ - الأصباغ النباتية :

تُعد النباتات من أهم المصادر الطبيعية للأصباغ، حيث استُخدمت منذ العصور القديمة في عمليات الصباغة واستخلاص المواد الملونة. ويتم الحصول على هذه الأصباغ من أجزاء مختلفة من النبات مثل الجذور، السيقان، اللحاء، الأوراق، الأزهار، الثمار، والبذور، إذ تحتوي هذه الأجزاء على مركبات ملونة يمكن استغلالها في تطبيقات الصباغة المختلفة. كما قد يعطي النبات الواحد أكثر من لون تبعاً للجزء المستعمل منه، إضافةً إلى تأثير درجة اللون بعوامل متعددة مثل نوع التربة، موسم الحصاد، وظروف الزراعة [34] ومن بين أهم النباتات المستخدمة في استخلاص الأصباغ الطبيعية: خشب السَّبان (Sappan Wood) ، والقرطم (Safflower) ، والزعفران (Saffron) ، والكرم (Turmeric) ، وقشور الرمان (Pomegranate) و القطيفة (Marigold) [38].

ب- الأصباغ الحيوانية :

تعد الحشرات والرخويات من أهم المصادر الحيوانية للأصبغ الطبيعية ، و من أبرزها الحشرات القشرية والحلزونات البحرية وحشرة اللاك ، و التي تتميز باحتوائها على مركبات ملونة قوية مثل مشتقات الانثراكينون. وقد استعملت هذه الأصباغ في صباغة المنسوجات ومستحضرات التجميل وتلوين الاغذية، الا ان الاعتماد عليها تراجع تدريجيا مع انتشار الاصباغ الصناعية الحديثة [35].

ج - الأصباغ المعدنية :

استُخدمت الأصباغ المعدنية الطبيعية أيضًا في عمليات التلوين، ومن أبرز المركبات المستخدمة في هذا المجال الزنجفر، والمغرة الحمراء والصفراء، والملكيت الخام، والأزرق الفائق، والأزوريت، والتلك، والأسود الفحمي. وغالبًا ما كانت تُدمج هذه الأصباغ مع الصمغ باعتباره مادة رابطة، مما جعلها ملائمة للتطبيق في اللوحات الفنية والجداريات. ويُستثنى من هذا الاستخدام المغرة الحمراء، التي خُصصت تاريخيًا من قبل الرهبان لتلوين ملابسهم [33].

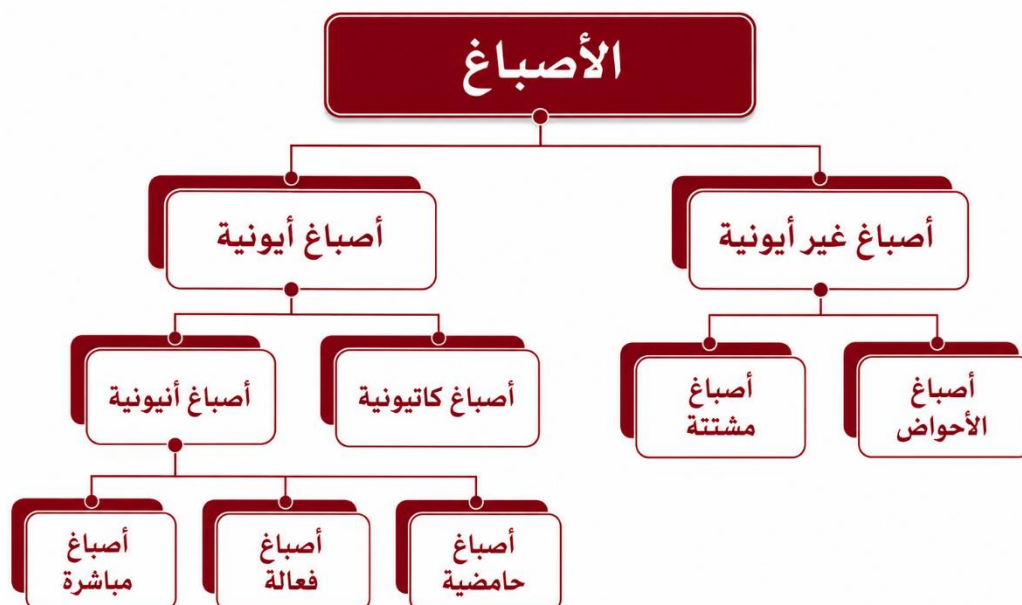
I-2-2-2- الأصباغ الاصطناعية:

الأصبغ الاصطناعية (Synthetic Dyes) هي مركبات كيميائية عضوية أو غير عضوية يتم إنتاجها معملياً وصناعياً من مشتقات البترول وقطران الفحم. تُستخدم هذه المركبات لإضافة ألوان ثابتة ومكثفة على مختلف المواد مثل الأنسجة، الأطعمة، والمستحضرات الطبية. تمتاز بكونها تفوق الأصباغ الطبيعية من حيث ثبات اللون، التنوع، وانخفاض تكلفة الإنتاج [36].

I-2-3- تصنيف الأصباغ:

أ- التصنيف بناءً على شحنة الأيون :

يمكن تصنيف الأصباغ حسب تركيبها الكيميائي، أو مجموعاتها الوظيفية، أو شحنة الأيون عند ذوبانها في الماء. وبما أن شحنة الأيون تلعب دوراً كبيراً في عملية الامتزاز، حيث تنقسم إلى أصباغ أيونية وغير أيونية [37، 38].



الشكل (I-16): رسم تخطيطي يبين تصنيف الأصباغ بناءً على شحنة الأيون [36]

الأصبغ الكاتيونية (وتسمى أيضاً الأصباغ القاعدية): قابلة للذوبان في الماء بسهولة، وتظهر ألوانها بوضوح حتى في التراكيز الضعيفة جداً.

الأصبغ الأنيونية: تحمل شحنات موجبة في تركيبها، ويعود ذلك إلى وجود فائض من أيونات الهيدروكسيل (OH^-) في المحلول المائي.

الأصبغ التفاعلية: هي أكثر فئات الأصباغ انتشاراً، وتتميز بقدرتها على الذوبان في الماء وسرعة تفاعلها مع الألياف.

الأصبغ المباشرة : قابلة للذوبان في الماء، وتُعتبر أبسط مجموعات الأصباغ من حيث التركيب والاستخدام.

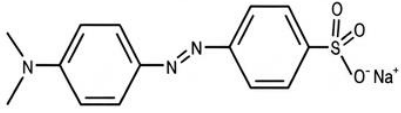
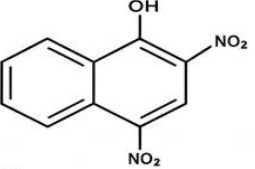
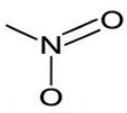
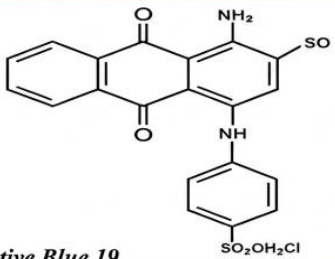
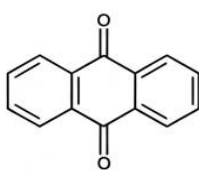
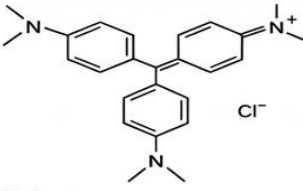
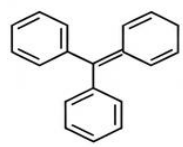
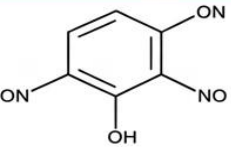
الأصبغ الحمضية : قابلة للذوبان في الماء، وتوصف بأنها أصباغ لاذعة ومعدنة.

أصبغ الأحواض : غير قابلة للذوبان في الماء، وهي من أقدم أنواع الأصباغ المعروفة، كما أنها الأكثر تعقيداً من الناحية الكيميائية.

الأصبغ المشتتة: ضعيفة الذوبان في الماء، ويتركز استعمالها غالباً على ألياف البوليستر [39، 40، 41].

ب- تصنيف حسب التركيب الكيميائي:

الجدول (I-3): تصنيف حسب التركيب الكيميائي [42]

مثال	مجموعة حامل اللون (Chromophore)	الفئة
 <i>Methyl Orange</i>	—N=N—	أصباغ الأزو <i>Azo Dyes</i>
 <i>Acid Yellow 24</i>		أصباغ النيترو <i>Nitro Dyes</i>
 <i>Reactive Blue 19</i>		أصباغ أنثراكينون <i>Anthraquinone Dyes</i>
 <i>Crystal Violet</i>		أصباغ ثلاثي فينيل ميثان <i>Triphenyl methane Dyes</i>
 <i>Fast Green O</i>	—N=O	أصباغ النيتروزو <i>Nitroso Dyes</i>

I-2-4- صبغة أحمر الكونغو:

يُعتبر أحمر الكونغو (Congo Red)، والذي يُرمز له اختصارًا بـ CR، واحدًا من أهم الأصباغ التابعة لمجموعة الأصباغ الأزوية الأنيونية، حيث يحتل مكانة بارزة في مجالي الكيمياء التحليلية والصناعية على حد سواء. ويتميز هذا المركب بانتشاره الواسع في التطبيقات المخبرية والصناعية نظرًا لخصائصه الكيميائية والفيزيائية المميزة التي تجعله مناسبًا لعدد كبير من الاستخدامات. وقد تم تطوير هذا الصبغ لأول مرة من قبل العالم بوتيجر (Paul Böttiger)، وكان الهدف الأساسي من تصنيعه في البداية هو استعماله كصبغة

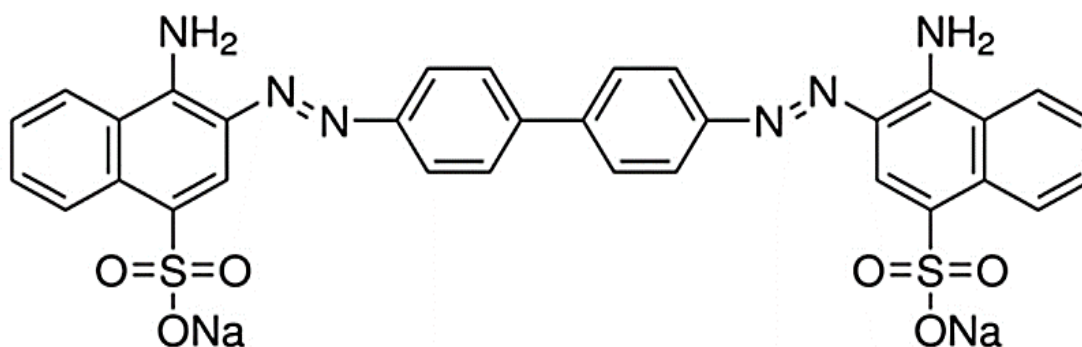
في الصناعات النسيجية، غير أن مجالات استخدامه لم تقتصر على هذا المجال فقط، بل توسعت لاحقاً لتشمل تطبيقات متعددة ومهمة في الكيمياء التحليلية، لاسيما استعماله كمؤشر كيميائي فعال يُستخدم للكشف عن التغيرات في الرقم الهيدروجيني (pH) داخل المحاليل المختلفة. ويتميز هذا المركب كذلك ببنية كيميائية معقدة نسبياً ناتجة عن تعدد الروابط والمجموعات الوظيفية ضمن تركيبه، الأمر الذي يمنحه استقراراً ملحوظاً وسلوكاً كيميائياً مميزاً في الأوساط المختلفة. كما يمتاز بخصائص لونية واضحة وقوية تجعله سهل التتبع والملاحظة أثناء التفاعلات المخبرية. وبفضل هذه الخصائص مجتمعة، أصبح أحمر الكونغو من المركبات واسعة الاستخدام في العديد من المجالات، سواء في الأبحاث العلمية المخبرية أو في التطبيقات الصناعية، خاصة في الدراسات المرتبطة بظواهر الامتزاز والتفاعلات السطحية وديناميكية التفاعل بين الأصباغ والمواد المختلفة [43].

I-4-2-1- تحضيرها:

يتم تحضير صبغة أحمر الكونغو (CR) ذات الصيغة الكيميائية $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$ عبر سلسلة من التفاعلات الكيميائية المنظمة التي تعتمد أساساً على دمج جزيئين من حمض النفثيلين سلفونيك مع مركب رباعي أزوتيد البنزدين. وتتم هذه العملية في وسط تفاعلي مناسب يسمح بحدوث الاقتران الكيميائي بين المكونات الأولية، مما يؤدي إلى تكوين البنية الأساسية للصبغة.

في المرحلة الأولى من هذا التفاعل، يتشكل مركب وسيط غير مستقر نسبياً يتميز بلون أزرق ناتج عن البنية المؤقتة للجزيء خلال سير التفاعل. وبعد ذلك يخضع هذا الوسيط إلى خطوة معالجة كيميائية إضافية تتمثل في عملية التملح باستخدام كلوريد الصوديوم، وهي مرحلة أساسية تهدف إلى تثبيت البنية الجزيئية وتحسين استقرار المركب النهائي.

ومع اكتمال هذه المراحل التفاعلية، يتم الحصول على الصيغة النهائية لصبغة أحمر الكونغو في شكلها الأحمر المستقر من حيث اللون والبنية الكيميائية. وتُعد هذه السلسلة من التفاعلات مثلاً كلاسيكياً وواضحاً على آلية تكوين أصباغ الأزو، حيث تمر المركبات بعدة مراحل وسيطة قبل الوصول إلى الشكل النهائي الذي يتميز بالاستقرار اللوني والكيميائي العالي [43].



الشكل (I-17): التركيب الكيميائية لأحمر الكونغو CR [43].

I-2-4-2- خصائصها الكيميائية والفيزيائية:

تُظهر صبغة أحمر الكونغو مجموعة من الخصائص الفيزيائية والكيميائية المميزة التي تفسر بشكل كبير اتساع نطاق استخدامها في المجالات الصناعية والتطبيقات المخبرية المختلفة. إذ تتميز هذه الصبغة بسلوك كيميائي مستقر نسبياً، إضافة إلى خصائص لونية واضحة وقدرة جيدة على التفاعل مع الأوساط المختلفة، مما يجعلها مادة مناسبة للعديد من الدراسات والتجارب. وفي هذا السياق، يقدم الجدول (4-I) عرضاً مختصراً ومنظماً لأهم هذه الخصائص الأساسية التي تميز هذا المركب [44].

الجدول (4-I): الخصائص الكيميائية والفيزيائية لأحمر الكونغو [45]

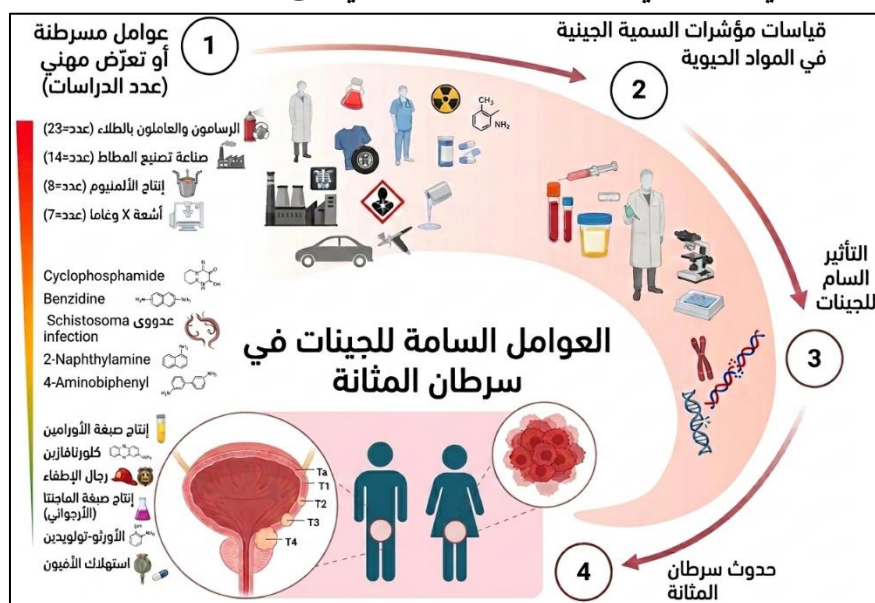
الخاصية Characteristic	القيمة Indication
التسمية النظامية IUPAC name	Disodium-4-amino-3-[[4-[4-[(1-amino-4-sulfonatophthalen-2-yl) diazenyl]phenyl]phenyl] diazenyl]naphthalene-1-sulfonate
الصيغة الجزيئية Molecular Formula	C ₃₂ H ₂₂ N ₆ Na ₂ O ₆ S ₂
الكتلة المولية (g mol ⁻¹) Molar mass	696.664
عائلة الصبغة Dye family	حمضية Acidic
الذوبانية في المذيبات (mg L ⁻¹) Solubility in solvents	1.16×10 ⁵ mgL ⁻¹ في الماء 25° C mL ⁻¹ mg 1.0 في الإيثانول
الطول الموجي (nm) Wavelength	497 = λ _{max}

I-2-4-3- سميتها:

نظراً للاستخدام الواسع والمتزايد لصبغة أحمر الكونغو (CR) في التطبيقات الصناعية والبحثية، فإن تقييم آثارها السمية المحتملة يُعد أمراً بالغ الأهمية من الناحية البيئية والصحية، رغم ما يرافقه من تعقيد علمي في التحليل والتقدير. وقد أظهرت العديد من الدراسات وجود تأثيرات سلبية متعددة لهذه الصبغة على الكائنات الحية عند التعرض لها، خاصة عند التركيزات المرتفعة.

تؤثر صبغة أحمر الكونغو بشكل مباشر على صحة الإنسان، حيث قد تسبب مجموعة من الاضطرابات التي تتراوح بين تأثيرات خلوية وجهازية، مثل السمية الجينية، السمية الدموية، والسمية

العصبية، بالإضافة إلى اعتبارها مادة محتملة التسرطن ومطفرة وراثيًا. كما يمكن أن تؤثر على عدة أعضاء حيوية في الجسم، من بينها العينان، الجلد، الجهاز التنفسي، والجهاز التناسلي. ويرتبط الخطر الصحي لهذه الصبغة بشكل خاص بوجود مركب البنزيدين الناتج عنها أو المرتبط ببنيته، حيث يُعد هذا المركب من المواد السامة والمسرطنة، خاصة فيما يتعلق بسرطان المثانة، إذ يمكنه الارتباط تساهميًا بالجزيئات الحيوية داخل الخلايا، مما يؤدي إلى تعطيل وظائفها الطبيعية [46].



الشكل (I-18): العوامل الجينية السامة (Genotoxic Agents) المرتبطة بسرطان المثانة [47].

وقد بينت الدراسات التجريبية على الحيوانات أن المركبات المعتمدة على البنزيدين قد تؤدي إلى ظهور أورام خلوية مثل سرطان الخلايا الكبدية وساركوما الطحال، إضافة إلى حدوث تشوهات نووية واضطرابات كروموسومية في خلايا الثدييات. كما يمكن أن يؤدي التعرض لهذه الصبغة إلى اضطرابات دموية مثل تجمع الصفائح الدموية، نقص الصفائح، وحدث التخثر المنتشر داخل الأوعية الدقيقة نتيجة انخفاض محتوى بروتينات الدم.

ومن الناحية الكيميائية الحيوية، فإن بعض أصباغ الآزو تتطلب عمليات اختزال تؤدي إلى تفكك رابطة الآزو وتكوين أمينات عطرية (Aromatic Amines)، والتي تُعد من المركبات ذات الخطورة العالية. كما تم تسجيل تأثيرات سمية لهذه الصبغة على عدة كائنات حية دقيقة ونماذج بيئية مختلفة، مثل البكتيريا *Vibrio fischeri*، والطحالب الدقيقة *Selenastrum capricornutum*، والهدبيات *Tetrahymena pyriformis*، والقشريات مثل *Daphnia magna* و *Ceriodaphnia rigaudi*، حيث تختلف درجة السمية باختلاف النوع والتركيز والظروف البيئية المحيطة [56].

I-2-5- تقنيات المعالجة:

نظرًا للطبيعة المعقدة وغير المتجانسة (الهتروجينية) لمياه الصرف الصناعي، خاصة تلك الناتجة عن الصناعات النسيجية والصباغية، فإن معالجتها لا يمكن أن تتم عبر خطوة واحدة فقط، بل تتطلب تصميم منظومة متكاملة ومتعددة المراحل من وحدات المعالجة. ويهدف هذا التكامل إلى ضمان إزالة فعالة لمختلف أنواع الملوثات، سواء كانت عضوية، غير عضوية، ذائبة أو عالقة، إضافة إلى تقليل التأثيرات البيئية والصحية الناتجة عنها [48].

وتبدأ عملية المعالجة عادةً بمرحلة أولية تُعد ضرورية لتحضير المياه للمعالجة اللاحقة، حيث يتم خلالها التخلص من المواد الصلبة الكبيرة وغير الذائبة. ويتم ذلك باستخدام عمليات فيزيائية بسيطة مثل الغرلة لإزالة المواد الخشنة، وإزالة الحصى للحد من الجزيئات الثقيلة، إضافة إلى فصل الزيوت والشحوم التي قد تعيق العمليات اللاحقة. وفي بعض الحالات الأكثر تعقيدًا، يتم دعم هذه المرحلة بتقنيات فيزيائية-كيميائية تساعد على تحسين كفاءة الفصل بين الطور الصلب والطور السائل، مما يضمن استقرار جودة المياه قبل الانتقال إلى المراحل المتقدمة [48].

بعد هذه المرحلة التمهيدية، تدخل المياه في سلسلة من المعالجات الأكثر تخصصًا، والتي تختلف حسب طبيعة الملوثات وتركيزها، وحسب الهدف النهائي من المعالجة. وفي سياق الصناعات النسيجية تحديدًا، حيث تكون الأصباغ العضوية من أهم الملوثات وأكثرها مقاومة للتحلل، يتم الاعتماد على ثلاث مجموعات رئيسية من التقنيات، وهي الطرق الكيميائية، والطرق الفيزيائية، والطرق البيولوجية. ويُعتبر هذا التقسيم أساسيًا في دراسات معالجة مياه الصرف، نظرًا لاختلاف آليات العمل بين هذه الفئات وتكاملها في تحقيق إزالة شاملة للملوثات [48].

I-2-5-1- الطرق الكيميائية:

تُعد الطرق الكيميائية من أهم الأساليب المستخدمة في معالجة مياه الصرف الصناعي، حيث تعتمد على إحداث تفاعلات كيميائية مباشرة أو غير مباشرة تعمل على تحويل الملوثات إلى مركبات أقل سمية أو أقل استقرارًا، أو إلى أشكال يمكن فصلها بسهولة من الوسط المائي. وتتميز هذه الطرق بقدرتها على التعامل مع المركبات العضوية المعقدة مثل الأصباغ، والتي يصعب تفكيكها بالطرق الفيزيائية وحدها [48]. ومن أبرز العمليات الكيميائية المستخدمة في هذا المجال الأكسدة الكيميائية المتقدمة (Advanced Oxidation Processes)، والتي تعتمد على إنتاج جذور حرة شديدة التفاعل قادرة على تكسير الروابط العضوية المعقدة في جزيئات الأصباغ. ويتم ذلك باستخدام مؤكسدات قوية مثل بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، والأوزون (O_3)، والكلور (Cl_2)، حيث تؤدي هذه المواد إلى تفكيك البنية الجزيئية للملوثات وتحويلها إلى مركبات أبسط وأقل ضررًا أو إلى ثاني أكسيد الكربون وماء في بعض الحالات المثالية [48].

كما تشمل هذه الفئة تقنية التبادل الأيوني، والتي تعتمد على استخدام راتنجات صناعية متخصصة قادرة على تبادل الأيونات الموجودة في المحلول مع أيونات أخرى أقل ضرراً. وتستخدم هذه الطريقة بشكل خاص في إزالة الأيونات الملونة أو المعادن الثقيلة، حيث تتميز بدقة عالية في الانتقاء ولكنها قد تتطلب تجديدًا دوريًا للراتنجات المستخدمة [48].

إضافة إلى ذلك، توجد تقنية تكوين المعقدات الكيميائية، والتي تعتمد على إضافة مواد كيميائية تتفاعل مع الملوثات لتكوين معقدات غير ذائبة أو أقل ذوبانًا، مما يسهل عملية فصلها لاحقًا بالترسيب أو الترشيح. وتستخدم هذه التقنية بشكل مكمل للعمليات الأخرى لتحقيق إزالة أكثر شمولاً للملوثات ورغم فعالية هذه الطرق، إلا أن تطبيقها على نطاق واسع قد يواجه بعض التحديات، مثل ارتفاع التكلفة التشغيلية، أو الحاجة إلى التحكم الدقيق في ظروف التفاعل، أو إنتاج نواتج ثانوية تتطلب معالجة إضافية قبل التصريف النهائي [48].

I-2-5-2- الطرق الفيزيائية:

تُعتمد الطرق الفيزيائية في معالجة مياه الصرف على استخدام خصائص المادة الفيزيائية مثل الحجم، الكثافة، الذوبانية، والشحنة السطحية، دون إحداث تغييرات كيميائية مباشرة في تركيب الملوثات. وتعتبر هذه الطرق من أكثر المراحل استخدامًا في أنظمة المعالجة المتكاملة، نظرًا لبساطتها النسبية وانخفاض تكلفتها التشغيلية

ومن أهم هذه العمليات الامتزاز (Adsorption)، والذي يُعد من أكثر التقنيات كفاءة وانتشارًا في إزالة الأصباغ العضوية من المياه. تعتمد هذه العملية على انتقال جزيئات الملوث من الطور السائل إلى سطح مادة صلبة تُعرف بالماز (Adsorbent)، حيث يتم احتجاز الجزيئات على سطحه بفعل قوى فيزيائية أو كيميائية. وتتميز هذه التقنية بقدرتها على إزالة تراكيزات منخفضة وعالية من الملوثات، كما أن فعاليتها تتأثر بعدة عوامل مثل مساحة السطح النوعية للماز، طبيعة الأصباغ، درجة الحرارة، ودرجة الحموضة (pH)، إضافة إلى زمن التماس بين الملوث والماز [48].

وتأتي بعد ذلك عملية الترسيب (Sedimentation)، والتي تعتمد على فصل الجسيمات العالقة بفعل الجاذبية الأرضية. حيث تترسب الجزيئات ذات الكثافة الأعلى تدريجيًا في قاع الحوض، مما يسمح بفصلها عن الماء. وفي معالجة مياه الصرف الصباغية، غالبًا ما يتم تعزيز هذه العملية عبر دمجها مع التخثير أو المعالجة الكيميائية، بهدف تكوين جسيمات أكبر حجمًا وأكثر استقرارًا، مما يسهل ترسيبها. ومع ذلك، فإن هذه العملية قد تؤدي إلى إنتاج كميات معتبرة من الحمأة الثانوية، والتي تتطلب بدورها معالجة أو التخلص آمنًا.

كما تشمل الطرق الفيزيائية تقنية التعويم (Flotation)، والتي تعتمد على إدخال فقاعات غازية دقيقة داخل الوسط السائل. ترتبط الجزيئات الملوثة بسطح هذه الفقاعات نتيجة التفاعلات السطحية، ثم تصعد

إلى السطح مكونة طبقة رغوية يمكن إزالتها بسهولة. وغالبًا ما يتم تحسين هذه العملية باستخدام مواد خافضة للتوتر السطحي أو إضافات أيونية تساعد على زيادة ارتباط الملوثات بالفقاعات، مما يرفع من كفاءة الفصل [48].

وتُستخدم كذلك عملية التخرثر (Coagulation)، والتي تهدف إلى زعزعة استقرار الجسيمات الغروية الدقيقة الموجودة في المياه، والتي تتميز عادة بشحنات سطحية تمنعها من التجمع. ويتم ذلك عبر إضافة مواد مخثرة تعمل على معادلة هذه الشحنات وتقليل قوى التنافر بينها، أو عبر تطبيق التخرثر الكهربائي باستخدام أقطاب معدنية، أو من خلال تعديل قيمة الرقم الهيدروجيني (pH) للمحلول. ونتيجة لذلك، تتكون تكتلات أكبر حجمًا تُعرف بالليديات (Flocs)، يسهل فصلها لاحقًا بالترسيب أو الترشيح.

أما الفصل الغشائي (Membrane Filtration)، فهو من التقنيات الحديثة والمتقدمة نسبيًا، ويعتمد على استخدام أغشية نصف نفاذة تسمح بمرور الماء وتمنع مرور الجزيئات الملوثة حسب حجم مسام الغشاء المستخدم. وتختلف هذه التقنية حسب نوعها (الترشيح الدقيق، الفائق، التناضح العكسي)، حيث يمكن الحصول على مياه ذات جودة عالية جدًا عند استخدام أغشية دقيقة. وتتميز هذه التقنية بإمكانية دمجها في مراحل متعددة من المعالجة، إلا أن من أهم تحدياتها ارتفاع التكلفة واحتمال انسداد الأغشية بمرور الوقت [48].

I-2-5-3- الطرق البيولوجية:

تُعد المعالجة البيولوجية من أكثر الطرق الطبيعية استخدامًا في تنقية مياه الصرف، حيث تعتمد على النشاط الحيوي للكائنات الدقيقة مثل البكتيريا، والخمائر، والفطريات، وحتى بعض أنواع الطحالب، في تحليل وتفكيك المواد العضوية القابلة للتحلل. وتتم هذه العمليات في ظروف مختلفة، إما هوائية بوجود الأكسجين، أو لاهوائية في غياب الأكسجين، أو عبر أنظمة هجينة تجمع بين الحالتين، حسب طبيعة الملوثات المستهدفة [48].

وقد أثبتت العديد من الدراسات أن بعض السلالات البكتيرية تمتلك قدرة ملحوظة على إزالة الأصباغ من المحاليل المائية، سواء عبر الامتزاز الحيوي على سطح الخلايا أو عبر التحلل الإنزيمي للمركبات العضوية. كما تم تسجيل دور فعال لبعض أنواع الخمائر في تفكيك الجزيئات الصباغية وتحويلها إلى مركبات أقل تعقيدًا.

إضافة إلى ذلك، تم تحديد بعض أنواع الطحالب القادرة على استخدام الأصباغ الأزوية كمصدر للكربون أو الطاقة، مما يعزز دورها في المعالجة البيولوجية. أما في مجال الفطريات، فقد برز فطر العفن الأبيض *Phanerochaete chrysosporium* كأحد أهم الكائنات الدقيقة القادرة على تفكيك الأصباغ العضوية، خاصة أصباغ الآزو، وذلك بفضل إنتاجه لإنزيمات مؤكسدة قوية قادرة على تكسير الروابط الكيميائية المعقدة.

ورغم الفعالية البيئية والاقتصادية لهذه الطرق، إلا أن تطبيقها على نطاق صناعي واسع لا يزال يواجه بعض القيود، مثل الحساسية تجاه التغيرات البيئية (درجة الحرارة، pH)، والحاجة إلى فترات معالجة طويلة نسبياً، إضافة إلى صعوبة التحكم الكامل في استقرار المجتمعات الميكروبية عند معالجة كميات كبيرة من المياه العادمة

وبناءً على ذلك، فإن تقنية الامتزاز تظل من أكثر الحلول الواعدة في معالجة مياه الصرف الصباغية، نظراً لبساطتها النسبية، وفعاليتها العالية، وإمكانية تطوير مواد مازة منخفضة التكلفة وذات كفاءة امتصاص مرتفعة، مما يجعلها خياراً استراتيجياً في هذا المجال [48].

قائمة المراجع

المراجع العربية

- [8] الرباعي، زيدون إحسان، والجماز، نوره عبد الله. (2025). البُعد البصري للخط العربي: قبة الصخرة أنموذجًا (The Visual Dimension of Arabic Calligraphy: The Dome of the Rock as a Model). المجلة العلمية بكلية الآداب، العدد 61، أكتوبر 2025. الرابط: https://jartf.journals.ekb.eg/article_462203
- [9] مديرية السياحة والصناعة التقليدية لولاية باتنة (MTA باتنة). (د.ت). ضريح إمدغاسن. <https://batna.mta.gov.dz/%D8%B6%D8%B1%D9%8A%D8%AD-%D8%A7%D9%85%D8%AF%D8%BA%D8%A7%D8%B3%D9%86> تم الاطلاع عليه بتاريخ 17 مايو 2026.

[40] أمينة سعد علي ماضي، جواهر عثمان سالم عصر، (2018)، تخليق وتوصيف مسحوق حبيبات أكسيد السبيل النانوية المغناطيسية من نوع فيرايت الكوبلت المطعم بالموليبدنوم والمحضر بطريقة السول جل واستخدامها في إزالة صبغة الكونغو الأحمر من المحاليل المائية، شهادة بكالوريوس، جامعة سبها، كلية العلوم.

[42] بسي حليلة، نصيرة صفاء، نصرات هبة. دراسة مقارنة لامتزاز صبغتين مختلفتين (كاتيونية وأنيونية) على مواد نباتية، مذكرة ماستر أكاديمي في الكيمياء، تخصص كيمياء عضوية، كلية العلوم الدقيقة، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر، 2021-2022.

المراجع الأجنبية

- [1] Kingery, W. D., Vandiver, P. B., & Prickett, M. (1988). The beginnings of pyrotechnology, Part II: Production and use of lime and gypsum plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East. *Journal of Field Archaeology*, 15(2), 219–244.
- [2] Regourd, M., Deloye, F. X., & Martinet, G. (1988). Microstructure of mortars from three Egyptian pyramids. *Cement and Concrete Research*, 18(1), 81–90. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90124-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90124-X)
- [3] BBC News عربي Accessed on May 20, 2026. <https://www.bbc.com/arabic/art-and-culture-46697566>

- [4] Hirst, K. K. (2019). The Tell Asmar sculpture hoard of prayerful people. ThoughtCo. <https://www.thoughtco.com/tell-asmr-sculpture-hoard-169594> Accessed on 16 May 2026.
- [5] The Metropolitan Museum of Art. (n.d.). Human-headed winged bull (lamassu) [Object 32.143.1]. Ancient West Asian Art Department. <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/322608> Accessed on 14 May 2026.
- [6] Charola, A. E., Pühringer, J., & Steiger, M. (2007). Gypsum: A review of its role in the deterioration of building materials. *Environmental Geology*, 52, 339–352. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0566-9>
- [7] Smarthistory. (n.d.). The rediscovery and impact of the Domus Aurea. <https://smarthistory.org/rediscovery-domus-aurea-renaissance-grotesque/> Accessed on May 21, 2026.
- [10] HiSoUR. (n.d.). Galerie François I, Palace of Fontainebleau, Seine-et-Marne, France. HiSoUR – Hi So You Are. <https://www.hisour.com/ar/data/engalerie-francois-i-palace-of-fontainebleau-seine-et-marne-franceesgalerie-francois-i-palacio-de-fontainebleau-sena-y-marne-franciadegalerie-francois-i-schloss-fontainebleau-seine-et> /Accessed on May 14, 2026
- [11] Bumanis, G., Zorica, J., Korjamins, A., & Bajare, D. (2022). Processing of gypsum construction and demolition waste and properties of secondary gypsum binder. *Recycling*, 7(3), 30. <https://doi.org/10.3390/recycling7030030>
- [12] Hassan, M. J., Islam, M. F., Akter, N., Uddin, M. N., Abir, A. Y., Ben Aoun, S., & Hasnat, M. A. (2021). Applicability of gypsum in selective removal of anionic dye molecules from aqueous medium. *Applied Water Science*, 11, 7. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01336-7>
- [13] Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., & Nichols, M. C. (2003). *Handbook of Mineralogy: Gypsum*. Mineral Data Publishing.
- [14] Freyer, D., & Voigt, W. (2003). Crystallization and phase stability of CaSO₄ and CaSO₄-based salts. *Monatshefte für Chemie*, 134, 693–719. <https://doi.org/10.1007/s00706-003-0590-3>
- [15] Cole, W. F., & Lancucki, C. J. (1974). A refinement of the crystal structure of gypsum CaSO₄·2H₂O. *Acta Crystallographica Section B*, 30(4), 921–929. <https://doi.org/10.1107/S0567740874004055>

- [16] Kyono, A., Oishi, T., & Miyake, A. (2022). Structural evolution of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) during thermal dehydration. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 117, 220811. <https://doi.org/10.2465/jmps.220811>
- [17] Rauf, M. A., Shehadeh, I., Ahmed, A., & Al-Zamly, A. (2009). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution by Using Gypsum as a Low Cost Adsorbent. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 55, 608–611. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1063096>
- [18] Charles, N., Colin, S., Gutierrez, T., & Lefebvre, G. (2020). Gypse et Anhydrite – Mémento. BRGM/RP-69280-FR.
- [19] [Mindat.org](https://www.mindat.org/sitegallery.php?loc=105900) . Site Gallery – [Mindat.org](https://www.mindat.org/sitegallery.php?loc=105900). Accessed on May 16, 2026 . <https://www.mindat.org/sitegallery.php?loc=105900>
- [20] Hope, S.M.; Kundu, S.; Roy, C.; Manna, S.S.; Hansen, A. Network topology of the desert rose. *Frontiers in Physics* 2015, 3, 72. <https://doi.org/10.3389/fphy.2015.00072>
- [21] Córdoba, P. (2015). Status of flue gas desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physicochemical control processes of wet limestone FGDs. *Fuel*, 144, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.065>
- [22] Baliyan, A., Maiti, S., Jain, N., & Malik, J. (2023). A comprehensive review of flue gas desulphurized gypsum: Production, properties and applications. *Construction and Building Materials*, 393, 131918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131918>
- [23] Alamy. (2026). *Drax coal-fired power station from the air, East Yorkshire, Northern England*. Accessed on May 19, 2026 <https://www.alamy.com/stock-photo-drax-coal-fired-power-station-from-the-air-east-yorkshire-northern-21949633.html?imageid=1ABAEFCF-FFC2-4CD3-ACC3-8E1E06CEACF4&pn=1&searchId=e7439e9c6e802881d6b77eaa499e3e22&searchtype=0>
- [24] Chernysh, Y., Yakhnenko, O., Chubur, V., & Roubík, H. (2021). Phosphogypsum recycling: A review of environmental issues, current trends, and prospects. *Applied Sciences*, 11(4), 1575. <https://doi.org/10.3390/app11041575>
- [25] Contreras, M., Teixeira, S. R., Lucas, M. C., Lima, L. C. N., Cardoso, D. S. L., da Silva, G. A. C., Gregório, G. C., de Souza, A. E., & dos Santos, A. (2024). Acid leaching technology for post-consumer gypsum purification. *Open Research Europe*, 3, 148.

- [26] Watts, D. B., & Dick, W. A. (2014). Sustainable uses of FGD gypsum in agricultural systems: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 246–252. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.09.0357>
- [27] Zhermack Magazine. (2026). Impiego dei materiali gessosi in Odontoiatria. Accessed on May 16, 2026: <https://magazine.zhermack.com/it/studio/impiego-dei-materiali-gessosi-in-odontoiatria/>
- [28] Gupta, S., Singh, A., & Sinha, A. (2024). Application of calcium sulfate as graft material in implantology and maxillofacial procedures: A review of literature. *National Journal of Maxillofacial Surgery*, 15(1), 1–8. https://doi.org/10.4103/njms.njms_33_22
- [29] Zollinger, Heinrich. (2003). *Color Chemistry: Syntheses, Properties, and Applications of Organic Dyes and Pigments* (3rd rev. ed.). Wiley-VCH.
- [30] Christie, Robert M. (2015). *Colour Chemistry* (2nd ed.). Royal Society of Chemistry.
- [31] Mansour, H., Boughzala, O., Barillier, D., Chekir-Ghedira, L., & Mosrati, R. (2011). Les colorants textiles sources de contamination de l'eau: Criblage de la toxicité et des méthodes de traitement. *Revue des Sciences de l'Eau/Journal of Water Science*, 24(3), 209–238.
- [32] BENTAHAR, Y., (2016). Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse, (thèse de doctorat, UNIVERSITE DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS, UFR Sciences Ecole Doctorale de sciences Fondamentales et appliquées).
- [33] Saxena, S. and A. Raja, Natural dyes :sources, chemistry, application and sustainability issues, in *Roadmap to sustainable textiles and clothing: eco-friendly raw materials, technologies, and processing methods*. 2014, Springer. p. 37-80.
- [34] . Vankar, P.S., Chemistry of natural dyes. *Resonance*, 2000. 5(10): p. 73-80. 8.Saxena, S. and A. Raja, Natural dyes :sources, chemistry, application and sustainability issues, in *Roadmap to sustainable textiles and clothing: eco-friendly raw materials, technologies, and processing methods*. 2014, Springer. p. 37-80.
- [35] Kadolph, S., Natural dyes: a traditional craft experiencing new attention. *Delta Kappa Gamma Bulletin*, 2008. 75(1): p. 14.
- [36] ScienceDirect. (2023). Synthetic dye: An overview. Elsevier. Retrieved from [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com)

- [37] K.B. Tan, M. vakili, B.A.Horri, P.E. Poh, A.Z. Abdullah, B. Salamatinia» separation and purification technology 150•2015 p 229-242.
- [38] S.A Dawoods Development and Characterization of Biomass Based Novel adsorbent in the removal of Congo red dye by adsorption in department of chemical engineering ,curtin University school of chemical, 2013.
- [39] Ratnapandian, S. (2013). Application of natural dyes by padding technique on textiles (Doctoral dissertation, RMIT University).
- [41] Maibeche, T., Hammar, A., (2020). Adsorption de colorants et de métaux lourds par des bioadsorbants Etude bibliographique (Doctoral dissertation, Université Abderahmane MIRA de Bejaia).
- [43] National Center for Biotechnology Information. (2026). *PubChem Compound Summary for CID 11313, Congo Red*. PubChem.
- [44] Purkait, Mimi Kanti; Maiti, Arpita; DasGupta, Sudip; De, Sirshendu. (2007). *Removal of Congo Red using activated carbon and its regeneration*. Journal of Hazardous Materials, 145(1-2), 287-295. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.021>
- [45] Chopra, I., Narayanan, N., & Singh, S. B. (2020). Utilization of agricultural waste for the removal of Congo red, the environmental pollutant from simulated aqueous solutions. The Indian Journal of Agricultural Sciences, 90(12), 2328–2334.
- [46] Siddiqui, Sharf Ilahi; Allehyani, Esam S.; Al-Harbi, Sami A.; Hasan, Ziaul; Abomuti, May Abdullah; Rajor, Hament Kumar; Oh, Seungdae. (2023). *Investigation of Congo Red toxicity towards different living organisms: A review*. Processes, 11(3), 807. <https://doi.org/10.3390/pr11030807>
- [47] ResearchGate. (2025). *Genotoxic agents in bladder cancer: A visual overview presenting the key assumptions and mechanisms* [Figure]: https://www.researchgate.net/figure/Genotoxic-agents-in-bladder-cancer-A-visual-overview-presenting-the-key-assumptions-and_fig2_393068830
- [48] Robinson, Tim; McMullan, Geoff; Marchant, Roger; Nigam, Poonam. (2001). *Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative*. Bioresource Technology, 77(3), 247-255. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)

الفصل الثاني

الإطار النظري لدراسة ظاهرة الامتنان

تمهيد

يمثل الامتزاز إحدى الظواهر السطحية الأساسية في الكيمياء الفيزيائية والكيمياء البيئية، وقد حظي باهتمام واسع نظراً لدوره المحوري في العديد من العمليات الطبيعية والصناعية، خاصة تلك المتعلقة بإزالة الملوثات وتنقية المياه والهواء. وتقوم هذه الظاهرة على انتقال الجزيئات أو الأيونات من الطور السائل أو الغازي إلى سطح مادة صلبة مازة، حيث ترتبط به من خلال قوى فيزيائية أو كيميائية تختلف في شدتها وطبيعتها. ويُعد فهم المبادئ الأساسية للامتزاز خطوة ضرورية لتفسير سلوك المواد المازة وتقييم كفاءتها في التطبيقات البيئية، خصوصاً في معالجة مياه الصرف الصحي وإزالة الملوثات العضوية مثل الأصباغ.

وانطلاقاً من هذه الأهمية، يهدف هذا الفصل إلى تقديم دراسة نظرية شاملة لظاهرة الامتزاز من خلال التطرق إلى مفاهيمه الأساسية، والتمييز بينه وبين الامتصاص، إضافة إلى إبراز أهميته في مختلف المجالات. كما يتناول آلية حدوث الامتزاز ومراحله المختلفة، وأنواعه الفيزيائية والكيميائية، والعوامل المؤثرة عليه، إلى جانب بعض النماذج الرياضية التي تصف سلوكه عند التوازن (Isotherms)، ودراسة حركيته وتفسيره ترموديناميكياً. وأخيراً، يستعرض هذا الفصل أهم تطبيقات الامتزاز في مجالات معالجة المياه، الصناعة، الطب والبيئة، بما يعكس مكانته كأحد أهم العمليات المستخدمة في تقنيات الإزالة والتنقية الحديثة.

II-1- نبذة تاريخية عن الامتزاز (Historical Overview of Adsorption)

تعود بدايات دراسة ظاهرة الامتزاز إلى النصف الثاني من القرن الثامن عشر، حيث لاحظ العالم السويدي شيلي (Scheele) سنة 1773 قدرة الفحم على امتزاز الغازات، وهي ملاحظة شكلت نقطة الانطلاق لفهم هذه الظاهرة السطحية. وفي عام 1777، أكد العالم الفرنسي فونتانا (Fontana) هذه النتائج من خلال دراسات مشابهة حول تفاعل الغازات مع الأسطح الصلبة، مما ساهم في ترسيخ مفهوم الامتزاز كظاهرة فيزيائية مميزة [1].

وفي أواخر القرن التاسع عشر، تحديدًا سنة 1875، قام العالم الروسي فوتيس (Fotis) بدراسة امتزاز المواد العضوية على الفحم في المحاليل المائية، وهو ما وسّع نطاق تطبيق الامتزاز من الغازات إلى الأنظمة السائلة. وقد شكل هذا التحول خطوة مهمة نحو استخدام الامتزاز في معالجة المياه.

لاحقًا، ركّز العالم زيلينسكي (Zelinsky) على دراسة امتزاز الغازات السامة على الفحم المنشط، حيث طوّر أولى التطبيقات العملية لهذه الظاهرة في تصميم الأقنعة الواقية من الغازات السامة، وذلك عبر استخدام طبقة من الفحم المنشط لاحتجاز الأبخرة الضارة من الهواء. وقد ساهم هذا الابتكار في إدخال تقنية الامتزاز إلى مجالات صناعية وعسكرية واسعة [1].

وفي بداية القرن العشرين، وتحديدًا سنة 1903، استخدم العالم الروسي تسفيت (Tsvet) ظاهرة الامتزاز في فصل المركبات الكيميائية، حيث اعتمد على مواد مازة لفصل مركبات ملونة فعالة حيويًا، مما أدى إلى تطوير تقنية الكروماتوغرافيا (Chromatography)، التي تُعد من أهم التقنيات التحليلية الحديثة.

أما مصطلح الامتزاز (Sorption) فقد تم تقديمه سنة 1909 من طرف العالم ماكبين (W.J. McBain)، لوصف العمليات التي تشمل انتقال المواد إلى سطح صلب (امتزاز Adsorption) أو إلى داخل الحجم (امتصاص Absorption)، أو كليهما معًا. وقد ساهم هذا المفهوم في توحيد المصطلحات المرتبطة بانتقال الكتلة بين الأطوار المختلفة [2].

ومع تطور العلوم في القرن العشرين، شهدت دراسات الامتزاز تقدمًا كبيرًا، خاصة في فهم الآليات الجزيئية والقوى المؤثرة، مثل قوى فان دير فال والتفاعلات السطحية المختلفة الناتجة عن الاستقطاب. وأصبح الامتزاز يُفسّر على أنه عملية تنتقل خلالها الجزيئات أو الذرات أو الأيونات من الطور الغازي أو السائل إلى سطح مادة صلبة، حيث ترتبط به بفعل قوى فيزيائية أو كيميائية.

وفي الوقت الراهن، يُعد الامتزاز من أكثر التقنيات استخدامًا في مجالات البيئة والهندسة الكيميائية، نظرًا لفعاليتها العالية وتكلفتها المنخفضة، خاصة في معالجة مياه الصرف الصحي وإزالة الملوثات العضوية

مثل الأصباغ. كما يتزايد الاهتمام بتطوير مواد مازة جديدة منخفضة التكلفة، مثل المواد المعاد تدويرها، ومن بينها الجبس، بهدف تحسين كفاءة الامتزاز وتحقيق استدامة بيئية واقتصادية.

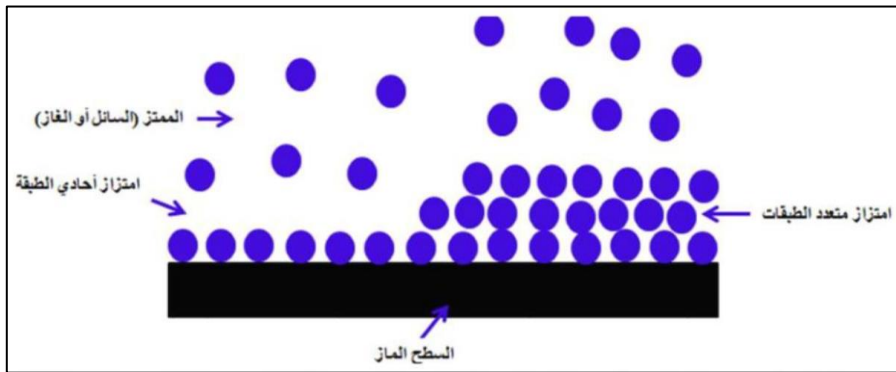
II-2- تعريف الامتزاز (Definition of Adsorption)

يُعرّف الامتزاز (Adsorption) بأنه ظاهرة فيزيوكيميائية تحدث عند تلامس طورين مختلفين، عادةً طور سائل أو غازي مع سطح مادة صلبة، حيث تتجمع الجزيئات أو الأيونات أو الذرات المكوّنة للمادة المراد إزالتها (الممتز (Adsorbate) على سطح مادة أخرى تُعرف بالممتز (Adsorbent). وتتم هذه العملية نتيجة وجود قوى تجاذب بين الجزيئات وسطح المادة الصلبة، مما يؤدي إلى تكوين طبقة سطحية قد تكون أحادية أو متعددة الطبقات [3].

ويُعتبر الامتزاز ظاهرة سطحية بحتة، إذ يقتصر حدوثه على الواجهة الفاصلة بين الطورين، خلافاً للامتصاص الذي يحدث في كامل الحجم. وتعتمد فعالية هذه الظاهرة بشكل كبير على خصائص السطح، مثل المساحة السطحية، حجم المسام، والتوزيع البنيوي للمادة الممتزة، إضافة إلى طبيعة القوى المؤثرة، والتي قد تكون قوى فيزيائية ضعيفة مثل قوى فان دير فالس، أو روابط كيميائية قوية في حالة الامتزاز الكيميائي.

كما يمكن تفسير الامتزاز على المستوى الجزيئي بأنه نتيجة لعدم توازن القوى على سطح المادة الصلبة، حيث تمتلك الذرات السطحية طاقة حرة أعلى مقارنة بذرات الداخل، مما يجعلها تميل إلى جذب الجزيئات المحيطة لتقليل هذه الطاقة وتحقيق حالة من الاستقرار [3].

وفي التطبيقات البيئية، يُعد الامتزاز من أهم العمليات المستخدمة في إزالة الملوثات من المياه والهواء، خاصة المركبات العضوية مثل الأصباغ، نظراً لكفاءته العالية وإمكانية التحكم في ظروفه التشغيلية. كما تزداد أهميته عند استخدام مواد مازة منخفضة التكلفة وذات توفر واسع، مثل المواد المعاد تدويرها، وهو ما ينسجم مع التوجهات الحديثة نحو التنمية المستدامة.



الشكل (II - 1): رسم تخطيطي يوضح عملية الامتزاز [3]

II-3- الفرق بين الامتزاز والامتصاص

يُعد كلٌّ من الامتزاز (Adsorption) والامتصاص (Absorption) من الظواهر الفيزيائية-الكيميائية المرتبطة بانتقال المادة بين الأطوار، إلا أنَّهما يختلفان من حيث آلية الحدوث وطبيعة التفاعل وموقعه. فالامتزاز هو ظاهرة سطحية تتمثل في تراكم الجزيئات أو الأيونات على سطح المادة المازة نتيجة قوى تجاذب سطحية، في حين أن الامتصاص يمثل ظاهرة حجمية يتم فيها انتشار المادة داخل كامل حجم الوسط الممتص. وتبرز أهمية التمييز بين هاتين الظاهرتين في التطبيقات البيئية والصناعية، خاصة في عمليات معالجة المياه وإزالة الملوثات [4].

ولتوضيح أوجه الاختلاف بصورة أكثر دقة، يبين الجدول (5-I) أدناه مقارنة بين الإمتزاز والامتصاص من حيث طبيعة العملية، وآلية الحدوث، وموقع انتقال المادة، إضافة إلى بعض الخصائص الأخرى المرتبطة بهما.

الجدول (5-I): الفرق بين الامتزاز والامتصاص

وجه المقارنة	الامتزاز (Adsorption)	الامتصاص (Absorption)
طبيعة العملية	عملية سطحية تحدث على السطح الفاصل بين طورين.	عملية حجمية تحدث داخل كامل كتلة المادة الممتصة.
موقع انتقال المادة	تتراكم الجزيئات على السطح الخارجي للمادة المازة.	تنتقل الجزيئات إلى داخل المادة الممتصة وتنتشر في حجمها.
آلية الحدوث	تعتمد على التجاذب بين السطح والجزيئات الممتزة.	تعتمد على الذوبان والانتشار داخل الوسط الممتص.
العوامل المؤثرة	المساحة السطحية النوعية، حجم المسام، طبيعة المواقع الفعالة، درجة الحرارة والضغط.	قابلية الذوبان، معامل الانتشار، طبيعة الوسط، درجة الحرارة.
نوع القوى المتدخلة	قوى فيزيائية ضعيفة (فان دير فال) أو روابط كيميائية قوية.	غالبًا قوى مرتبطة بالذوبان أو التفاعل داخل الوسط.
القابلية للعكس	الامتزاز الفيزيائي غالبًا قابل للعكس بسهولة.	أقل قابلية للعكس، خاصة عند حدوث تفاعل كيميائي.
سرعة العملية	سريعة نسبيًا في المراحل الأولى بسبب توفر المواقع السطحية.	أبطأ نسبيًا لاعتمادها على الانتشار داخل الكتلة.

الانتقائية	يتميز بانتقائية مرتفعة تجاه بعض الملوثات أو الجزيئات	انتقائيته أقل وتعتمد على خواص الذوبان والانتشار
التطبيقات البيئية	إزالة الأصباغ العضوية والمعادن الثقيلة وتنقية المياه والهواء	امتصاص الغازات في السوائل وبعض عمليات الفصل الكيميائي
إمكانية التجديد وإعادة الاستخدام	يمكن غالبًا تجديد المادة المازة وإعادة استخدامها	إعادة الاستخدام أكثر صعوبة بسبب اختراق المادة للطور الممتص

II-4- أهمية الامتزاز

يُعد الامتزاز من أهم العمليات الفيزيائية-الكيميائية المستخدمة في مجالات البيئة والهندسة الكيميائية، لما يتميز به من كفاءة عالية، وبساطة في التشغيل، وإمكانية تطبيقه باستخدام مواد منخفضة التكلفة. وقد حظيت هذه العملية باهتمام متزايد في العقود الأخيرة، خاصة في ظل التحديات البيئية المرتبطة بتلوث المياه والهواء، حيث أثبتت قدرتها على إزالة مجموعة واسعة من الملوثات بكفاءة وفعالية.

II-4-1- في معالجة المياه

يُعتبر الامتزاز من أكثر التقنيات استخدامًا في معالجة المياه، سواء كانت مياه شرب أو مياه صرف صحي أو صناعي. وتكمن أهميته في قدرته على إزالة الملوثات التي يصعب التخلص منها باستخدام الطرق التقليدية، مثل المركبات العضوية المعقدة، والأصباغ، والمعادن الثقيلة. كما يتميز بمرونته التشغيلية، حيث يمكن التحكم في كفاءته من خلال تعديل ظروف التشغيل مثل درجة الحموضة (pH)، درجة الحرارة وزمن التماس [5].

إضافة إلى ذلك، فإن استخدام مواد مازة منخفضة التكلفة، مثل المواد الطبيعية أو المعاد تدويرها، يساهم في تقليل التكاليف التشغيلية، مما يجعل الامتزاز خيارًا اقتصاديًا ومستدامًا، خاصة في الدول النامية. وفي هذا الإطار، يُعد الجبس المعاد تدويره من المواد الواعدة التي يمكن تحسين خصائصها السطحية لزيادة قدرتها على إزالة الأصباغ العضوية من المياه.

II-4-2- إزالة الملوثات

تتجلى أهمية الامتزاز بشكل خاص في إزالة الملوثات من الأوساط المائية والغازية، حيث يُمكنه استهداف مجموعة واسعة من المواد الضارة، مثل الأصباغ العضوية، المركبات العطرية، المبيدات، والمواد السامة. ويعتمد نجاح هذه العملية على طبيعة التفاعل بين المادة المازة والمادة الممتزة، إضافة إلى خصائص السطح مثل المسامية والتوزيع الحجمي للمسام [5].

ويمتاز الامتزاز بقدرته على إزالة الملوثات حتى عند تراكيز منخفضة، وهي ميزة لا تتوفر في العديد من التقنيات الأخرى. كما يمكن تحسين كفاءة الامتزاز من خلال تعديل السطح الكيميائي للمادة المازة، مثل التنشيط الحراري أو الكيميائي، مما يزيد من عدد المواقع الفعالة ويعزز التفاعل مع الملوثات.

II-4-3- التطبيقات الصناعية

يمتد استخدام الامتزاز إلى العديد من التطبيقات الصناعية الحيوية، حيث يُستخدم في عمليات الفصل والتنقية وتحسين جودة المنتجات. ففي الصناعة الكيميائية، يُستعمل الامتزاز لفصل المركبات وتنقية المواد الأولية والنهائية. كما يُستخدم في الصناعات البترولية لإزالة الشوائب من الوقود، وفي الصناعات الغذائية لتنقية الزيوت والسوائل [1].

وفي مجال معالجة الغازات، يُستخدم الامتزاز لإزالة الغازات السامة أو غير المرغوب فيها، مثل ثاني أكسيد الكربون CO_2 والمركبات العضوية المتطايرة، مما يساهم في تقليل التلوث الهوائي. كما يدخل في تقنيات متقدمة مثل أنظمة الامتزاز المتأرجح بالضغط (PSA)، المستخدمة في فصل الغازات على نطاق صناعي.

وبصفة عامة، يُعد الامتزاز تقنية متعددة الاستخدامات، تجمع بين الكفاءة العالية والتكلفة المنخفضة، مما يجعله من الحلول الأساسية في مواجهة التحديات البيئية والصناعية المعاصرة، خاصة عند دمجها مع مواد مبتكرة ومستدامة مثل المواد المعاد تدويرها.

II-5- أنواع الامتزاز

يُصنّف الامتزاز اعتمادًا على طبيعة القوى التي تربط الجزيئات أو الذرات الممتزة بسطح المادة الصلبة. وتختلف هذه القوى باختلاف الخصائص الفيزيائية والكيميائية لكل من المادة الممتزة (Adsorbate) والمادة المازة (Adsorbent)، إضافة إلى طبيعة السطح من حيث المسامية، والتوزيع الإلكتروني، ودرجة النشاط السطحي. وبناءً على ذلك، يُقسم الامتزاز بشكل رئيسي إلى نوعين أساسيين: الامتزاز الفيزيائي والامتزاز الكيميائي.

II-5-1- الامتزاز الفيزيائي

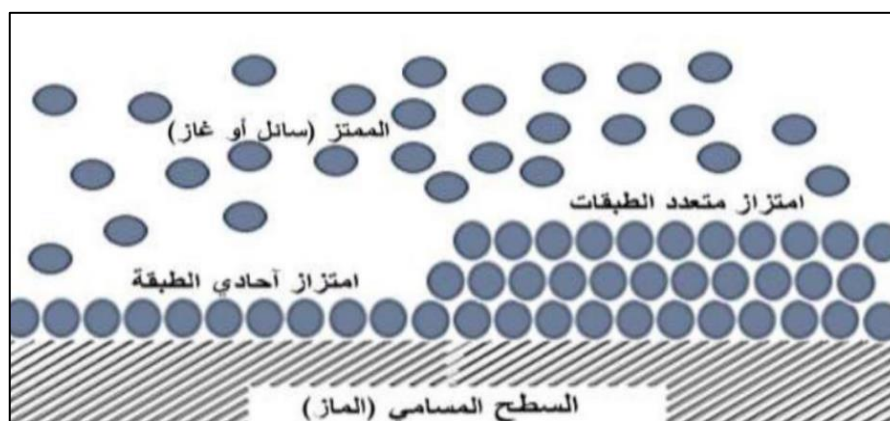
يُعرف الامتزاز الفيزيائي بأنه العملية التي يتم فيها تثبيت الجزيئات الممتزة على سطح المادة الصلبة بفعل قوى فيزيائية ضعيفة، مثل قوى فان دير فالس (Van der Waals forces) وقوى التشتت الناتجة عن الاستقطاب اللحظي. وتتميز هذه القوى بكونها غير نوعية وضعيفة نسبيًا، مما يجعل هذا النوع من الامتزاز سريع الحدوث وقابلًا للعكس [6].

في هذا النوع، لا يحدث أي تغيير في البنية الكيميائية للجزيئات الممتزة، بل تبقى محتقظة بخصائصها الأصلية، ويقتصر التفاعل على ارتباط سطحي مؤقت الشكل (II-2). كما يمكن أن تتكون طبقة واحدة أو عدة طبقات من الجزيئات الممتزة على سطح المادة، وهو ما يُعرف بالامتزاز متعدد الطبقات (Multilayer adsorption).

ومن أهم المؤشرات المستخدمة لتمييز الامتزاز الفيزيائي انخفاض حرارة الامتزاز، حيث تكون عادة أقل من 40 kJ/mol ، مما يدل على ضعف الروابط بين السطح والجزيئات الممتزة. كما يحدث هذا النوع غالباً في درجات حرارة منخفضة، ويزداد بزيادة الضغط (في حالة الغازات) أو التركيز (في المحاليل).

ومن خصائص الامتزاز الفيزيائي نذكر [6]:

- طاقة امتزاز منخفضة: عادة أقل من 40 kJ/mol .
- عملية انعكاسية: يمكن إزالة المادة الممتزة بسهولة عن طريق التسخين أو تقليل الضغط.
- عدم حدوث تغير كيميائي: الجزيئات الممتزة تحتفظ بتركيبها الأصلي.
- تعدد الطبقات: يمكن أن تتكون عدة طبقات من الجزيئات على السطح.
- يعتمد على قابلية الإزالة: تزداد كمية الامتزاز كلما كان الغاز أكثر قابلية للتكثف.
- سرعة عالية في الوصول إلى التوازن: بسبب ضعف القوى المتحركة.



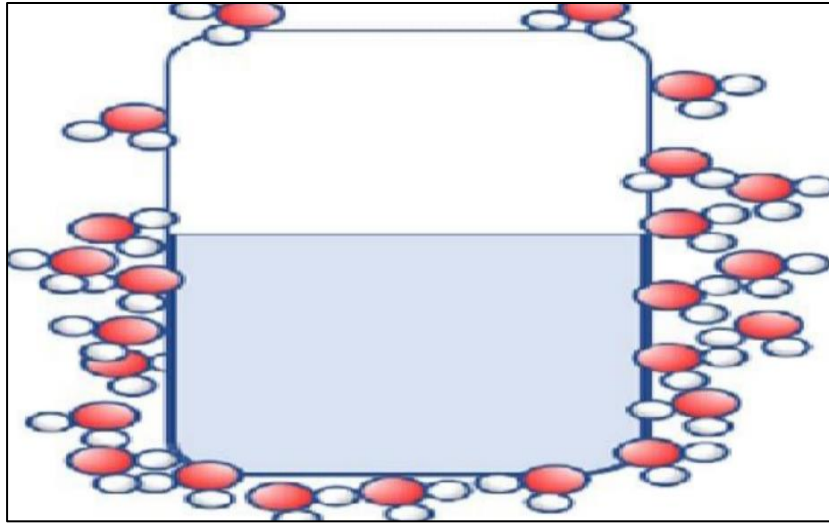
الشكل (II - 2): مخطط الامتزاز الفيزيائي [6]

II-5-2- الامتزاز الكيميائي

يحدث الامتزاز الكيميائي عندما تتكون روابط كيميائية قوية بين الجزيئات الممتزة وسطح المادة المازة، وغالباً ما يكون ذلك على مواقع نشطة غير مشبعة إلكترونياً. وتتميز هذه العملية بكونها نوعية (Specific)، أي أنها تعتمد بشكل كبير على طبيعة التفاعل بين السطح والمادة الممتزة، ولا تحدث إلا في ظروف محددة [6].

على عكس الامتزاز الفيزيائي، يتطلب الامتزاز الكيميائي طاقة تنشيط أعلى، مما يجعله أبطأ نسبياً في البداية، لكنه يؤدي إلى تكوين روابط قوية وثابتة الشكل (II-3)، كما يقتصر هذا النوع عادة على تكوين طبقة واحدة فقط من الجزيئات على السطح، ويُعرف بالامتزاز أحادي الطبقة (Monolayer adsorption).

وتُعد حرارة الامتزاز في هذه الحالة مرتفعة، حيث تتجاوز غالباً 80 kJ/mol ، وقد تصل إلى قيم أعلى حسب طبيعة التفاعل، وهو ما يعكس قوة الروابط الكيميائية المتكونة.



الشكل (II - 3): مخطط الامتزاز الكيميائي [6]

وللامتزاز الكيميائي (عدة خصائص) نذكر منها [6]:

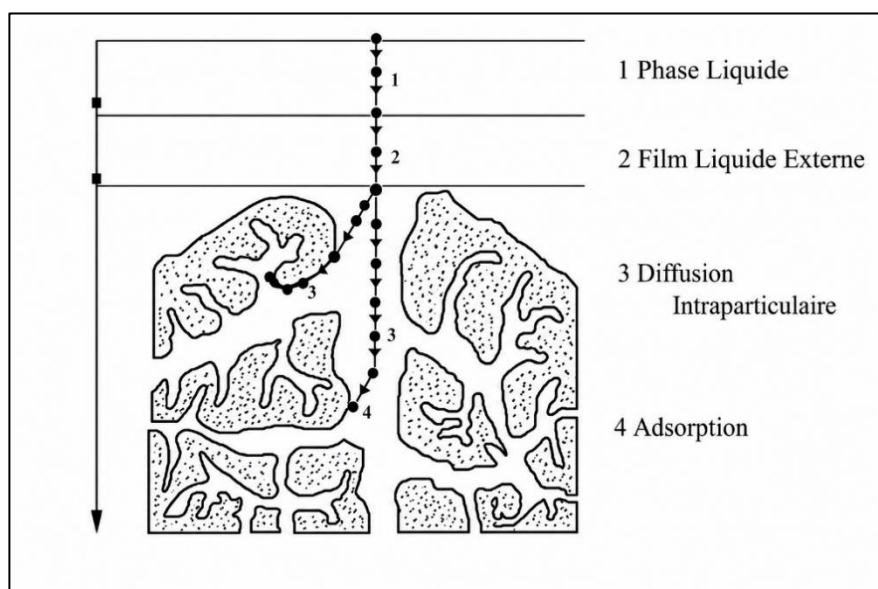
- طاقة امتزاز مرتفعة: عادة أكبر من 80 kJ/mol .
- عملية غير انعكاسية غالباً: يصعب إزالة المادة الممتزة بسبب قوة الروابط.
- تغير في التركيب الكيميائي: قد يحدث تفكك أو إعادة ترتيب للجزيئات الممتزة.
- أحادي الطبقة: يقتصر على تكوين طبقة واحدة فقط على السطح.
- يتطلب طاقة تنشيط: يحدث غالباً عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً.
- انتقائية عالية: يعتمد على طبيعة السطح والمادة الممتزة.
- دور تحفيزي: الجزيئات الممتزة قد تصبح أكثر نشاطاً، مما يجعلها تلعب دوراً مهماً في التفاعلات الحفزية.

الجدول (II - 1): مقارنة عامة بين الامتزاز الفيزيائي والكيميائي [6]

الخاصية	الامتزاز الفيزيائي	الامتزاز الكيميائي
طبيعة القوى	قوى فان دير فالس	روابط كيميائية
طاقة الامتزاز	منخفضة ($< 40 \text{ kJ/mol}$)	مرتفعة ($> 80 \text{ kJ/mol}$)
عدد الطبقات	متعددة الطبقات	طبقة واحدة
القابلية للعكس	عكوس	غالبًا غير عكوس
درجة الحرارة	منخفضة	مرتفعة نسبيًا
الانتقائية	غير انتقائي	انتقائي

II-6- آلية الامتزاز

تُعد آلية الامتزاز من العمليات المعقدة نسبيًا، حيث لا تحدث بشكل مباشر، بل تمر عبر سلسلة من المراحل المتتابعة التي تتحكم في سرعة وكفاءة إزالة الملوثات من المحلول. وتتم هذه العملية أساسًا عبر انتقال المادة الممتزة (الملوثات) من الطور السائل إلى سطح المادة المازة، حيث تُثَبَّت على المواقع النشطة الموجودة على سطحها أو داخل بنيتها المسامية. ويمكن تقسيم هذه الآلية إلى أربع مراحل رئيسية مترابطة كما يلي:



الشكل (II - 4): مجالات وجود المادة الممتزة أثناء الامتزاز على المواد المازة [7]

II-6-1- الانتقال في الطور السائل

في هذه المرحلة الأولى، تنتقل جزيئات المذاب (الملوثات) من الكتلة الرئيسية للمحلول إلى المنطقة القريبة من سطح المادة المازة. ويحدث هذا الانتقال نتيجة فرق التركيز بين وسط المحلول والسطح، حيث تتحرك الجزيئات من منطقة ذات تركيز مرتفع إلى منطقة ذات تركيز منخفض. وتُعد هذه الخطوة ضرورية لتهيئة الجزيئات للوصول إلى واجهة التفاعل [8].

II-6-2- الانتشار عبر الغشاء السائل

بعد وصول الجزيئات إلى محيط سطح المادة المازة، يجب عليها عبور طبقة رقيقة جدًا تُعرف بالغشاء السائل أو الطبقة الحدية (Boundary Layer). وتُعتبر هذه الطبقة مقاومة إضافية أمام انتقال الكتلة، حيث يتم نقل الجزيئات من خلال الانتشار عبر هذا الغشاء حتى تصل إلى السطح الخارجي لحبيبات المادة المازة. وتعتمد سرعة هذه الخطوة على درجة التحريك، ودرجة الحرارة، وتركيز المذاب [9].

II-6-3- الانتشار داخل الحبيبات

في هذه المرحلة، تنتقل الجزيئات الممتزة من السطح الخارجي للحبيبات إلى داخل بنيتها المسامية. ويُعرف هذا الانتقال بالانتشار داخل المسام، حيث تتحرك الجزيئات عبر القنوات الدقيقة والمسام الداخلية للمادة المازة للوصول إلى المواقع النشطة الداخلية. وتُعد هذه الخطوة غالبًا من العوامل المحددة لسرعة الامتزاز، خاصة في المواد ذات البنية المسامية الدقيقة [8].

II-6-4- التفاعل والامتزاز على المواقع النشطة

تمثل هذه المرحلة الخطوة النهائية في عملية الامتزاز، حيث يتم تثبيت الجزيئات على المواقع النشطة الموجودة على سطح المادة المازة أو داخل مسامها. ويحدث هذا التثبيت نتيجة قوى فيزيائية أو كيميائية حسب طبيعة النظام، مما يؤدي إلى ارتباط الجزيء بالسطح بشكل مستقر. وبمجرد حدوث الامتزاز، تصبح الجزيئات غير قادرة على الحركة بحرية، وتتحول من حالة ذائبة في المحلول إلى حالة مرتبطة بالسطح [10].

بشكل عام، تتحكم المراحل الثلاث الأولى (الانتقال في المحلول، الانتشار عبر الغشاء، والانتشار داخل الحبيبات) في سرعة العملية، بينما تمثل المرحلة الرابعة خطوة التثبيت النهائي للمادة الممتزة. وتُستخدم هذه الآلية لفهم سلوك الامتزاز وتفسير النتائج التجريبية، خصوصًا في دراسات إزالة الملوثات العضوية مثل الأصباغ باستخدام مواد مازة متنوعة.

II-7- العوامل المؤثرة على ظاهرة الامتزاز

تتأثر عملية الامتزاز بعدة عوامل فيزيائية وكيميائية تتحكم في كفاءتها وسرعة حدوثها، إضافة إلى تحديد طبيعة التفاعل بين المادة الممتزة (Adsorbate) والمادة المازة (Adsorbent). وتُعد دراسة هذه العوامل ضرورية لفهم سلوك الامتزاز وتفسير النتائج التجريبية، خصوصًا في تطبيقات معالجة المياه وإزالة الملوثات العضوية مثل الأصباغ [11].

II-7-1- تأثير المذيب (Effect of Solvent)

يلعب المذيب دورًا أساسيًا في التحكم في عملية الامتزاز، خاصة في الأنظمة السائلة، حيث يتنافس المذيب والمذاب على المواقع الفعالة الموجودة على سطح المادة المازة. وتؤثر طبيعة المذيب (قطبي أو غير قطبي) بشكل مباشر على كفاءة الامتزاز، إذ يمكن أن يعيق أو يعزز ارتباط الجزيئات الممتزة بالسطح [4].

بشكل عام، كلما كانت المادة المذابة ضعيفة الذوبان في المذيب، زادت قابليتها للامتزاز على سطح المادة المازة، لأن الجزيئات تميل إلى الانتقال من الوسط السائل إلى السطح الصلب لتقليل طاقتها الحرة. كما أن المذيب نفسه قد يتفاعل مع سطح المادة المازة، مما يؤدي إلى منافسة بين جزيئات المذيب والمذاب على المواقع النشطة.

وتُعد القاعدة العامة في هذا السياق أن المادة المازة القطبية تميل إلى امتزاز المكونات الأكثر قطبية في المحاليل غير القطبية، والعكس صحيح، مما يوضح أهمية التوافق القطبي بين النظام الثلاثي (المذيب-المذاب-المادة المازة) في تحديد كفاءة الامتزاز.

II-7-2- تأثير التركيز

يُعتبر تركيز المادة الممتزة في المحلول من العوامل الأساسية المؤثرة في كمية الامتزاز، حيث تزداد كمية المادة الممتزة عادة بزيادة تركيزها في الطور السائل، وذلك بسبب ارتفاع القوة الدافعة لانتقال الجزيئات نحو السطح [12].

ومع استمرار الامتزاز، قد يصل النظام إلى حالة تشبع سطحية يتم فيها تغطية جميع المواقع النشطة بطبقة واحدة من الجزيئات، وهو ما يُعرف بالامتزاز أحادي الطبقة. وفي بعض الحالات، يمكن أن يستمر الامتزاز لتكوين طبقات إضافية على السطح، خاصة عند تراكيز مرتفعة.

ويمثل منحنى العلاقة بين كمية المادة الممتزة وتركيزها عند الاتزان ما يُعرف بـ إيزوثيرم الامتزاز (Adsorption Isotherm)، والذي يُستخدم لوصف سلوك النظام والتنبؤ بكفاءته في ظروف مختلفة.

II-7-3- تأثير الرقم الهيدروجيني

تُعد قيمة الرقم الهيدروجيني (pH) من أهم العوامل المؤثرة في الامتزاز، خاصة في الأنظمة المائية، حيث تتحكم في شحنة سطح المادة المازة وحالة تأين المادة الممتزة [11].

عند تغير قيمة pH، قد تتغير ذوبانية الجزيئات الممتزة، مما يؤثر مباشرة على قدرتها على الامتزاز. فعندما تقل الذوبانية، تزداد قابلية الامتزاز، والعكس صحيح. كما أن شحنة سطح المادة المازة تلعب دوراً مهماً، حيث يزداد الامتزاز عندما يكون سطح المادة المازة مشحوناً بشحنة مخالفة لشحنة الجزيئات الممتزة، نتيجة لقوى التجاذب الكهروستاتيكي.

أما في حالة امتلاك السطح والجزيئات لنفس الشحنة، فإن ذلك يؤدي إلى تنافر كهربائي يقلل من كفاءة الامتزاز بشكل ملحوظ. لذلك، يُعتبر ضبط قيمة pH من أهم المعايير التجريبية لتحسين أداء عمليات الامتزاز.

II-7-4- طبيعة المادة الممتزة

تؤثر الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة الممتزة بشكل مباشر على سلوك الامتزاز. فمن الناحية الفيزيائية، يزداد الامتزاز عادة مع زيادة الكتلة الجزيئية للمادة الممتزة، نظراً لزيادة قوى التشنت والتجاذب السطحي [4].

أما من الناحية الكيميائية، فإن وجود مجموعات وظيفية قطبية مثل OH^- ، COOH^- ، أو NH_2^- يعزز من التفاعل مع السطح الماز، مما يزيد من كفاءة الامتزاز. كما أن الذوبانية تلعب دوراً مهماً، حيث كلما انخفضت ذوبانية المادة الممتزة في المذيب، زادت قابليتها للامتزاز على السطح الصلب.

ويؤدي اختلاف الخصائص بين المكونات إلى حدوث امتزاز انتقائي، حيث يُفضل السطح الماز مكونات معينة على حساب أخرى، خاصة في الأنظمة متعددة المكونات، وهو أمر بالغ الأهمية في عمليات تنقية المياه وإزالة الأصباغ.

II-7-5- طبيعة المادة المازة

تُعد خصائص المادة المازة من أهم العوامل المحددة لكفاءة الامتزاز، حيث تلعب البنية الكيميائية والفيزيائية دوراً رئيسياً في تحديد عدد المواقع النشطة وطبيعتها. وتشمل هذه الخصائص المساحة السطحية النوعية، توزيع وحجم المسام، طبيعة المجموعات الوظيفية، إضافة إلى الشحنة السطحية [13].

كلما زادت المساحة السطحية للمادة المازة، زاد عدد المواقع المتاحة لارتباط الجزيئات الممتزة، مما يؤدي إلى ارتفاع سعة الامتزاز. كما أن المواد ذات المسام الدقيقة والمتوسطة تُظهر كفاءة أعلى في احتجاز الملوثات مقارنة بالمواد قليلة المسامية.

إضافة إلى ذلك، فإن وجود مجموعات وظيفية نشطة على سطح المادة المازة يمكن أن يعزز التفاعلات الكيميائية أو الفيزيائية مع الملوثات، مما يحسن من الأداء العام للعملية، وهو ما يُعد مهماً بشكل خاص عند استخدام مواد معدلة أو معاد تدويرها مثل الجبس.

II-7-6- تأثير درجة الحرارة

تلعب درجة الحرارة دوراً مزدوجاً في عملية الامتزاز، حيث يمكن أن تؤثر على معدل الامتزاز وعلى سعته في آن واحد. ففي بعض الحالات، يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة سرعة الامتزاز نتيجة تسريع حركة الجزيئات وزيادة طاقتها الحركية.

ومع ذلك، وبما أن الامتزاز غالباً ما يكون عملية طاردة للحرارة (Exothermic)، فإن زيادة درجة الحرارة تؤدي عادة إلى تقليل كمية المادة الممتزة على السطح، بينما تعزز درجات الحرارة المنخفضة من حدوث الامتزاز واستقراره.

وبالتالي، فإن العلاقة بين درجة الحرارة والامتزاز تعتمد على طبيعة النظام (فيزيائي أو كيميائي)، حيث يكون تأثير الحرارة أكثر وضوحاً في الامتزاز الفيزيائي مقارنة بالامتزاز الكيميائي.

إن تداخل هذه العوامل مجتمعة يحدد بشكل نهائي كفاءة عملية الامتزاز وسرعة حدوثها، مما يجعل التحكم في الظروف التشغيلية أمراً ضرورياً لتحسين الأداء، خصوصاً في تطبيقات إزالة الملوثات العضوية باستخدام مواد مازة منخفضة التكلفة مثل الجبس المعاد تدويره.

II-7-7- زمن التلامس

يُحدد زمن التلامس بين المادة الممتزة والمادة المازة مدى اقتراب النظام من حالة الاتزان. في المراحل المبكرة يكون الامتزاز سريعاً نتيجة توافر عدد كبير من المواقع النشطة على السطح، ثم تتناقص سرعة الامتزاز تدريجياً مع التقدم حتى يصل النظام إلى التشبع. إذا كان زمن التلامس قصيراً جداً، فلن يتسنى للجزيئات الممتزة الوقت الكافي للالتصاق بالسطح، مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة عملية الامتزاز [14].

II-7-8- سرعة التحريك:

تُعد سرعة التحريك من العوامل التشغيلية المهمة المؤثرة في عملية الامتزاز، إذ تلعب دوراً أساسياً في تحسين انتقال جزيئات المادة الممتزة من المحلول إلى سطح المادة المازة. فعند زيادة سرعة التحريك تقل سماكة الطبقة الحدية (Boundary Layer) المحيطة بجسيمات المادة المازة، مما يخفّض مقاومة انتقال الكتلة ويُسهّل وصول الجزيئات إلى المواقع النشطة على السطح.

كما يؤدي التحريك إلى تحسين تجانس الوسط التفاعلي ومنع ترسب الجسيمات أو تكتلها، الأمر الذي يزيد من فرص التلامس بين المادة الممتزة والمادة المازة، ويساهم في تسريع الوصول إلى حالة الاتزان الامتزازي. لذلك، تُسجّل عادةً معدلات امتزاز أعلى عند سرعات التحريك المناسبة مقارنةً بالأنظمة الساكنة.

ومع ذلك، فإن زيادة سرعة التحريك إلى قيم مرتفعة جداً قد لا تؤدي إلى تحسن إضافي ملحوظ في كفاءة الامتزاز بعد تجاوز حد معين، وذلك بسبب تشبع معظم المواقع الفعالة على سطح المادة المازة أو وصول النظام إلى حالة الاتزان. وفي بعض الحالات، قد تؤثر السرعات العالية جداً سلباً على استقرار الجسيمات المازة أو على طبيعة التفاعلات السطحية، مما يجعل تحديد سرعة التحريك المثلى أمراً ضرورياً للحصول على أفضل أداء للامتزاز [15].

II-8- نماذج إيزوتارم الامتزاز

تُعد نماذج إيزوتارم الامتزاز من أهم الأدوات النظرية والرياضية المستخدمة لوصف سلوك الامتزاز عند حالة التوازن، حيث تربط بين كمية المادة الممتزة على سطح المادة المازة وتركيزها في المحلول عند درجة حرارة ثابتة. وتُستخدم هذه النماذج لتفسير طبيعة التفاعل بين المذاب والسطح، وتحديد آلية الامتزاز سواء كانت أحادية الطبقة أو متعددة الطبقات، إضافة إلى تقييم كفاءة المواد المازة مثل الجبس المعاد تدويره [12].

وقد تم اقتراح العديد من النماذج الرياضية لوصف ظاهرة الإمتزاز، ويختلف كل نموذج في فرضياته وطريقة تفسيره لسلوك النظام المدروس. ومن بين أكثر النماذج استخداماً في دراسة أنظمة الإمتزاز: نموذج لانجمير (Langmuir)، نموذج فرنديتش (Freundlich)، و نموذج تمكين (Temkin)، والتي سيتم التطرق إليها فيما يلي:

II-8-1- نموذج لانجمير (Langmuir):

وُضع نموذج لانجمير سنة 1918 من طرف العالم Irving Langmuir، ويُعد من أكثر النماذج استخداماً في دراسة الامتزاز، خاصة في حالة الامتزاز الكيميائي أو الامتزاز أحادي الطبقة. ويقوم هذا

النموذج على فرضية أساسية مفادها أن سطح المادة المازة متجانس ويحتوي على عدد محدود من المواقع النشطة المتكافئة، بحيث لا يمكن لكل موقع إلا أن يحتجز جزيئاً واحداً فقط [16].

الفرضيات الأساسية لنموذج لانجماير [16] :

- جميع المواقع النشطة على السطح متكافئة في الطاقة.
- يحدث الامتزاز على طبقة واحدة فقط (Monolayer adsorption).
- لا يوجد تفاعل بين الجزيئات الممتزة على السطح.
- كل موقع نشط يمكن أن يشغل بجزيء واحد فقط.
- يحدث توازن ديناميكي بين الامتزاز والتحرر (Desorption).
- الجزيئات الممتزة لا تتحرك على السطح بعد الامتزاز.

ويُستخدم هذا النموذج بشكل واسع في دراسة امتزاز الغازات والمحاليل على الأسطح الصلبة المتجانسة وتعطى المعادلة الخطية لنموذج لانجماير بالشكل التالي [16]:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}K_L} + \frac{C_e}{q_{max}}$$

حيث:

- q_e : كمية المادة الممتزة عند التوازن (mg/g)
- C_e : تركيز المادة في المحلول عند التوازن (mg/L)
- q_{max} : السعة القصوى للامتزاز (mg/g)
- K_L : ثابت لانجماير المرتبط بطاقة الامتزاز (L/mg)

كما يُحسب ثابت لانجماير وفق العلاقة:

$$K_L = \frac{q_{max}}{C_e(q_{max} - q_e)}$$

II-8-2- نموذج فروندليش (Freundlich):

يُعد نموذج فروندليش من النماذج التجريبية المهمة التي وُضعت سنة 1894، ويُستخدم لوصف أنظمة الامتزاز غير المتجانسة، حيث لا يُفترض وجود سطح منتظم أو عدد محدود من المواقع النشطة. كما يُسمح فيه بتكوين امتزاز متعدد الطبقات، مما يجعله أكثر مرونة في تمثيل الأنظمة الواقعية [17].

ويتميز هذا النموذج بكونه يأخذ بعين الاعتبار عدم تجانس سطح المادة المازة، ويُعبّر عنه بمعامل $(1/n)$ الذي يعكس درجة عدم التجانس في السطح.

الصيغة الرياضية لنموذج فروندليش بالعلاقة التالية:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$$

أو بصيغة الأس:

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}}$$

حيث:

- q_e : كمية المادة الممتزة عند التوازن (mg/g)
 - C_e : تركيز المادة في المحلول عند التوازن (mg/L)
 - K_f : ثابت فروندليش المرتبط بسعة الامتزاز
 - $\frac{1}{n}$: معامل عدم التجانس السطحي
- كلما كانت قيمة $\frac{1}{n}$ أصغر، دلّ ذلك على امتزاز أكثر ملاءمة وكفاءة أعلى.

II-3-8- نموذج لانجمير -فروندليش (Sips)

يشمل ايزوتارم لانجمير -فروندليش معرفة الأسطح غير المتجانسة في الامتزاز. فهو يصف توزيع طاقة الامتزاز على السطح غير المتجانس للممتز. وعند تركيز منخفض من المادة الممتزة (adsorbate)، يتحول هذا النموذج إلى نموذج ايزوتارم فروندليش، بينما يتحول إلى ايزوتارم لانجمير عند تركيز عالٍ من المادة الممتزة [18].

يمكن التعبير عن ايزوتارم لانجمير -فروندليش بالمعادلة التالية:

$$q_e = \frac{q_m (K_s \cdot C_e)^{\frac{1}{m}}}{1 + (K_s \cdot C_e)^{\frac{1}{m}}}$$

حيث:

q_e : سعة الامتزاز عند التوازن

q_m : يمثل سعة الإمتزاز القصوى للامتزاز

C_e : تركيز المادة الممتزة عند التوازن

K_S : ثابت سيبس

II-8-4- نموذج تمكين (Temkin Isotherm Model)

يفترض نموذج تمكين أن حرارة الامتزاز لا تكون ثابتة، بل تنخفض بشكل خطي مع زيادة تغطية السطح، نتيجة التفاعل بين الجزيئات الممتزة. كما يأخذ هذا النموذج بعين الاعتبار التفاعلات الجانبية بين الجزيئات الممتزة، مما يجعله أكثر واقعية في بعض الأنظمة [19].

والمعادلة العامة لهذا النموذج تكتب بالشكل:

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln K_t + \frac{RT}{b} \ln C_e$$

حيث:

• q_e : كمية المادة الممتزة عند التوازن (mg/g)

• K_t : ثابت التوازن

• R : ثابت الغازات (8.314 J/mol.K)

• T : درجة الحرارة (K)

• bt : ثابت مرتبط بحرارة الامتزاز

II-9- الدراسة الترموديناميكية للامتزاز (Thermodynamic Study)

تُعد الدراسة الترموديناميكية للامتزاز من أهم الأدوات لفهم طبيعة العملية، حيث تسمح بتحديد ما إذا كانت العملية تلقائية أو غير تلقائية، إضافة إلى تحديد طبيعتها الحرارية (ماصة أو طاردة للحرارة)، ومدى العشوائية في النظام [12].

وترتبط الطاقة الحرة لجيبس بالتغيرات في الإنثالبي والإنتروبي وفق العلاقة التالية:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$

حيث:

- ΔG° : الطاقة الحرة لجيبس (kJ/mol)
- ΔH° : التغير في الإنثالبي (kJ/mol)
- ΔS° : التغير في الإنتروبي (kJ/mol.K)
- T : درجة الحرارة (K)

كما يمكن حساب الطاقة الحرة باستخدام ثابت الاتزان:

$$\Delta G^\circ = RT \ln K_d$$

ومن علاقة (Van't Hoff) نحصل على:

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT}$$

حيث:

- K_d : ثابت الاتزان.

وتساعد هذه العلاقات في تحديد طبيعة الامتزاز، حيث إن:

- $\Delta H^\circ > 0$: امتزاز ماص للحرارة
- $\Delta H^\circ < 0$: امتزاز طارد للحرارة
- $\Delta G^\circ < 0$: العملية تلقائية

تُظهر نماذج الإيزوتارم والتحليل الترموديناميكي أن عملية الامتزاز تخضع لتفاعلات معقدة تجمع بين العوامل السطحية والحرارية، مما يسمح بفهم دقيق لآلية إزالة الملوثات العضوية. ويُعد اختيار النموذج المناسب خطوة أساسية لتفسير سلوك المواد المازة مثل الجبس المعاد تدويره وتقييم كفاءتها في معالجة المياه.

II-9- حركية الامتزاز (Adsorption Kinetics)

تُعد دراسة حركية الامتزاز من الجوانب الأساسية في فهم آلية انتقال الملوثات من المحلول إلى سطح المادة المازة، إذ تُمكن من وصف سرعة العملية وتحديد الخطوات المسيطرة عليها، سواء كانت ناتجة عن الانتشار أو عن التفاعل السطحي. كما تساعد هذه الدراسة في التمييز بين طبيعة الامتزاز إذا ما كان فيزيائياً أو كيميائياً، إضافة إلى تقييم كفاءة المواد المازة مثل الجبس المعاد تدويره في إزالة الأصباغ العضوية من المياه [20].

ويتم تحليل السلوك الحركي للامتزاز اعتماداً على نماذج رياضية تصف تغير كمية المادة الممتزة مع الزمن حتى الوصول إلى حالة التوازن. ومن بين أهم هذه النماذج: نموذج الرتبة الأولى الكاذبة ونموذج الرتبة الثانية الكاذبة.

II-9-1- نموذج الرتبة الأولى الكاذبة (Pseudo-First Order Model)

يُعتبر نموذج الرتبة الأولى الكاذبة ويرمز له اختصاراً PFO من النماذج الكلاسيكية المستخدمة في وصف حركية الامتزاز، حيث يفترض أن معدل الامتزاز يتناسب طردياً مع الفرق بين كمية المادة الممتزة عند التوازن والكمية الممتزة عند زمن معين. ويُستخدم هذا النموذج غالباً في المراحل الأولى من العملية، خاصة في حالات الامتزاز الفيزيائي أو عندما تكون المواقع النشطة متوفرة بشكل كبير [21].

الصيغة الخطية للنموذج:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$$

حيث:

- q_e : كمية المادة الممتزة عند التوازن (mg/g)
- q_t : كمية المادة الممتزة عند الزمن (mg/g)
- k_1 : ثابت سرعة الامتزاز من الرتبة الأولى (min^{-1})
- t : الزمن (min)

ويُستخدم هذا النموذج بشكل واسع في الدراسات الأولية، إلا أنه في كثير من الحالات لا يصف بدقة سلوك الامتزاز على المدى الطويل، خصوصاً عندما تكون العملية خاضعة لتفاعلات كيميائية أو عندما تكون مواقع الامتزاز محدودة.

II-9-2- نموذج الرتبة الثانية الكاذبة (Pseudo-Second Order Model)

يعتمد نموذج الرتبة الثانية الكاذبة PSO على فرضية أن عملية الامتزاز تتحكم فيها التفاعلات الكيميائية بين المادة الممتزة والمواقع النشطة على سطح المادة المازة. لذلك يُعتبر هذا النموذج أكثر دقة في العديد من الأنظمة، خاصة تلك التي يكون فيها الامتزاز ناتجاً عن روابط كيميائية أو تفاعلات قوية بين السطح والمادة الممتزة [22].

ويفترض هذا النموذج أن معدل الامتزاز يتناسب مع مربع عدد المواقع غير المشغولة، مما يعكس طبيعة التفاعل الكيميائي.

الصيغة الخطية للنموذج:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

حيث:

- q_t : كمية المادة الممتزة عند الزمن (mg/g)
- q_e : كمية المادة الممتزة عند التوازن (mg/g)
- k_2 : ثابت سرعة الامتزاز من الرتبة الثانية (g/mg/min)
- t : الزمن (min)

ويُظهر النموذج من الرتبة الأولى ملاءمة جيدة في الحالات التي تكون فيها العملية فيزيائية أو سريعة في بدايتها، بينما يُعتبر نموذج الرتبة الثانية أكثر دقة في وصف العديد من أنظمة الامتزاز الفعلية، خصوصاً عندما يكون الامتزاز ناتجاً عن تفاعلات كيميائية بين الجزيئات والمواقع النشطة [22].

وفي الدراسات التطبيقية، يتم اختيار النموذج الأنسب بناءً على معامل الارتباط (R^2) ومدى تطابق القيم النظرية مع القيم التجريبية، مما يسمح بتحديد الآلية المسيطرة على العملية بدقة عالية [12].

و يمثل معامل الارتباط R^2 مؤشراً إحصائياً يستخدم لتقييم مدى توافق النموذج الرياضي مع النتائج التجريبية، حيث تتراوح قيمته بين 0 و 1 وكلما اقتربت قيمة R^2 من الواحد، دل ذلك على توافق أكبر بين القيم المحسوبة والقيم التجريبية، وبالتالي تكون قدرة النموذج على وصف سلوك الإمتزاز أفضل. لذلك يستخدم هذا المعامل لاختيار النموذج الحركي الأنسب لوصف العملية المدروسة.

تُعد النماذج الحركية أداة أساسية لفهم ديناميكية الامتزاز، حيث تتيح تحديد زمن الوصول إلى التوازن، وتفسير طبيعة التفاعل، وتقييم كفاءة المواد المازة. وفي هذا السياق، تُستخدم هذه النماذج بشكل واسع في دراسة إزالة الأصباغ العضوية باستخدام مواد مبتكرة مثل الجبس المعاد تدويره، بهدف تحسين الأداء البيئي وتقليل التلوث المائي.

II-10- تطبيقات الامتزاز (Applications of Adsorption)

يُعد الامتزاز من أهم العمليات الفيزيائية-الكيميائية متعددة الاستخدامات، نظرًا لكفاءته العالية، وسهولة تشغيله، وإمكانية اعتماده على مواد مازة متنوعة منخفضة التكلفة أو طبيعية. وقد ساهمت هذه الخصائص في توسيع نطاق تطبيقاته ليشمل مجالات حيوية متعددة، خاصة في معالجة التلوث البيئي وتحسين جودة المنتجات الصناعية والطبية [5].

II-10-1- معالجة المياه (Water Treatment)

تُعتبر معالجة المياه من أهم وأوسع تطبيقات الامتزاز، حيث يُستخدم لإزالة مجموعة متنوعة من الملوثات العضوية وغير العضوية من المياه السطحية والجوفية ومياه الصرف الصناعي. وتشمل هذه الملوثات الأصباغ، المعادن الثقيلة، المركبات العضوية السامة، والمبيدات [23].

ويتميز الامتزاز في هذا المجال بقدرته العالية على إزالة الملوثات حتى عند تراكيز منخفضة جدًا، وهو ما يجعله أكثر فعالية مقارنة ببعض التقنيات التقليدية مثل الترسيب أو التصفية الفيزيائية. كما يمكن التحكم في كفاءة العملية من خلال تعديل العوامل التشغيلية مثل pH، درجة الحرارة، زمن التماس، وجرعة المادة المازة.

وفي هذا السياق، يُعد استخدام المواد منخفضة التكلفة مثل المواد الطبيعية أو المعاد تدويرها، ومن بينها الجبس المعاد تدويره، خيارًا واعدًا لتحسين كفاءة إزالة الأصباغ العضوية وتقليل التكلفة الاقتصادية والبيئية لعمليات المعالجة.

II-10-2- التطبيقات الصناعية (Industrial Applications)

يُستخدم الامتزاز على نطاق واسع في الصناعات الكيميائية والبتروكيميائية والغذائية، نظرًا لدوره المهم في عمليات الفصل والتنقية. ففي الصناعة الكيميائية، يُستعمل لتنقية المواد الخام والمنتجات النهائية من الشوائب. أما في الصناعة البترولية، فيُستخدم لإزالة المركبات غير المرغوب فيها من الوقود وتحسين جودته [1].

كما يدخل الامتزاز في عمليات تنقية الزيوت والسكريات والمحاليل الصناعية، إضافة إلى استخدامه في تقنيات فصل الغازات وتنقية الهواء الصناعي من المركبات العضوية المتطايرة. وتُعد تقنية الامتزاز المتأرجح بالضغط (PSA) من أبرز التطبيقات الصناعية المتقدمة، حيث تُستخدم لفصل الغازات مثل الأكسجين والنيتروجين على نطاق واسع.

II-10-3- المجال الطبي (Medical Applications)

يُعد الامتزاز ذا أهمية كبيرة في المجال الطبي والبيولوجي، حيث يُستخدم في إزالة السموم من الجسم وتنقية الدم، خاصة باستخدام الكربون المنشط في حالات التسمم أو الفشل الكلوي. كما يُستخدم في أنظمة الغسيل الكلوي (Dialysis) لإزالة الفضلات والمواد السامة من الدم [3].

إضافة إلى ذلك، يدخل الامتزاز في تصميم بعض المستشعرات الحيوية (Biosensors) وفي أنظمة إيصال الدواء (Drug Delivery Systems)، حيث يتم التحكم في إطلاق المواد الدوائية اعتمادًا على خصائص الامتزاز على الأسطح النانوية. كما يُستخدم في تنقية المحاليل البيولوجية وإزالة البروتينات غير المرغوب فيها في التطبيقات المخبرية.

II-10-4- التطبيقات البيئية (Environmental Applications)

يُعتبر الامتزاز من التقنيات الأساسية في حماية البيئة ومكافحة التلوث، حيث يُستخدم في إزالة الملوثات من الهواء والتربة [23].

ففي مجال تلوث الهواء، يُستخدم الامتزاز لإزالة الغازات السامة والمركبات العضوية المتطايرة (VOCs) الناتجة عن الأنشطة الصناعية، مما يقلل من الانبعاثات الضارة. كما يُستخدم في معالجة التربة الملوثة بالمركبات الكيميائية، من خلال احتجاز الملوثات داخل المواد المازة ومنع انتشارها في البيئة [1].

وتتزايد أهمية الامتزاز في السياق البيئي الحديث مع التوجه نحو استخدام مواد صديقة للبيئة ومستدامة، مثل المواد الطبيعية والمعاد تدويرها، مما يجعل هذه التقنية أحد الحلول الفعالة لتحقيق التنمية المستدامة وتقليل الأثر البيئي للأنشطة الصناعية [24].

تُظهر هذه التطبيقات التنوع الكبير لاستخدامات الامتزاز في مختلف المجالات، مما يعكس أهميته العلمية والتطبيقية. ويظل مجال معالجة المياه الأكثر استخدامًا لهذه التقنية، خاصة في إزالة الأصباغ العضوية، وهو ما يجعل تطوير مواد مازة فعالة مثل الجبس المعاد تدويره محورًا مهمًا في الأبحاث الحديثة.

خلاصة الفصل

يتناول الفصل الثاني دراسة نظرية شاملة لظاهرة الامتزاز (Adsorption) باعتبارها إحدى أهم العمليات السطحية في الكيمياء الفيزيائية والبيئية حيث تم عرض المفاهيم الأساسية للامتزاز، والتمييز بينه وبين الامتصاص، مع إبراز أهميته إضافة إلى تطبيقاته الواسعة. كما تم شرح آلية الامتزاز ومراحله المختلفة، التي تشمل الانتقال في المحلول، والانتشار عبر الغشاء، والانتشار داخل الحبيبات، ثم التثبيت على المواقع النشطة.

كما تم التطرق إلى أنواع الامتزاز، والعوامل المؤثرة عليه إضافة إلى النماذج الرياضية التي تصف سلوك الامتزاز عند التوازن مثل نماذج لانجمير (Langmuir) وفروندليش (Freundlich) وتمكين (Temkin) وسيبس (sips). وتم أيضاً التطرق إلى الحركية والنماذج التي تحكم سرعة الامتزاز، والدراسة الترموديناميكية المرتبطة به.

وبذلك يوفر هذا الفصل قاعدة نظرية أساسية تساعد على فهم النتائج التجريبية وتفسير سلوك المواد المازة، خاصة في سياق استخدام مواد مستدامة مثل الجبس المعاد تدويره في إزالة الأصباغ من المياه.

قائمة المراجع

- [1] Ruthven, D. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. New York: John Wiley & Sons.
- [2] Dąbrowski, A. (2001). Adsorption - from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93(1–3), 135–224. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8)
- [3] Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G., & Sing, K. S. W. (2014). *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications* (2nd ed.). Oxford: Academic Press.
- [4] Giles, C. H., Smith, D., & Huitson, A. (1974). A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I. Theoretical. *Journal of Colloid and Interface Science*, 47(3), 755–765. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(74\)90252-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(74)90252-5)
- [5] Forgacs, E., Cserhádi, T., & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: A review. *Environment International*, 30(7), 953–971. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.001>
- [6] Adamson, A. W., & Gast, A. P. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces* (6th ed.). New York: Wiley-Interscience.
- [7] Lamri, N. (2010). *Élimination du colorant Orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption*. Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine.
- [8] Weber, W. J., Jr., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31–59. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000430>
- [9] Boyd, G. E., Adamson, A. W., & Myers, L. S. (1947). The exchange adsorption of ions from aqueous solutions by organic zeolites. II. Kinetics. *Journal of the American Chemical Society*, 69(11), 2836–2848. <https://doi.org/10.1021/ja01203a066>
- [10] Do, D. D. (1998). *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*. London: Imperial College Press.

- [11] Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- [12] Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- [13] Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313–2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- [14] N'diaye, A. D., et al. (2022). A review of biomaterial as an adsorbent: From the bibliometric literature review, the definition of dyes and adsorbent, the adsorption phenomena and isotherm models, factors affecting the adsorption process, to the use of Typha species waste as adsorbent. *Communications in Science and Technology*, 7(2), 140–153.
- [15] Al-Duri, B. (1995). Mass transfer in adsorption systems. In G. McKay (Ed.), *Use of Adsorbents for the Removal of Pollutants from Wastewaters* (pp. 133–172). CRC Press.
- [16] Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- [17] Freundlich, H. M. F. (1906). Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57, 385–470.
- [18] Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017(1), 3039817.
- [19] Temkin, M. I., & Pyzhev, V. (1940). Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts. *Acta Physicochimica U.R.S.S.*, 12, 327–356.
- [20] Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood. *Process Safety and Environmental Protection*, 76(2), 183–191. <https://doi.org/10.1205/095758298529326>

- [21] Lagergren, S. (1898). Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(4), 1–39.
- [22] Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- [23] Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)
- [24] Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061–1085. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>

الجزء العملي

الفصل الثالث

المواد، الأجهزة والإجراءات التجريبية

تمهيد

يتناول هذا الفصل الجانب التطبيقي للدراسة، حيث تم عرض المواد الكيميائية والأجهزة المستخدمة، إضافة إلى مختلف الإجراءات والتقنيات التجريبية المعتمدة لإنجاز العمل البحثي. وقد شملت الدراسة تحضير مخلفات الجبس المعاد تدويره واستعمالها كمادة مازة في إزالة صبغة أحمر الكونغو من المحاليل المائية، إلى جانب تحضير المحاليل القياسية والمخففة المستخدمة في تجارب الامتزاز. كما تم توصيف المادة المازة باستعمال مجموعة من التقنيات التحليلية، من بينها إنعراج الأشعة السينية XRD، مطيافية الأشعة تحت الحمراء FTIR، المجهر الإلكتروني الماسح SEM، إضافة إلى مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية UV-Vis لمتابعة تغير تركيز الصبغة قبل وبعد عملية الامتزاز. كذلك تم دراسة شحنة السطح عند نقطة الشحنة الصفرية pH_{pzc} وتحديد الطول الموجي الأعظمي ومنحنى المعايرة لصبغة أحمر الكونغو، بهدف تقييم كفاءة المادة المدروسة وفهم سلوكها الامتزازي تحت مختلف الظروف التجريبية.

III-1- المواد والطرق المستخدمة:

الجدول (III – 1): المواد والأدوات الزجاجية المستخدمة.

المواد	الأدوات الزجاجية
مخلفات الجبس	بيشر (300-250-100 ml)
صبغة أحمر الكونغو	إرلن ماير 500 ml
ماء مقطر	حجلة عيارية 50 ml
هيدروكسيد الصوديوم NaOH (0.1M)	مخبر مدرج 100 ml
حمض الهيدروكلوريك HCl (0.1M)	ماصات 2-5-10 ml
كلوريد الصوديوم NaCl	مخلوط مغناطيسي

الجدول (III - 2): الأجهزة المستخدمة.

الأجهزة	النوع
جهاز الأشعة فوق البنفسجية - المرئية (UV-VIS)	Shimadzu UV-1900i
جهاز الأشعة تحت الحمراء (FT-IR)	Agilent Technologies Cary 630 FTIR
جهاز الإنعراج الآلي (XRD)	PROTO AXRD Benchtop powder diffraction
جهاز المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بالتحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة SEM/EDS	Phenom Prox DESKTOP SEM/EDS
جهاز الطرد المركزي	DLAB-DMO412
جهاز pH meter	WTW pH 3110
ميزان حساس إلكتروني	OHAUS Adventurer Analytical Balance من نوع

III-2- تحضير الجبس :

تضمنت عملية تحضير مخلفات الجبس الصناعية الصلبة لاستخدامها كمادة مازة في إزالة صبغة أحمر الكونغو عدة خطوات أساسية، أولاً تم جمع مخلفات ألواح الجبس الناتجة عن عمليات البناء والهدم. ونظراً لطبيعة الجبس ثنائي هيدرات كبريتات الكالسيوم ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) وحساسيته للرطوبة واحتوائه على ماء التبلور الضروري لبنيته البلورية، تم تجنب غسل القطع بالماء أو أي محاليل مائية لتفادي حدوث ذوبان جزئي أو تغيرات سطحية قد تؤثر في خصائص الإمتزاز وبدلاً من ذلك، اعتمدت عملية التنظيف على الإزالة الميكانيكية الجافة للشوائب السطحية فقط، باستخدام فرشاة ناعمة، وذلك لإزالة الغبار والجسيمات العالقة التي قد تعيق عملية الإمتزاز، مع الحفاظ على سلامة البنية البلورية للمادة وعدم التأثير على خصائصها الفيزيائية والكيميائية الأساسية.

بعد عملية التنظيف الجاف، خُضعت قطع الجبس لعملية تقطيع إلى أحجام وأشكال منتظمة على شكل متوازي المستطيلات. تم توحيد هذه القطع بعناية لضمان التجانس، حيث بلغ الوزن الإجمالي لثلاث قطع من الجبس 0.7 g، وتم اعتماد هذا الوزن لتوحيد خصائص العينات وضمان دقة النتائج التجريبية. ويهدف هذا التقطيع المنتظم إلى زيادة مساحة السطح المعرضة للمحلول المحتوي على الصبغة، مما يعزز كفاءة الامتزاز.



الشكل (III - 1): مخلفات ألواح الجبس.

III-3- تحضير المحلول المائي لصبغة:

لتحضير المحلول المائي لصبغة أحمر الكونغو (CR) بتركيز 1000 ppm، تم وزن 0.5 g من الصبغة الصلبة بدقة بإستعمال ميزان حساس، ثم نقلها إلى دورق حجمي سعة 500 ml. بعد ذلك أضيفت كمية مناسبة من الماء المقطر لإذابة الصبغة، واستكمل الحجم بالماء المقطر حتى خط المعايرة، ثم رُجَّ المحلول جيداً لضمان التجانس التام للمحلول الشكل (III - 2):



الشكل (III - 2): قياس كتلة أحمر الكونغو
الشكل (III - 3): محلول مائي لأحمر الكونغو بتركيز 1000 ppm

III-4- تحضير المحاليل المخففة ذات التراكيز المختلفة:

تم تحضير المحاليل ذات التراكيز المختلفة انطلاقاً من المحلول الأم بإستعمال قانون التمديد، والذي يُعبّر عنه بالعلاقة التالية:

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

حيث:

C_1 : تركيز المحلول الأم (1000 ppm).

V_1 : حجم المحلول الأم المطلوب أخذه للتحضير.

C_2 : التركيز المطلوب

V_2 : الحجم النهائي للمحلول المخفف (100 ml).

من أجل توضيح كيفية تحضير المحاليل المستعملة في الدراسة، تم إعداد محلول من صبغة أحمر الكونغو بتركيز 5 ppm وباعتماد على قانون التمديد تم حساب حجم المحلول الأم اللازم كما يلي:

$$1000 \times V_1 = 5 \times 100$$

ومنه نجد:

$$V_1 = \frac{5 \times 100}{1000} = 0.5 \text{ ml}$$

بعد ذلك، تم سحب 0.5 ml من المحلول الأم باستعمال ماصة حجمية، ثم نقلها إلى ورق حجمي سعة 100 ml، وأكمل الحجم بالماء المقطر حتى علامة المعايرة للحصول على المحلول النهائي بالتركيز المطلوب. واعتمدت نفس الطريقة لتحضير بقية المحاليل ذات التراكيز المختلفة (5-10-15-20-25-50 ppm)، وذلك لضمان الحصول على سلسلة من المحاليل المخففة المستعملة في هذه الدراسة الشكل (III - 4):



الشكل (III - 4): المحاليل المخففة ذات التراكيز المختلفة.

III-5- البروتوكول التجريبي لدراسة امتزاز صبغة أحمر الكونغو وتحديد المعلومات الامتزازية:

تمت دراسة امتزاز صبغة أحمر الكونغو على الجبس المعاد تدويره باستعمال محاليل مائية ذات تراكيز ابتدائية مختلفة (5، 10، 15، 20، 25 و 50 ppm). حُضِر لكل تركيز ثلاث عينات مستقلة عند قيم رقم هيدروجيني مختلفة (pH = 5,7,9)، حيث تم ضبط الرقم الهيدروجيني باستعمال محاليل حمض الهيدروكلوريك وهيدروكسيد الصوديوم بتركيز 0.1 M .

أضيفت كمية ثابتة من الجبس إلى كل محلول 0.7 g، ثم وُضعت العينات تحت التحريك باستعمال مخلاط مغناطيسي بسرعة 350 rpm لضمان تجانس الوسط وتحسين التلامس بين الصبغة وسطح المادة المازة عند درجة حرارة ثابتة 25°C .



الشكل (III – 5): العينات تحت التحريك باستعمال مخلاط مغناطيسي بسرعة 350 rpm

وخلال عملية الامتزاز، سُحبت عينات حجم كل منها 5 mL على فترات زمنية منتظمة قدرها 20 دقيقة، وذلك عند الأزمنة: 20، 40، 60، 80، 100، 120 و 140 min.



الشكل (III - 6): عملية سحب وجمع العينات من محاليل صبغة احمر الكونغو

بعد ذلك خضعت العينات للطرد المركزي من أجل فصل الجسيمات الصلبة عن المحلول، ثم قيست امتصاصية الراشح باستعمال مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis) عند الطول الموجي الأعظمي المميز لصبغة أحمر الكونغو.

استُخدمت قيم الامتصاصية المتحصل عليها لتحديد تراكيز الصبغة المتبقية في المحلول اعتمادًا على منحنيات المعايرة، ومن ثم حساب مردود الإزالة وكفاءة الامتزاز ودراسة تأثير كل من زمن التلامس والتركيز الابتدائي والرقم الهيدروجيني على أداء المادة المازة.



الشكل (III - 7): العينات اثناء عملية الطرد المركزي

من أجل تقييم فعالية المادة المازة، تم حساب كفاءة الازالة DR% وفق العلاقة التالية :

$$DR\% = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

حيث:

• $DR\%$: كفاءة الامتزاز .

• C_0 : التركيز الأولي للمادة الممتزة (ppm).

• C_e : تركيز المادة الممتزة في المحلول عند التوازن (ppm).

كما تم حساب كمية المادة الممتزة عند التوازن وفق العلاقة التالية :

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

• q_e : كمية المادة الممتزة عند التوازن (mg/g)

• V : حجم المحلول (L)

• m : كتلة المادة المازة (g)

III-6- دراسة الخصائص:

تم توصيف الجبس المعاد تدويره بنيوياً ومورفولوجياً باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية XRD، والمجهر الإلكتروني الماسح SEM-EDS، كما حُددت المجموعات الوظيفية على سطحه بواسطة مطيافية الأشعة تحت الحمراء FTIR، تم استخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية UV-Vis لمتابعة عملية الامتزاز بقياس تغير امتصاصية المحلول وتحديد تركيز الملوث قبل وبعد المعالجة بالجبس المعاد تدويره إضافةً إلى ذلك، دُرست شحنة السطح pH_{pzc} .

III-6-1 إنعراج الأشعة السينية (XRD):

تُعد الأشعة السينية أو أشعة إكس X-ray موجات كهرومغناطيسية ذات طول موجي قصير وتردد أعلى، مما يمنحها طاقة كبيرة وقدرة على اختراق المواد. تنتقل هذه الأشعة في خطوط مستقيمة دون أن تتأثر بالمجالات الكهربائية أو المغناطيسية، لأنها غير مشحونة كهربائياً. ويتراوح طولها الموجي بين 0.01 و 10 nm، وترتبط طاقتها بطولها الموجي وفق العلاقة الفيزيائية التالي [1]:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

E: طاقة الفوتون (J)

h: ثابت بلانك (6.626×10^{-34} J.s)

c: سرعة الضوء (3×10^8 m/s)

λ : الطول الموجي (m)

يعتمد مبدأ الإنعراج الألي للأشعة السينية X-ray Diffraction على تسليط الأشعة على المادة البلورية، فتتعرض الأشعة للحيود نتيجة تفاعلها مع المستويات الذرية داخل البلورة. يحدث الإنعراج عندما يتحقق قانون براغ وفق العلاقة التالية [2]:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

حيث:

n: رتبة الإنعكاس

λ : الطول الموجي للأشعة السينية

d: المسافة بين المستويات البلورية

θ : زاوية سقوط الأشعة

وتُعد تقنية XRD من أهم تقنيات توصيف المواد في مجالات الكيمياء، الفيزياء، علوم المواد، الجيولوجيا، النانوتكنولوجيا . كما تُستخدم في تحليل المعادن والصخور، ودراسة المواد النانوية، ومراقبة جودة المواد الصناعية وتوصيف السيراميك والمعادن [1].

في هذه الدراسة، تم استخدام جهاز إنعراج الأشعة السينية على المسحوق من نوع PROTO AXRD Benchtop powder diffraction، والذي يعمل وفق تصميم $(2\theta - \theta)$ ، حيث تدور العينة بنصف سرعة دوران الكاشف بالنسبة لشعاع الأشعة السينية الساقط. وقد استُخدم أنبوب أشعة سينية ذو هدف نحاسي لتوليد أشعة سينية مميزة بطول موجي يقارب $1.5425 \text{ \AA}$ الشكل (III – 8):



الشكل (III – 8): جهاز الانعراج الألي من نوع PROTO AXRD Benchtop powder diffraction

يطحن الجبس يدويا ويوضع على شكل مسحوق في حامل للعينة، تتعرض عينة المسحوق في هذا الجهاز لحزمة من الأشعة السينية أحادية اللون لتوليد نمط إنعراج الأشعة السينية، وهذا النمط يوفر معلومات بنيوية للمادة.

III-6-2 مطيافية الأشعة تحت الحمراء FTIR:

تقنية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) Fourier-transform infrared spectroscopy تعد من التقنيات التحليلية المهمة المستخدمة في دراسة التركيب الكيميائي للمواد، من خلال تحديد المجموعات الوظيفية ونوع الروابط الكيميائية الموجودة داخل الجزيئات. وتعتمد هذه التقنية على أن لكل مركب كيميائي طيف امتصاص مميز يُعرف بالبصمة الطيفية، مما يسمح بتمييز المركبات المختلفة بدقة عالية [3].

يعتمد مبدأ عمل FTIR على تمرير إشعاع الأشعة تحت الحمراء عبر العينة، حيث تمتص الجزيئات الترددات التي توافق ترددات اهتزاز روابطها الكيميائية، سواء كانت اهتزازات تمدد (Stretching) أو إنحناء (Bending). وينتج عن ذلك طيف امتصاص يحتوي على قمم مميزة تعكس طبيعة المجموعات الوظيفية والتركيب الجزيئي للمادة [3].

يقوم الجهاز بتسجيل الإشارة على شكل نمط تداخل (Interferogram) باستخدام مقياس تداخل من نوع Michelson Interferometer، ثم تتم معالجة هذه الإشارة رياضياً بواسطة تحويل فورييه للحصول على الطيف النهائي الذي يمثل الخصائص الكيميائية للعينة [4].

وتُستخدم تقنية FTIR في العديد من المجالات، أهمها:

في الكيمياء:

تحديد المجموعات الوظيفية للمركبات العضوية

التعرف على الروابط الكيميائية

في علوم المواد:

توصيف البوليمرات والمواد المركبة والنانوية

في الصيدلة:

مراقبة جودة الأدوية وتحديد تركيبها الكيميائي

إضافة إلى تطبيقاتها في البيولوجيا لدراسة الجزيئات الحيوية مثل البروتينات والدهون، وكذلك في المجال البيئي لتحليل الملوثات وتحديد مكونات العينات البيئية المختلفة [3,4].

للحصول على أطياف الأشعة تحت الحمراء تم استخدام جهاز Spectromètre A gilent Technolo
gies Cary 630 FTIR لتسجيل أطياف الأشعة تحت الحمراء للعينة قبل وبعد عملية الامتزاز، بهدف مقارنة التغيرات الطيفية الناتجة وتحديد المجموعات الوظيفية الموجودة في كل عينة والتغيرات الكيميائية الحاصلة على سطح المادة الشكل (III – 9):



الشكل (III – 9): جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء Spectrometer A gilent Technologies Cary 630 FTIR

III-6-3 مطيافية الأشعة فوق البنفسجية (UV-Vis):

تعتبر تقنية مطيافية الأشعة فوق البنفسجية - المرئية (UV-Vis) أحد التقنيات الطيفية المستخدمة لدراسة قياس امتصاص العينة للأشعة الكهرومغناطيسية في مجالي طيفي فوق البنفسجية والمرئية، تعتمد هذه التقنية على انتقال الإلكترونات داخل الجزيئات من مستويات طاقة منخفضة إلى مستويات أعلى عند امتصاص فوتونات ذات أطوال موجية مناسبة، مما يسمح بتحديد خصائص التركيب الإلكتروني للمادة وتركيزها في المحاليل [5].

يعتمد مبدأ عمل هذه التقنية على امتصاص جزيئات المادة الموجودة في المحلول للإشعاع الساقط عند أطوال موجية محددة، حيث تتناسب الإمتصاصية طردياً مع تركيز المادة الممتصة وطول المسار الضوئي داخل الخلية وفقاً لقانون بير-لامبرت:

$$A = \epsilon lc$$

حيث:

A: الإمتصاصية

l: طول المسار الضوئي (cm)

c: تركيز المحلول (mol/l)

ϵ : معامل الإمتصاصية الجزيئي ($\text{l.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$)

تستخدم تقنية UV-Vis في العديد من المجالات، مثل الكيمياء التحليلية لتحديد تركيز المركبات في المحاليل، وفي علوم المواد لدراسة خصائص الجسيمات النانوية، وفي البيولوجيا والكيمياء الحيوية لتحليل البروتينات والأحماض النووية، إضافة إلى التطبيقات البيئية في الكشف عن الملوثات العضوية وغير العضوية في المياه [6,5].

من أجل قياس طيف الامتصاص للمحلول قبل وبعد عملية الامتزاز، تم استخدام جهاز مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية UV-Vis بهدف متابعة التغير في التركيز مع الزمن وتقييم كفاءة المادة المازة من خلال انخفاض شدة الامتصاص، مما يسمح بتحديد فعالية عملية الإزالة وسلوك الامتزاز. الشكل (III – 10).



الشكل (III – 10): جهاز مطيافية الأشعة فوق البنفسجية -المرئية (UV-Vis)

III-6-4 المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بالتحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة :

تُعد تقنية المجهر الإلكتروني الماسح Scanning Electron Microscopy (SEM/EDS) من أهم تقنيات توصيف المواد المستخدمة لدراسة مورفولوجية الأسطح والبنية المجهرية للمواد بدقة عالية. تعتمد

هذه التقنية على استعمال حزمة مركزة من الإلكترونات لمسح سطح العينة، مما يسمح بالحصول على صور مفصلة توضح شكل السطح، وحجم الحبيبات، والمسامية، والتجانس البنيوي للمواد [7].

يعتمد مبدأ عمل جهاز SEM على توجيه حزمة من الإلكترونات عالية الطاقة نحو سطح العينة داخل حجرة مفرغة، حيث تتفاعل الإلكترونات الساقطة مع ذرات المادة منتجةً عدة إشارات، أهمها الإلكترونات الثانوية والإلكترونات المرتدة. يتم التقاط هذه الإشارات وتحويلها إلى صور مكبرة عالية الدقة تعكس الخصائص المورفولوجية والطبوغرافية لسطح العينة [7,8].

تتميز تقنية SEM بقدرتها على توفير تكبيرات عالية ودقة تصوير كبيرة مقارنة بالمجاهر الضوئية التقليدية، كما تسمح بدراسة البنية السطحية للمواد الصلبة وتحليل توزيع الجسيمات وحجمها وشكلها [8]. ويمكن كذلك ربط الجهاز بتقنية التحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة EDX للحصول على معلومات حول التركيب العنصري للعينة [9].

تُستخدم تقنية SEM في العديد من المجالات، مثل علوم المواد لتصنيف المواد النانوية والسيراميك والبوليمرات، وفي البيولوجيا لدراسة الصخور والمعادن، وفي البيولوجيا لمعاينة البنى المجهرية للخلايا والأنسجة، إضافة إلى التطبيقات الصناعية المتعلقة بمراقبة جودة المواد وتحليل العيوب السطحية [7,9].

تم استخدام جهاز SEM/EDS لدراسة الخصائص المورفولوجية لسطح المادة قبل وبعد عملية الامتزاز، بهدف ملاحظة التغيرات البنيوية والسطحية الناتجة عن تثبيت جزيئات الملوث على سطح المادة المازة، مما يساعد على تفسير آلية الامتزاز وفعالية المادة المستخدمة. الشكل (III – 11)



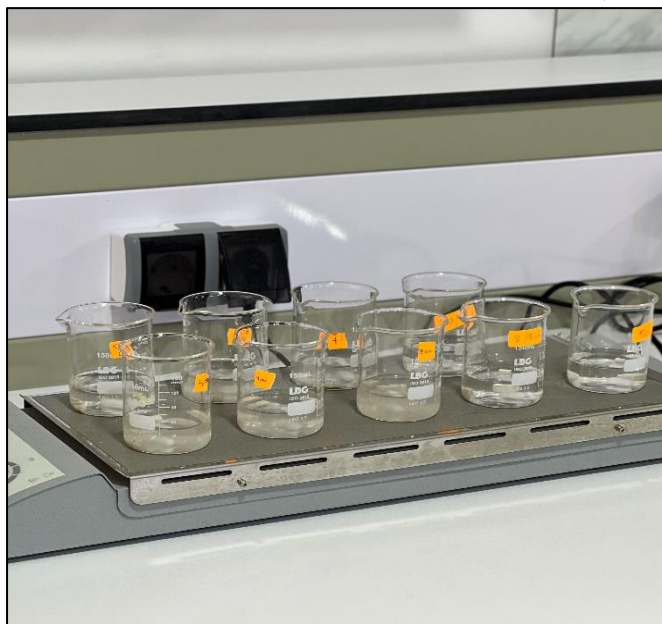
الشكل (III – 11): جهاز المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بالتحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة Phenom Prox DESKTOP SEM/EDS

III-6-5 دراسة شحنة السطح عند نقطة الشحنة الصفرية (pH_{PZC}) :

تمت دراسة شحنة سطح الجبس عند نقطة الشحنة الصفرية (pH_{PZC}) باستعمال طريقة انجراف الرقم الهيدروجيني، وذلك ضمن مجال pH يتراوح بين 3 و 11. ولتحقيق ذلك، حُضِرَت محاليل من حمض الهيدروكلوريك (HCl) وهيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيز 0.1M، كما استُخدم محلول كلوريد الصوديوم (NaCl) بتركيز 0.1M كمحلول داعم.

تم تحضير 9 بيشرات سعة 100 ml، يحتوي كل منها على 50 ml من محلول NaCl، ثم عُدِلَت قيم الرقم الهيدروجيني الابتدائية باستعمال محاليل HCl و NaOH للحصول على قيم pH مختلفة ضمن المجال المدروس. بعد ذلك، أضيفت كمية 0.7 g من قطع الجبس إلى كل بيشر، ثم تُرِكَت العينات تحت التحريك المغناطيسي لمدة 24 ساعة لضمان الوصول إلى حالة التوازن. الشكل (III – 12)

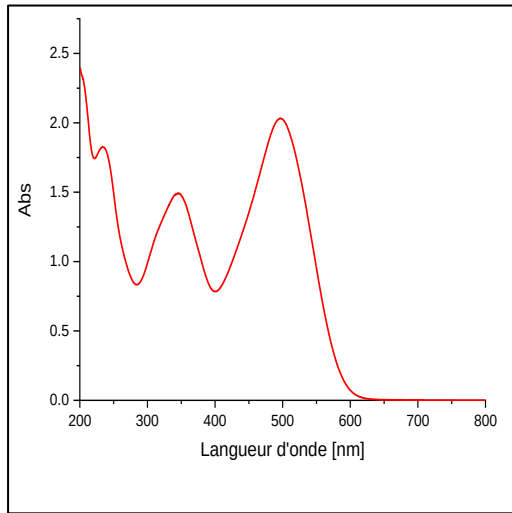
في نهاية التجربة، تم قياس الرقم الهيدروجيني النهائي لكل عينة، ثم حُسب الفرق بين قيمتي الرقم الهيدروجيني الابتدائي والنهائي (ΔpH).



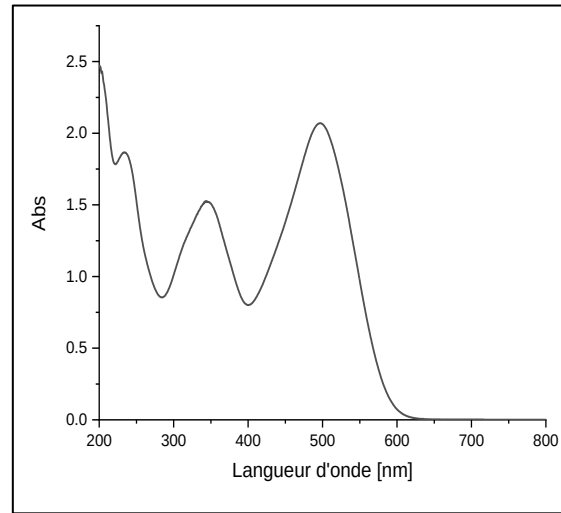
الشكل (III – 12): تحريك عينات الجبس مغناطيسياً أثناء دراسة pH_{PZC}

III-6-6 تحديد القيمة التجريبية لأقصى طول موجي لصبغة أحمر الكونغو (RC) :

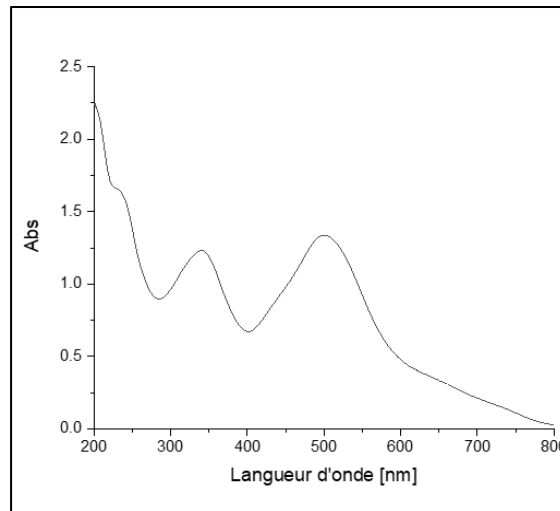
لتحديد الطول الموجي الأعظمي لصبغة أحمر الكونغو عند قيم pH مختلفة (5.7.9)، تم تمرير الصبغة في جهاز الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis) في المجال (200-800nm) عند pH 7 و pH 9، حيث ظهرت أعلى قمة عند 497 nm تدل على أقصى طول موجي للصبغة المدروسة أما عند pH 5 فكانت أعلى قمة عند 500 nm.



(b)



(a)



(c)

الشكل (III - 13): منحنى الطول الموجي الأعظمي لصبغة أحمر الكونغو عند (a) pH=9 ، (b) pH=7 ، (c) pH=5 .

III-6-7 تحديد منحنى المعايرة لصبغة أحمر الكونغو:

لرسم منحنى المعايرة لصبغة أحمر الكونغو، تم تحضير مجموعة من المحاليل القياسية انطلاقاً من المحلول الأم ذي التركيز 1000 ppm وذلك بإجراء تخفيفات متتالية للحصول على تراكيز مختلفة. قيس امتصاصية هذه المحاليل باستعمال جهاز UV-Vis بعد تثبيت الطول الموجي

الأعظمي عند $\lambda_{\max} = 497\text{nm}$

في الوسط المتعادل pH = 7.

رُسم منحنى المعايرة بدلالة الامتصاصية A حسب التركيز C ، ومنه تم الحصول على معادلة المستقيم التالية:

$$A = aC + b$$

حيث:

A : الامتصاصية

C : التركيز

a, b : ثوابت المعادلة

وبنفس الطريقة يرسم منحنى المعايرة للصبغة بعد تثبيت الطول الموجي الأعظمي 497 nm عند pH9 و 500 nm عند pH5.

قائمة المراجع:

- [1] Elements of X-Ray Diffraction Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). Elements of X-Ray Diffraction (3rd ed.). Prentice Hall.
- [2] Bragg's Law Bragg, W. L. (1913). The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 17, 43–57
- [3] Smith, B. C. (2011). Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (2nd ed.). CRC Press.
- [4] Stuart, B. (2004). Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. Wiley
- [5] Skoog, D. A., Holler, F. G. & Crouch, S. R. (2014). Principles of Instrumental Analysis (6th ed.). Cengage Learning.
- [6] Harris, D. C. (2015). Quantitative Chemical Analysis (9th ed.). W. H. Freeman.
- [7] Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. (2003). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis (3rd ed.). Springer
- [8] Electron Microscopy and Analysis Goodhew, P. J., Humphreys, J., & Beanland, R. (2001). Electron Microscopy and Analysis (3rd ed.). Taylor & Francis.
- [9] Energy-dispersive X-ray spectroscopy Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science (2nd ed.). Springer.

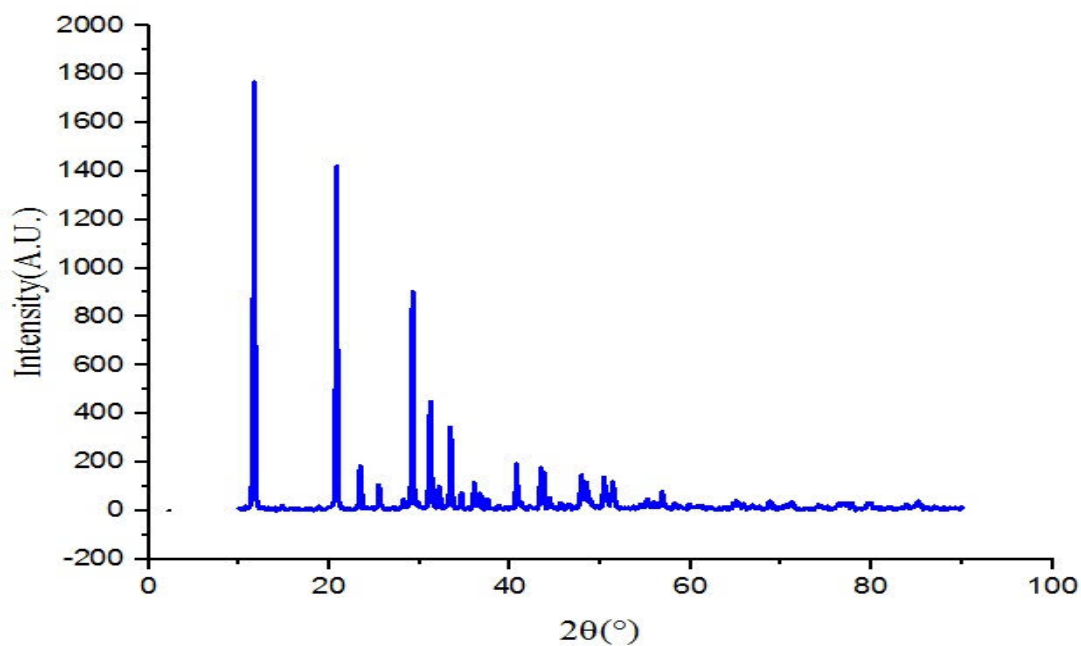
الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

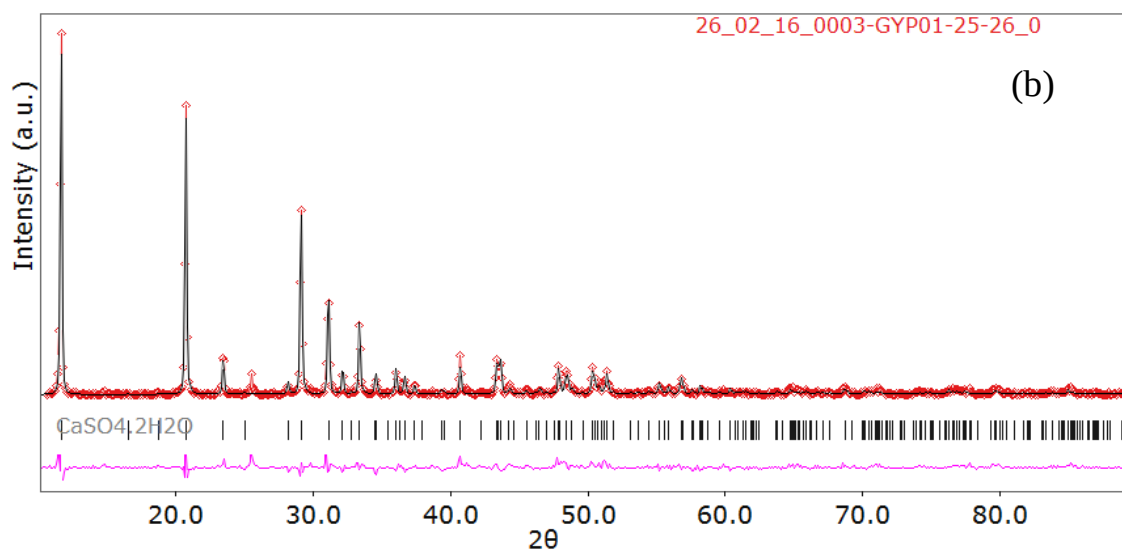
1-IV- توصيف المادة المازة:

1-1-IV- تحليل إنعراج الأشعة السينية XRD:

يبين الشكل (1- IV) نتائج تحسين ريتفالد (Rietveld refinement) لمخطط إنعراج الأشعة السينية (XRD) للعينة المدروسة.



(a) مخطط انعراج الاشعة السينية



(b) تحسين ريتفالد

الشكل (1- IV): تحسين ريتفالد لمخطط انعراج الأشعة السينية (XRD) لعينة الجبس

الجدول (IV-1): جدول يوضح نسب عوامل الثقة وتواجد الأطوار

نسبة تواجد الأطوار %	عوامل الثقة			
(CaSO ₄ ·2H ₂ O)	Rwp(%)	Rp(%)	Rxp(%)	χ^2
100	32.3	21.1	18.1	3.19

حيث تُظهر المقارنة بين النمط التجريبي والنمط المحسوب توافقاً جيداً نسبياً، خاصة عند مواقع القمم الرئيسية وشداتها. ويعكس هذا التوافق قدرة النموذج البلوري المعتمد على تمثيل البنية البلورية للعينة بصورة مقبولة.

تشير نتائج التحليل إلى أن الطور البلوري السائد في العينة هو كبريتات الكالسيوم ثنائية الإماهة (CaSO₄·2H₂O)، المعروفة بالجبس (Gypsum)، دون ظهور قمم إضافية واضحة تعود لأطوار ثانوية أو شوائب بلورية ضمن حدود الكشف الخاصة بتقنية إنعراج الأشعة السينية. ويؤكد ذلك النقاة العالية للعينة والطبيعة البلورية المنتظمة للمركب المدروس.

وتتفق هذه النتائج مع ما توصل إليه Hassan وآخرون [1] عند دراسة امتزاز الصبغة الأنيونية Chlorazol Yellow باستعمال الجبس، حيث أظهر تحليل XRD سيادة طور الجبس ثنائي الإماهة (CaSO₄·2H₂O) و غياب الأطوار الثانوية المهمة. كما أشار الباحثون إلى أن استقرار هذا الطور البلوري يسهم في الحفاظ على الخصائص السطحية المسؤولة عن عملية الامتزاز. كما تتوافق هذه النتائج مع دراسة Alotaibi وآخرون [2] الخاصة بالفوسفوجبس، والتي بينت أن كبريتات الكالسيوم ثنائية الإماهة تمثل الطور البلوري السائد في المادة المازة. ويشير هذا التشابه إلى أن فعالية المواد الجبسية في إزالة الأصباغ ترتبط أساساً بالبنية البلورية المستقرة لكبريتات الكالسيوم المائية.

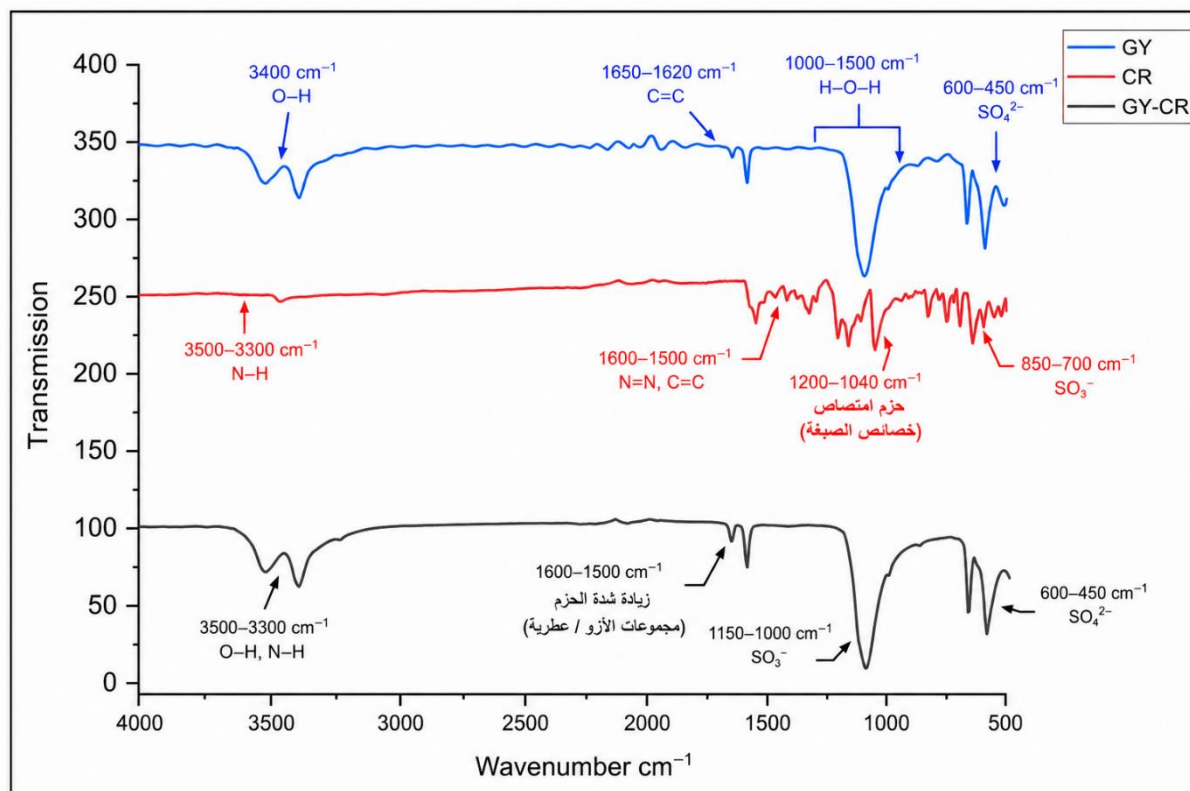
كما تُظهر عملية التحسين أن القمم التجريبية تتطابق بشكل جيد مع القمم المحسوبة من قاعدة البيانات المرجعية الخاصة بالجبس، سواء من حيث مواضع الانعكاسات البلورية أو شداتها النسبية، مما يدل على صحة النموذج البنيوي المستخدم أثناء عملية التكرير البنيوي. وتُعزى القمم الحادة وذات الشدة المرتفعة، خاصة عند الزوايا المنخفضة لـ 2θ، إلى ارتفاع درجة التبلور وانتظام الشبكة البلورية للجبس.

بلغت معاملات الثقة للتحسين قيمة مقبولة نسبياً **الجدول (IV-1)**، حيث سجل عامل المطابقة الوزني R_{wp} حوالي 32.3%، بينما بلغت القيمة المتوقعة R_{exp} حوالي 18.1%، مع قيمة لجودة المطابقة χ^2 تساوي تقريباً 3.19. وتشير هذه النتائج إلى وجود توافق مقبول جداً بين البيانات التجريبية والنموذج المحسوب، رغم وجود بعض الفروقات الطفيفة التي قد تعود إلى تأثيرات تجريبية مثل التوجيه المفضل للحبيبات (Preferred orientation)، أو عدم التجانس الجزئي في حجم البلورات، أو وجود مساهمة طفيفة للخلفية والإشارات العشوائية.

علاوة على ذلك، فإن ثوابت الشبكة البلورية المستخلصة من عملية التحسين تتوافق مع القيم المرجعية القياسية الخاصة ببنية الجبس، مما يعزز موثوقية نتائج التحليل البنيوي ويؤكد الهوية البلورية للعينة. وبصفة عامة، فإن تحليل ريتفالد يوفر وصفًا نوعيًا وكميًا موثوقًا للبنية البلورية للعينة، ويؤكد أن المادة المدروسة تتكون أساسًا من طور الجبس ذي البنية البلورية الجيدة.

IV-1-2- التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء FTIR:

تم استخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) لتحليل التغيرات الطيفية لسطح الجبس قبل الامتزاز وبعد الامتزاز، ومقارنة أطيف الجبس مع أطيف صبغة أحمر كونغو (CR) وذلك لتحديد المجموعات الوظيفية الأساسية وفهم طبيعة التفاعلات الكيميائية والفيزيائية المسؤولة عن آلية الامتزاز.



الشكل (IV-2): طيف الأشعة تحت الحمراء للجبس قبل الإمتزاز (GY)، بعد الإمتزاز (GY-CR) ولصبغة أحمر الكونغو (CR).

عند مقارنة الأطياف الثلاثة يمكن الإستنتاج أن :

طيف الجبس النقي (GY):

أظهر طيف الأشعة تحت الحمراء للجبس النقي (GY) حزمة امتصاص واسعة في المجال (3500-3400 cm⁻¹) والتي تُعزى إلى اهتزازات التمدد لمجموعة (O-H) الهيدروكسيل المرتبطة بماء التبلور الموجود

في البنية البلورية للجبس، كما ظهرت حزمة امتصاص عند حوالي ($1650-1620\text{ cm}^{-1}$) تعود إلى اهتزازات انحناء جزيئات الماء (H-O-H). كذلك لوحظت حزم قوية ضمن المجال ($1000-1500\text{ cm}^{-1}$) مرتبطة باهتزازات التمدد لمجموعة الكبريتات (SO_4)، إضافة إلى قمم في المجال ($600-450\text{ cm}^{-1}$) تعزى إلى اهتزازات الانحناء الخاصة بالكبريتات، وهي حزم مميزة للجبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

طيف صبغة أحمر الكونغو (CR) :

أظهر طيف صبغة أحمر الكونغو (CR) نطاق امتصاص في المجال ($3500-3300\text{ cm}^{-1}$) يعود إلى اهتزازات (N-H) للمجموعة الأمينية. كما ظهرت قمم ضمن المجال

($1600-1500\text{ cm}^{-1}$) مرتبطة باهتزازات رابطة الأزو (N=N) واهتزازات الحلقات العطرية (C=C)، والتي تُعد من الخصائص المميزة للصبغة. كذلك لوحظ وجود حزم امتصاص في المجال ($1200-1040\text{ cm}^{-1}$) تعود إلى اهتزازات مجموعة السلفونات (SO_3^-)، بالإضافة إلى قمم في المجال ($850-700\text{ cm}^{-1}$) مرتبطة باهتزازات الانحناء خارج المستوى للحلقات العطرية.

طيف الجبس بعد الامتزاج (GY-CR) :

بعد عملية الامتزاج، أظهر طيف الجبس المحمل بصبغة أحمر الكونغو (GY-CR) تغيرات واضحة مقارنة بطيف الجبس النقي، حيث لوحظ تغير في عرض وشدة الحزمة الواقعة في المجال ($3500-3300\text{ cm}^{-1}$) نتيجة التداخل بين اهتزازات (O-H) الخاصة بالجبس واهتزازات (N-H) التابعة للصبغة.

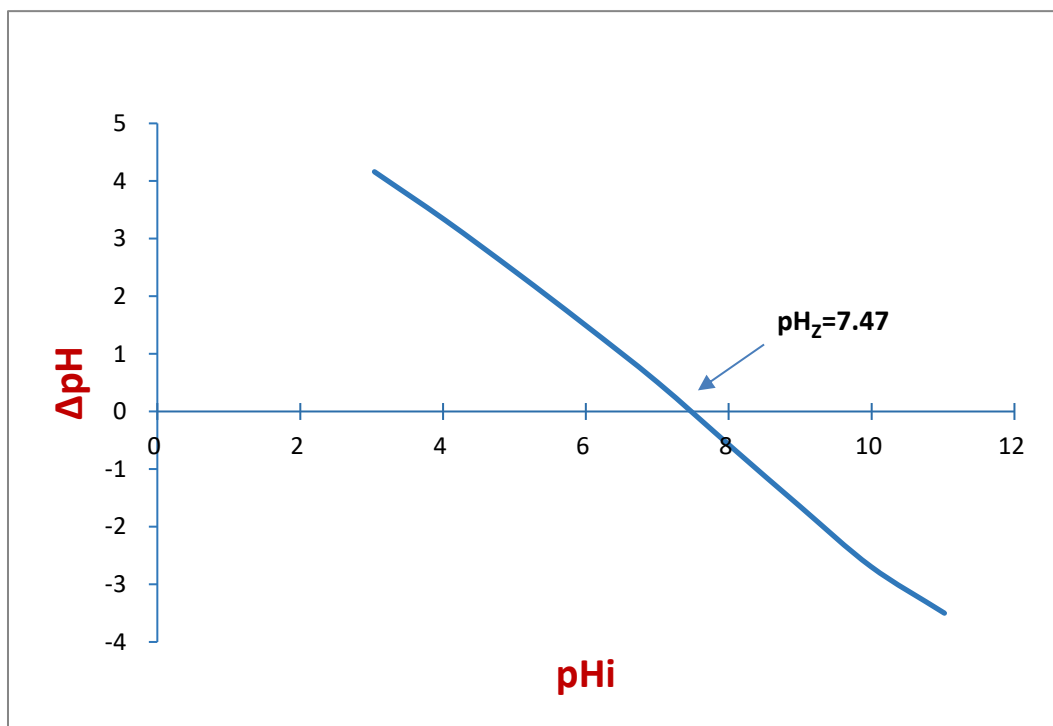
كما سجلت زيادة في شدة الحزم ضمن المجال ($1600-1500\text{ cm}^{-1}$) مما يدل على وجود مجموعات الأزو والحلقات العطرية الخاصة بالصبغة على سطح الجبس. إضافة إلى ذلك، سُجل تغير طفيف في موضع وشدة حزم الكبريتات ضمن المجال

($1150-1000\text{ cm}^{-1}$)، وهو ما قد يشير إلى حدوث تفاعل بين مجموعات السلفونات في الصبغة ومواقع الفعالة على سطح الجبس أثناء عملية الامتزاج.

تتوافق هذه النتائج مع ما ورد في دراسة Hassan وآخرين [1]، حيث لوحظ ظهور تغيرات مماثلة في نطاقات الاهتزاز المرتبطة بالمجموعات الوظيفية للصبغة بعد امتزاجها على سطح الجبس. كما بينت دراسة L.Wang و A. Wang [3] الخاصة بامتزاز صبغة أحمر الكونغو على المونتموريلونيت المعدل، أن التغيرات في أطياف FTIR بعد الامتزاج، ولا سيما المرتبطة بمجموعات السلفونات (SO_3^-) والمجموعات الوظيفية الأخرى للصبغة، تؤكد حدوث تفاعلات سطحية بين الصبغة والمواقع الفعالة للمادة المازة، وليس مجرد تجاذب كهروستاتيكي.

IV-1-3- دراسة شحنة السطح pH_{PZC} :

تم تحديد نقطة الشحنة الصفريّة (pH_{PZC}) لسطح الجبس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) بهدف دراسة الخصائص السطحية للمادة المازة وتحديد طبيعة شحنتها تبعاً لتغير درجة الحموضة وعلاقتها بسلوك الامتزاز. وقد تم تمثيل نتائج الدراسة بيانياً من خلال منحنى ΔpH بدلالة pH_i ، كما هو موضح في الشكل (IV - 3) التالي.



الشكل (IV - 3): منحنى الشحنة الصفريّة للجبس

يبين منحنى تحديد نقطة الشحنة الصفريّة (pH_{PZC}) لسطح الجبس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) أن قيمة نقطة التقاطع بين المنحنى ومحور $\Delta pH = 0$ بلغت حوالي 7.47، وهي تمثل قيمة الرقم الهيدروجيني التي تكون عندها الشحنة الصافية لسطح الجبس مساوية للصفر. عند هذه القيمة يكون عدد الشحنات الموجبة على السطح مساوياً لعدد الشحنات السالبة، مما يؤدي إلى حالة من التعادل الكهربائي لسطح المادة المازة.

وتشير هذه النتيجة إلى أن سطح الجبس يكتسب شحنة موجبة في الأوساط الحمضية ($pH < 7.47$)، نتيجة بروتنة المجموعات السطحية، في حين يصبح السطح مشحوناً بشحنة سالبة في الأوساط القاعدية ($pH > 7.47$) بسبب نزع البروتونات من السطح. وتعد هذه الخاصية ذات أهمية كبيرة في تفسير سلوك امتزاز صبغة أحمر الكونغو، باعتبارها صبغة أنيونية تحمل شحنات سالبة في المحلول.

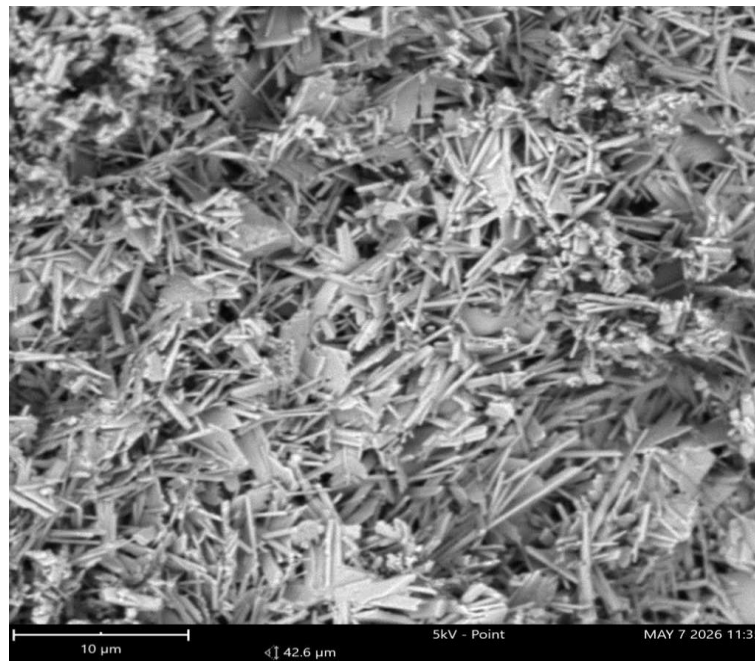
وبناء على ذلك، فإن طبيعة الشحنة السطحية للجبس يمكن أن تؤثر في التفاعلات الكهروستاتيكية بين سطح المادة المازة وجزيئات الصبغة، حيث يُتوقع أن تختلف آلية الإمتزاز وكفاءته باختلاف قيمة الرقم الهيدروجيني للمحلول. وسيتم مناقشة هذا التأثير بصورة أكثر تفصيلاً في الجزء الخاص بدراسة تأثير pH على كفاءة الإمتزاز.

وتدل قيمة pH_{PZC} المحصل عليها على أن الجبس يمتلك خصائص سطحية مناسبة للتفاعل مع الملوثات الأنيونية، كما تعكس الدور المهم لدرجة الحموضة في التحكم في آلية الامتزاز وكفاءة إزالة الصبغة من المحاليل المائية.

تتفق هذه النتيجة مع ما أشار إليه Obunwo وآخرون [4] عند دراسة امتزاز الصبغة Reactive Red 1 على الجبس، حيث تبين أن الوسط الحمضي يوفر ظروفاً أكثر ملاءمة لامتزاز الأصباغ الأنيونية نتيجة زيادة الشحنة الموجبة لسطح الجبس. كما سجل Hassan وآخرون [1] انخفاضاً واضحاً في كفاءة إزالة الصبغات الأنيونية عند الانتقال نحو الأوساط القاعدية بسبب تناقص التجاذب الكهروستاتيكي. وتدعم هذه الدراسات التفسير المقترح في هذا العمل والذي يربط تغير كفاءة الامتزاز بتغير الشحنة السطحية للجبس حول نقطة انعدام الشحنة.

IV-1-4- المجهر الإلكتروني الماسح المقترن بالتحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة (SEM/EDS):

تشير صورة SEM قبل الامتزاز إلى أن سطح الجبس المعاد تدويره يتميز ببنية غير متجانسة نسبياً مع وجود تجمعات بلورية ومسامات سطحية واضحة، وهي خصائص مهمة في مواد الامتزاز لأنها قد توفر مواقع نشطة لتثبيت الجزيئات أو الأيونات الممتزة. كما أن ظهور التشققات والفراغات السطحية يعكس الطبيعة المسامية للمادة، مما قد يساهم في زيادة مساحة التلامس بين السطح والمحلول وتحسين قابلية الامتزاز.

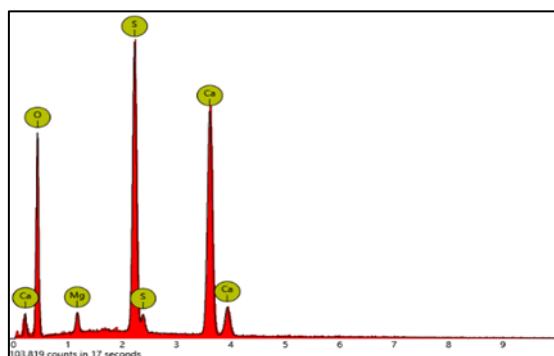


الشكل (IV-4): صورة SEM للجبس قبل الامتزاز عند تكبير 10 μm

كما تكشف صورة SEM الملتقطة الخصائص السطحية التالية:

- بنية خشنة نسبياً .
- تكتلات بلورية غير منتظمة .
- فراغات دقيقة ومسامات مفتوحة .
- توزيع سطحي قد يسهل بانتشار الملوثات نحو المواقع النشطة .

الجدول (IV-2): جدول نتائج EDS



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
O	66.10	46.46		
Ca	17.69	31.14	CaO	44.31
S	14.92	21.02	SO ₃	53.36
Mg	1.29	1.38	MgO	2.32

الشكل (IV-5): منحنى طيف EDS للجبس قبل

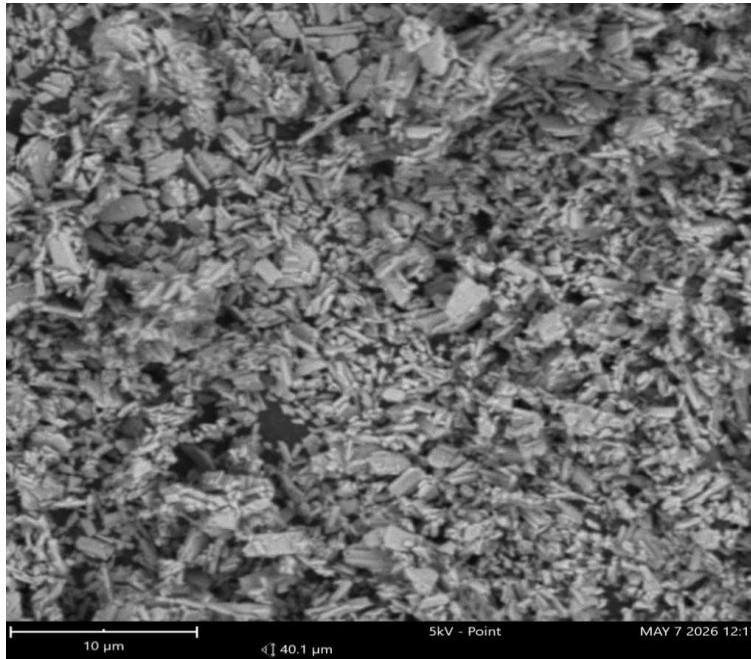
الإمتزاز

أما تحليل EDS قبل الامتزاز فقد أظهر سيادة العناصر المكونة للجبس وهي الأكسجين، الكالسيوم والكبريت، حيث بلغت نسب الوزن:

- O = 46.46%
- Ca = 31.14%
- S = 21.02%
- Mg = 1.38%

وتؤكد هذه النتائج التركيب الكيميائي النموذجي للجبس المعاد تدويره القائم أساسًا على كبريتات الكالسيوم المائية ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). كما أن وجود المغنيسيوم بنسبة ضئيلة قد يعود إلى شوائب معدنية وتتوافق هذه النتائج مع نتائج إنعراج الأشعة السينية (XRD) التي أظهرت أن الجبس يمثل الطور البلوري السائد في العينة.

تكشف صورة SEM بعد الامتزاز عن تغيرات مورفولوجية أكثر وضوحًا، حيث يبدو السطح أكثر تغطية وتماسكًا مع انخفاض ملحوظ في المسامية الظاهرة مقارنة بالعينة قبل الامتزاز، وهو ما يدل على حدوث امتزاز أكثر كفاءة واحتلال عدد أكبر من المواقع النشطة. ويشير هذا السلوك إلى تكوين طبقة ممتزة أكثر استقرارًا وانتظامًا على سطح الجبس، وهو ما يرتبط عادةً بارتفاع كفاءة الإزالة. وقد بينت العديد من الدراسات المتعلقة بآليات الامتزاز أن انخفاض وضوح المسامات السطحية بعد المعالجة يعد مؤشرًا على نجاح تثبيت الجزيئات الممتزة داخل المواقع الفعالة للمادة المازة.



الشكل (IV-6): صورة SEM للجبس بعد الامتزاز عند تكبير 10 μm

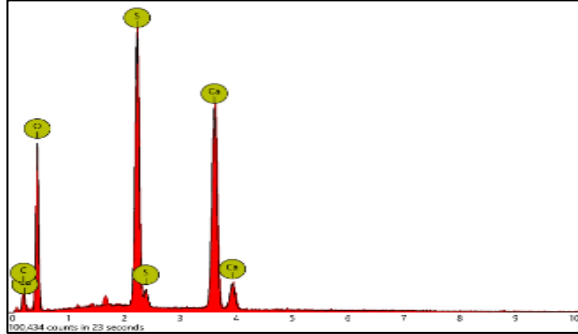
وتظهر صورة SEM بعد الامتزاز المظاهر السطحية التالية:

- اختفاء جزء معتبر من المسامات المفتوحة.

- تراكم كثيف للمواد الممتزة على السطح مقارنة بالعينة قبل الامتزاز.
- زيادة التكتلات السطحية.
- تكوين طبقة تغطية أكثر تجانسًا.

الجدول (3-IV): جدول نتائج EDS

Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
O	54.79	41.66		
Ca	14.96	28.49	CaO	39.93
S	13.21	20.12	SO ₃	50.33
C	17.05	9.73		



الشكل (IV-7): منحنى طيف EDS للجبس

بعد الإمتزاز

وأظهرت نتائج تحليل EDS بعد الامتزاز تغيرا في التركيب العنصري، حيث بلغت النسب:

$$O = 41.66\%$$

$$Ca = 28.49\%$$

$$S = 20.12\%$$

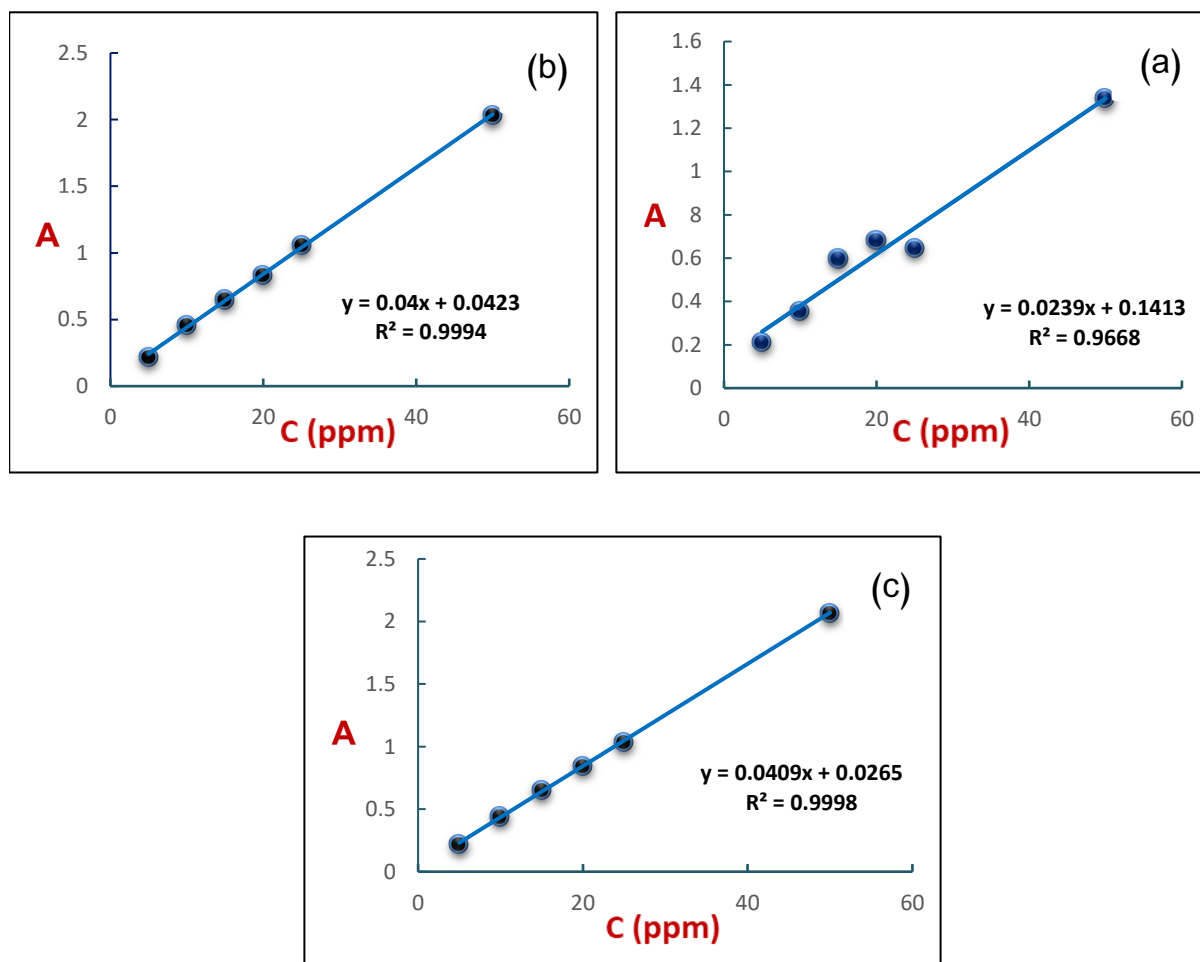
مع ظهور عنصر الكربون بنسبة 9.73% وانخفاض في نسب بعض العناصر الأصلية للمادة. ويعد ظهور الكربون دليلاً مباشراً على تثبيت الجزيئات الممتزة على سطح الجبس، بينما يشير تغير نسب الكالسيوم والكبريت إلى تغطية المواقع السطحية بالمادة الممتزة وحدوث تفاعل بين السطح والجزيئات الممتزة.

تتوافق هذه النتائج مع ما ورد في دراسة Hassan وآخرين [1]، حيث أظهرت صور SEM بعد امتزاز الصبغة تغطية سطح الجبس بطبقة جديدة ناتجة عن تراكم جزيئات الصبغة الممتزة. كما بينت دراسات أخرى خاصة بامتزاز أحمر الكونغو أن ظهور عنصر الكربون أو ازدياد نسبته بعد الامتزاز يعد دليلاً مباشراً على تثبيت الصبغة على سطح المادة المازة. وتشير هذه النتائج مجتمعة إلى نجاح عملية الامتزاز وتؤكد مشاركة السطح الخارجي للجبس في تثبيت جزيئات أحمر الكونغو.

IV-2- دراسة سلوك الامتزاز:

IV-2-1- منحنى المعايرة لصبغة احمر الكونغو:

رُسمت منحنيات المعايرة لصبغة أحمر الكونغو عند قيم مختلفة للرقم الهيدروجيني (pH=5,7,9) وذلك بتمثيل الامتصاصية بدلالة التركيز عند تثبيت قيمة pH في كل مرة واستعمال التراكيز المدروسة (5,10,15,20,25 و 50 ppm) وقد سمح ذلك بالحصول على ثلاث منحنيات معايرة مستقلة ومعادلاتها الخطية الموافقة، والتي استُعملت لاحقاً في تحديد تراكيز المحاليل خلال دراسة الامتزاز.



الشكل (IV-8): المنحنى البياني لقيم الامتصاصية بدلالة التراكيز المختلفة

لصبغة CR

pH=5 (a), pH=7 (b), pH=9 (c)

تُظهر منحنيات المعايرة الخاصة بصبغة أحمر الكونغو عند قيم الرقم الهيدروجيني المختلفة (pH=5,7,9) وجود علاقة خطية واضحة بين الامتصاصية (A) وتركيز الصبغة (C) ضمن المجال

المدرس، حيث تزداد قيم الامتصاصية تدريجياً بارتفاع التركيز، مما يعكس توافق النتائج التجريبية مع قانون بير-لامبرت.

وقد وُصف منحنى المعايرة عند pH=5 بالمعادلة التالية:

$$A = 0.0239C + 0.1413$$

مع معامل ارتباط قدره: $R^2 = 0.9668$

بينما أعطى المنحنى عند pH=7 المعادلة :

$$A = 0.04C + 0.0423$$

وبلغ معامل الارتباط $R^2 = 0.9994$.

أما عند pH=9، فقد تم الحصول على أفضل توافق خطي، وفق المعادلة:

$$A = 0.0409C + 0.0265$$

ومعامل ارتباط يساوي: $R^2 = 0.9998$

وتدل القيم المرتفعة لمعاملات الارتباط جودة الملاءمة الخطية ودقة القياسات الطيفية المنجزة، مما يدل على موثوقية منحنيات المعايرة المعتمدة وإمكانية توظيفها بثقة في تحديد تراكيز صبغة أحمر الكونغو خلال مختلف مراحل دراسة الامتزاز.

IV-2-2- دراسة تأثير زمن التلامس:

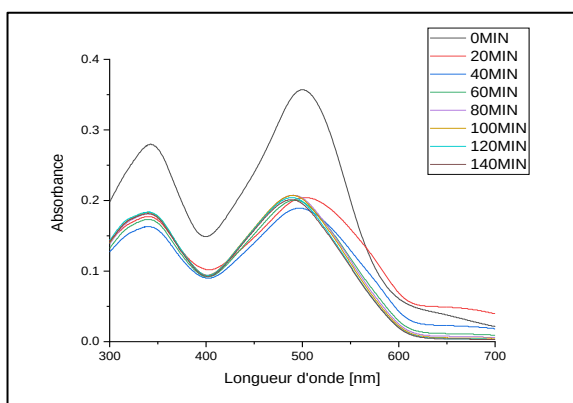
IV-2-2-1- تطور الامتصاصية بدلالة الزمن:

تتناول هذه الدراسة تحليل سلوك امتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره، من خلال تقييم تأثير بعض العوامل التشغيلية المتمثلة في التركيز الابتدائي للمحلول C وزمن التماس t، مع تثبيت درجة الحرارة T، ودراسة تأثير الرقم الهيدروجيني عند القيم 5, 7, 9. وقد تم الاعتماد على منحنيات الامتزاز لتفسير تطور عملية الامتزاز وتحديد كفاءة إزالة الصبغة تحت مختلف الشروط التجريبية.

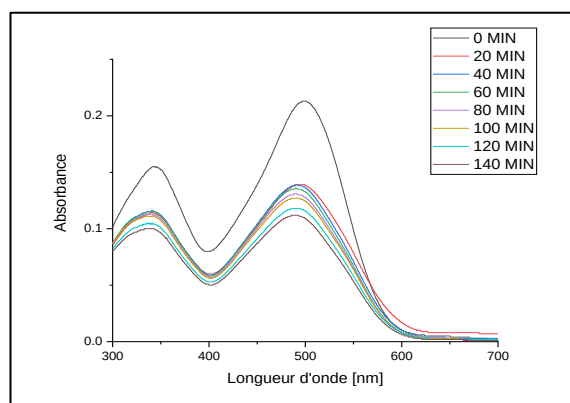
أُجريت قياسات الامتصاصية باستخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV-Vis) لصبغة أحمر الكونغو عند تراكيز مختلفة، باستعمال مطياف UV-Vis ضمن المجال الطيفي [200-800 nm] تهدف هذه الدراسة إلى تتبع حركية امتزاز الصبغة على سطح الجبس خلال أزمنة تماس مختلفة

(20,40,60,80,100,120,140 min)، وذلك من خلال تسجيل قيم الامتصاصية عند الطول الموجي الموافق لأقصى قمة امتصاص مميزة لصبغة أحمر الكونغو.

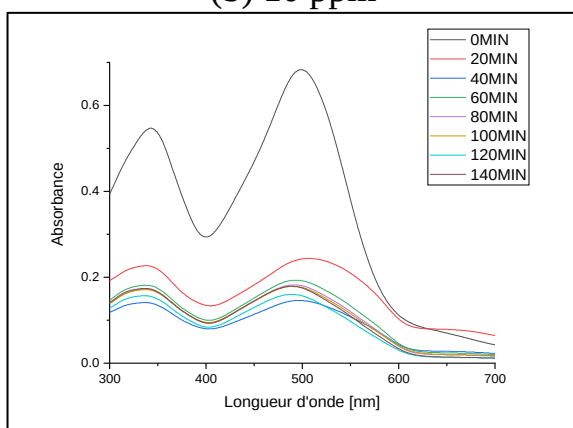
أظهرت المنحنيات المتحصل عليها (الشكال 1-3) انخفاضاً تدريجياً في قيم الامتصاصية مع زيادة زمن التلامس عند مختلف قيم الرقم الهيدروجيني المدروسة مما يدل على تناقص الصبغة في المحلول مع مرور الزمن. وقد أتاح ذلك تقييم كفاءة الامتزاز (DR%)



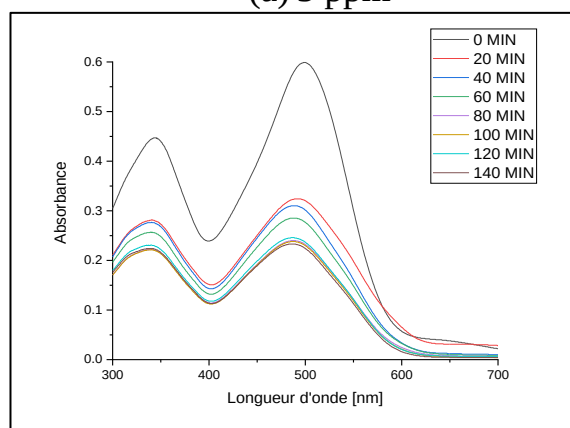
(b) 10 ppm



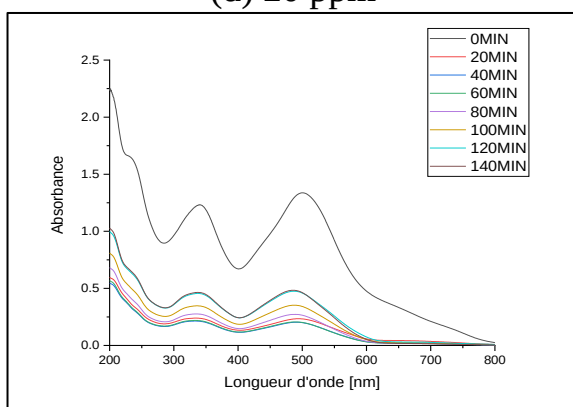
(a) 5 ppm



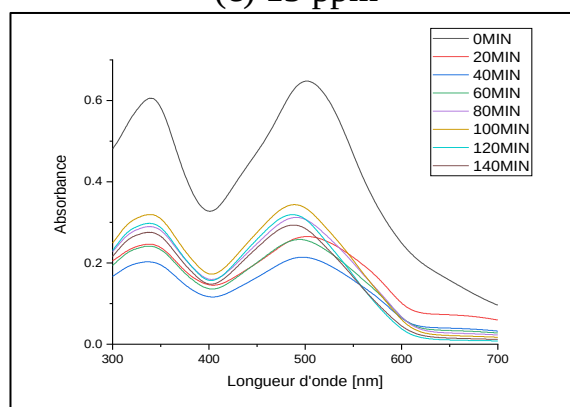
(d) 20 ppm



(c) 15 ppm



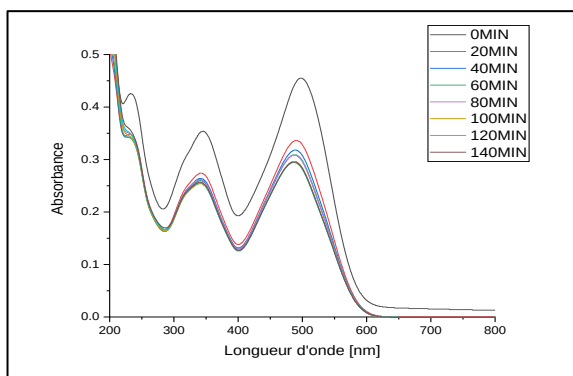
(f) 50 ppm



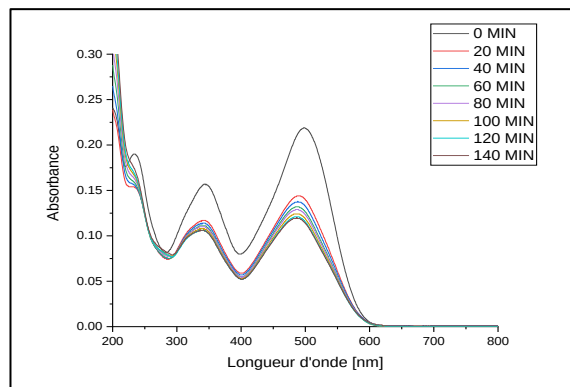
(e) 25 ppm

الشكل (IV-9): منحنى طيف الامتصاص لصبغة CR ذات التراكيز عند pH= 5

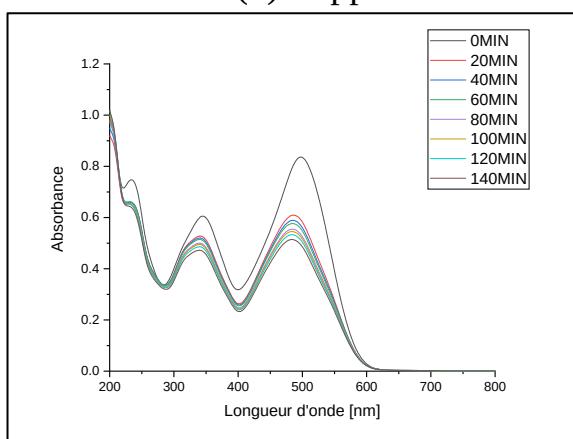
(a) 5 ppm, (b) 10 ppm, (c) 15 ppm, (d) 20 ppm, (e) 25 ppm, (f) 50 ppm



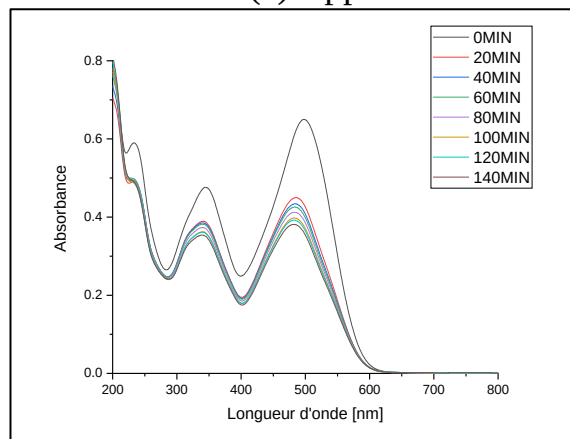
(b) 10 ppm



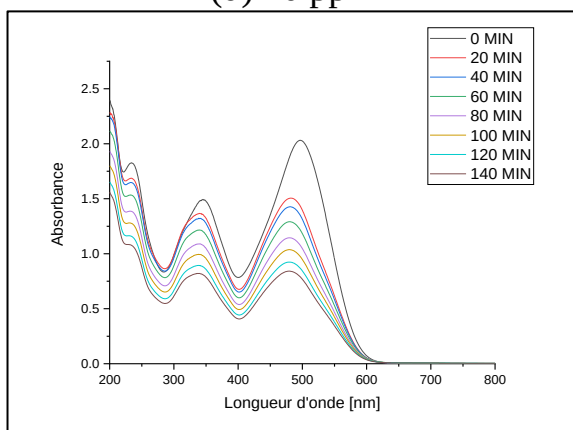
(a) 5 ppm



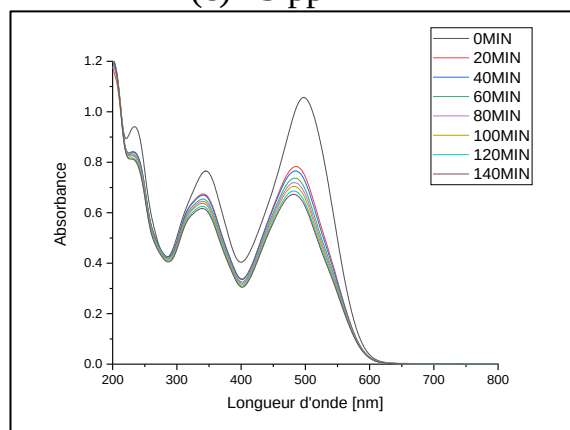
(d) 20 ppm



(c) 15 ppm



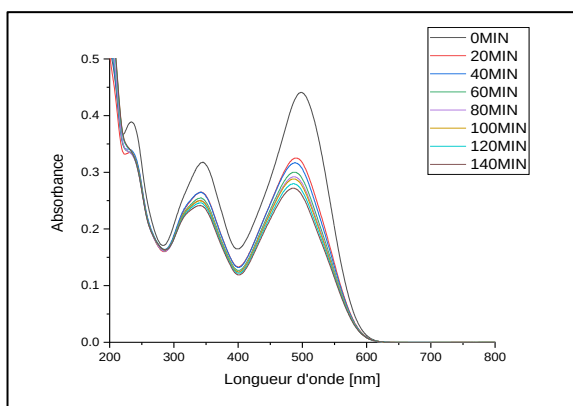
(f) 50 ppm



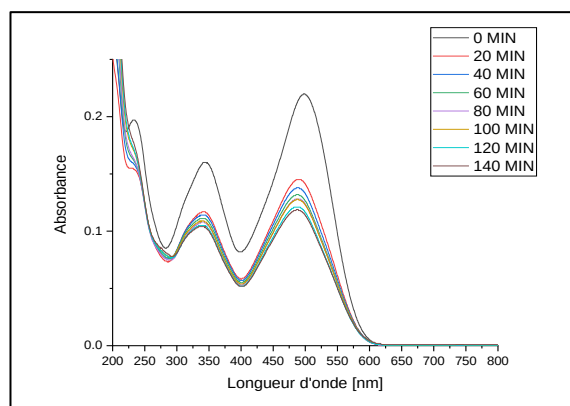
(e) 25 ppm

الشكل (IV-10): منحني طيف الامتصاص لصبغة CR ذات التراكيز عند pH=7

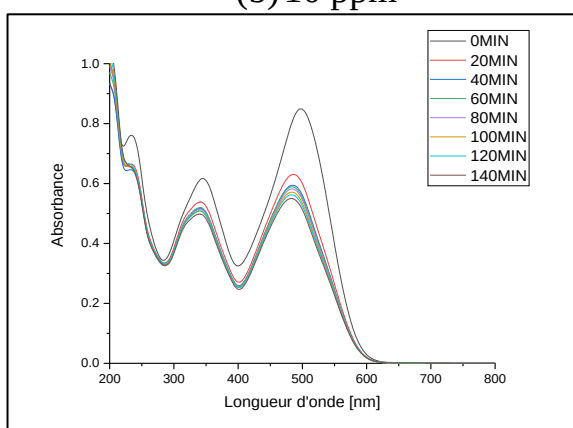
(a) 5 ppm, (b) 10 ppm, (c) 15 ppm, (d) 20 ppm, (e) 25 ppm, (f) 50 ppm



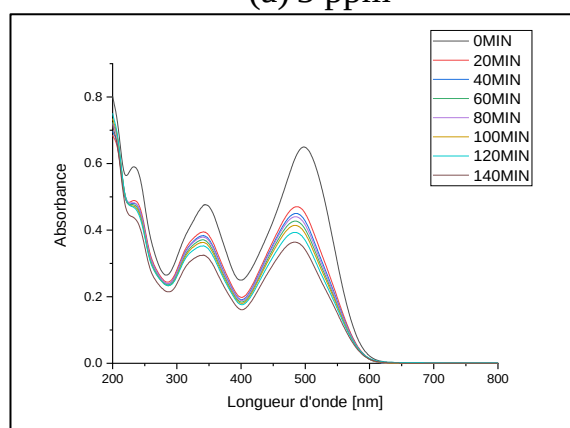
(b) 10 ppm



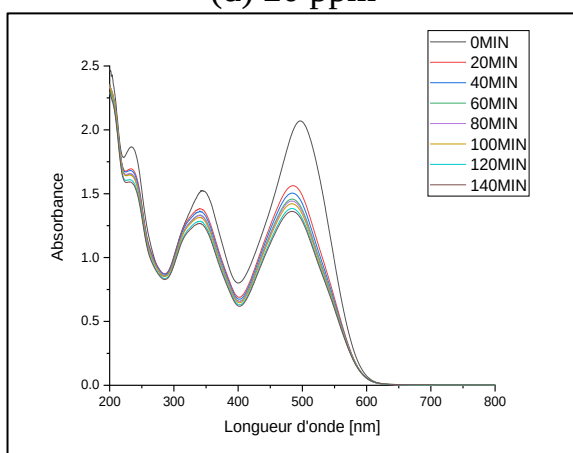
(a) 5 ppm



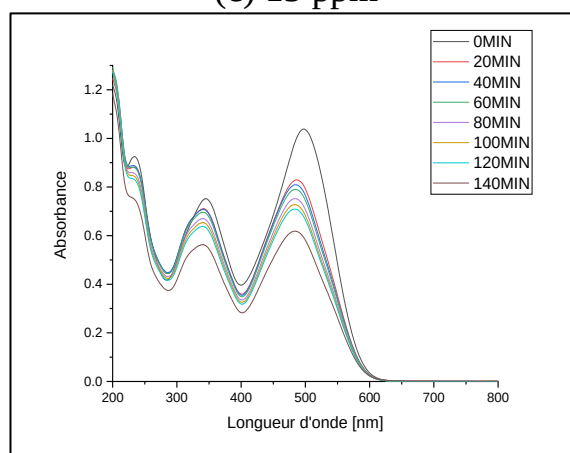
(d) 20 ppm



(c) 15 ppm



(f) 50 ppm



(e) 25 ppm

الشكل (IV-11): منحني طيف الامتصاص لصبغة CR ذات التراكيز عند pH=9

(a) 5 ppm, (b) 10 ppm, (c) 15 ppm, (d) 20 ppm, (e) 25 ppm, (f) 50 ppm

IV-2-2-1- تأثير زمن التلامس على كفاءة الامتزاز:

أظهرت نتائج دراسة امتزاز صبغة Congo Red على سطح الجبس المعاد تدويره أن زيادة زمن التلامس تؤدي إلى تحسن ملحوظ في كفاءة الامتزاز عند مختلف قيم الرقم الهيدروجيني المدروسة pH=5,7,9. حيث سُجل انخفاض تدريجي في قيم الامتصاصية مع مرور الزمن إلى غاية 140 دقيقة،

مما يعكس تناقص تركيز الصبغة في المحلول نتيجة انتقال جزيئاتها نحو المواقع الفعالة المتاحة على سطح المادة المازة و امتزاجها تدريجيا .

ويُفسّر هذا السلوك بتوفر عدد كبير من المواقع النشطة في المراحل الأولى من التفاعل، مما يسمح بامتزاز سريع لجزيئات الصبغة، ثم تتباطأ العملية تدريجيًا مع مرور الزمن نتيجة تناقص المواقع المتاحة واقترب النظام من حالة التوازن الامتزازي.

كما تشير النتائج إلى أن الجبس المعاد تدويره يمتلك قدرة جيدة على إزالة الصبغة من الوسط المائي، وهو ما يتجلى في الارتفاع التدريجي لكفاءة الامتزاز مع زيادة زمن التلامس، إلى أن تستقر القيم نسبيًا عند الأزمنة المتقدمة.

IV-2-3- تأثير التركيز الابتدائي على كفاءة الامتزاز:

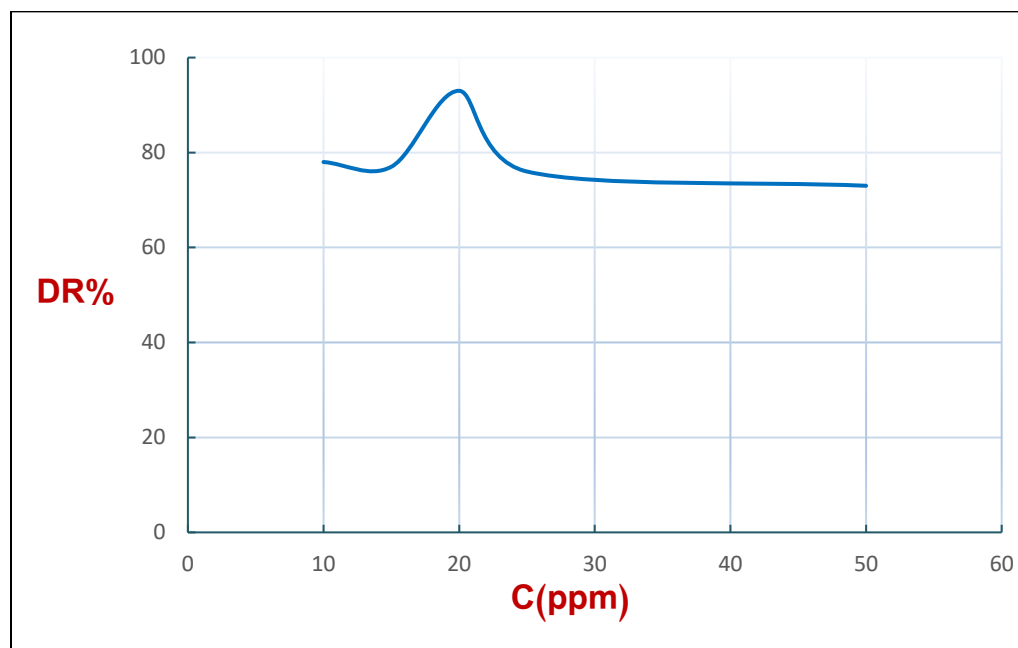
أبرزت النتائج التجريبية أن تغير التركيز الابتدائي لصبغة أحمر الكونغو يؤثر بصورة ملحوظة على كفاءة الامتزاز باستعمال الجبس المعاد تدويره كمادة مازة، حيث انعكس هذا التأثير من خلال اختلاف قيم الكفاءة المسجلة عند مختلف التراكيز المدروسة. كما بينت الأشكال (IV-12)، (IV-13)، و (IV-14) وجود تباين في سلوك الامتزاز تبعًا لكل قيمة من قيم الرقم الهيدروجيني المدروسة (pH=5,7,9)، مما يدل على أن تغير الوسط الحمضي أو القاعدي يلعب دورًا مهمًا في تحديد مردود إزالة الصبغة وتفاعلها مع المواقع الفعالة على سطح المادة المازة.

وقد تمت دراسة تأثير التركيز الابتدائي لصبغة أحمر الكونغو على كفاءة الامتزاز عند ثلاث قيم مختلفة للأس الهيدروجيني pH = 5,7,9 مع تثبيت باقي الشروط التجريبية، ثم تم تمثيل تغير كفاءة الامتزاز بدلالة التركيز الابتدائي للمحلول من أجل تقييم أداء الجبس المعاد تدويره تحت مختلف الظروف المدروسة.

IV-2-3-1- تأثير التركيز الابتدائي عند pH=5 :

الجدول (IV-4): كفاءة الامتزاز لصبغة (CR) عند تراكيز مختلفة pH=5

كفاءة الامتزاز (DR %)	التركيز عند التوازن Ce(mg/L)	التركيز الابتدائي Co(mg/L)
78%	2.1631	10
77%	3.4602	15
93%	1.4100	20
76%	6.0125	25
73%	13.4602	50



الشكل (IV-12): تأثير التركيز الابتدائي للصبغة (CR) على كفاءة الامتزاز على الجبس عند pH=5

أظهرت النتائج عند pH = 5 أن كفاءة امتزاز صبغة أحمر الكونغو كانت مرتفعة نسبياً عند مختلف التراكيز المدروسة، حيث تراوحت نسب الإزالة بين 73% و 93%، مع تسجيل أعلى كفاءة امتزاز عند تركيز 20 ppm. ويعكس هذا السلوك فعالية سطح الجبس في الوسط الحمضي نتيجة توفر عدد مناسب من المواقع النشطة القادرة على تثبيت جزيئات الصبغة خلال عملية الامتزاز.

كما تُظهر النتائج أن كفاءة الإزالة بقيت مرتفعة عند التراكيز المنخفضة والمتوسطة، وهو ما يدل على أن عدد جزيئات الصبغة كان أقل من أو قريباً من عدد المواقع الفعالة المتوفرة على سطح الجبس، مما سمح بحدوث امتزاز فعال. وعند زيادة التركيز الابتدائي للمحلول، لوحظ انخفاض نسبي في كفاءة الامتزاز، ويُعزى ذلك إلى تشبع المواقع النشطة تدريجياً بجزيئات الصبغة، وبالتالي تراجع قدرة السطح على تثبيت المزيد من الجزيئات.

ومن جهة أخرى، سُجل تذبذب نسبي في قيم كفاءة الامتزاز عند بعض التراكيز المدروسة، ويمكن تفسير هذا السلوك باختلاف طبيعة التفاعل بين جزيئات صبغة أحمر الكونغو والمواقع النشطة على سطح الجبس مع تغير التركيز الابتدائي للمحلول. كما أن ازدياد عدد الجزيئات المتنافسة داخل المحلول عند بعض التراكيز قد يؤثر على توازن عملية الامتزاز، وهو ما ينعكس في شكل تغيرات طفيفة وغير منتظمة في قيم كفاءة الإزالة.

ويرتبط الارتفاع الملحوظ في كفاءة الإزالة في هذا الوسط بقيمة نقطة انعدام الشحنة السطحية للجبس ($pH_{pzc}=7.47$)، حيث إن قيمة $pH = 5$ أقل من قيمة pH_{pzc} ، مما يجعل سطح الجبس مشحوناً إيجابياً نسبياً. وبما أن صبغة أحمر الكونغو تُعد صبغة أنيونية سالبة الشحنة، فإن ذلك يُعزز التجاذب الكهروستاتيكي بين السطح وجزيئات الصبغة، وبالتالي يساهم في رفع فعالية الامتزاز.

وتتفق هذه النتائج بشكل عام مع ما توصلت إليه دراسة Hassan وآخرين [1] حول إزالة الأصبغة الأنيونية باستخدام الجبس، حيث أظهرت الدراسة أن كفاءة إزالة صبغة أصفر الكلورازول بلغت 99.4% عند تركيز 30 ppm، قبل أن تنخفض تدريجياً عند التراكيز المرتفعة. وقد أرجع الباحثون ذلك إلى توفر مساحة سطحية فعالة ساعدت على تعزيز عملية الامتزاز.

ورغم أن نسب الإزالة المحققة في الدراسة الحالية كانت أقل نسبياً من تلك المسجلة في الدراسة المرجعية، إلا أن ذلك قد يعود إلى عدة عوامل مرتبطة بطبيعة المادة الممتزة والظروف التجريبية المستخدمة. فقد استُخدم في المرجع مسحوق جبس ناعم يتميز بمساحة سطحية نوعية أكبر، مما يوفر عدداً أكبر من المواقع النشطة المتاحة لعملية الامتزاز، بينما استُخدم في هذه الدراسة جبس معاد تدويره على شكل قطع منتظمة نسبياً، وهو ما قد يحد من المساحة السطحية المعرضة للتفاعل مقارنة بالمسحوق الناعم.

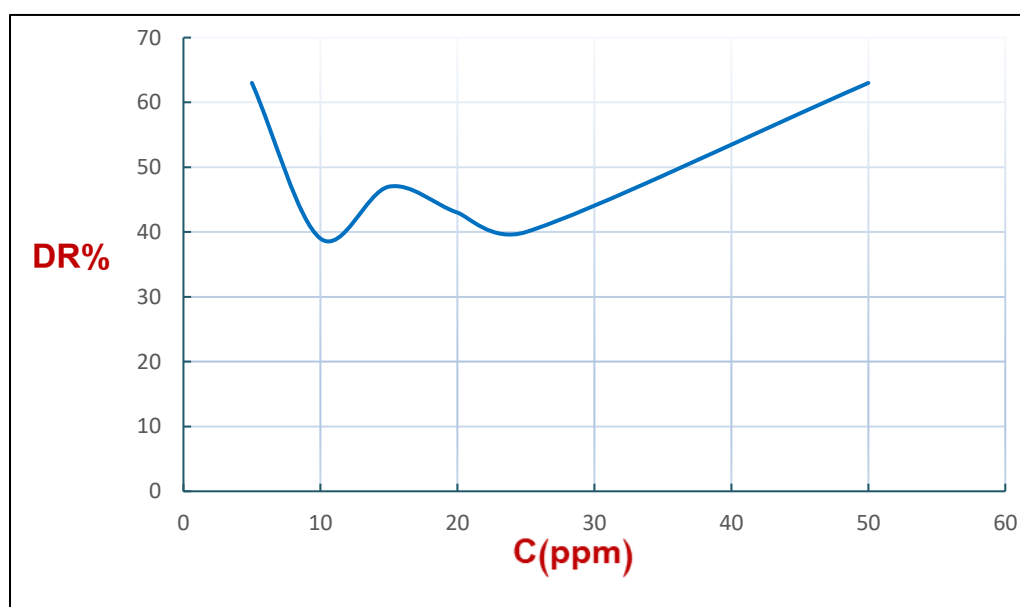
إضافة إلى ذلك، يمكن أن يكون للاختلاف في الخصائص الفيزيائية والكيميائية للأصبغة، مثل الحجم الجزيئي والبنية الفراغية وطبيعة المجموعات الوظيفية، دور مهم في تحديد آلية الامتزاز وسلوك التفاعل مع سطح الجبس. كما أن اختلاف الشروط التجريبية بين الدراستين قد يساهم بدوره في تفسير التفاوت المسجل في قيم كفاءة الإزالة.

وتبقى هذه التفسيرات فرضيات علمية محتملة تحتاج إلى دراسات أكثر تفصيلاً للتحقق من مدى تأثير كل عامل.

IV-2-3-2- تأثير التركيز الابتدائي عند pH=7 :

الجدول (IV-5): كفاءة الامتزاز لصبغة (CR) عند تراكيز مختلفة pH=7

كفاءة الامتزاز (DR%)	التركيز عند التوازن Ce(mg/L)	التركيز الابتدائي Co(mg/L)
63%	1.8425	5
39%	6.1425	10
47%	8.0175	15
43%	11.3175	20
40%	14.8925	25
62%	18.6425	50



الشكل (IV-13): تأثير التركيز الابتدائي للصبغة (CR) على كفاءة الامتزاز على الجبس عند pH=7

أظهرت النتائج عند $pH = 7$ انخفاضًا نسبيًا في كفاءة امتزاز صبغة أحمر الكونغو مقارنة بالوسط الحمضي، حيث تراوحت نسب الإزالة بين 39% و 63%. ويمكن تفسير هذا السلوك بالاعتماد على قيمة نقطة انعدام الشحنة السطحية للجبس ($pH_{pzc}=7.47$)، إذ إن قيمة $pH = 7$ تقع بالقرب من هذه النقطة، مما يجعل سطح الجبس شبه متعادل كهربائيًا، وبالتالي تتخفض كثافة الشحنات الموجبة المسؤولة عن جذب جزيئات الصبغة الأنيونية.

ونتيجة لذلك، تضعف قوى التجاذب الكهروستاتيكي بين سطح الجبس وجزيئات أحمر الكونغو مقارنة بما هو عليه في الوسط الحمضي، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض فعالية الامتزاز. ومع ذلك، فإن الكفاءة لم تتخفض بصورة حادة، ويرجع ذلك إلى أن سطح الجبس لم يتحول بعد إلى سطح سالب الشحنة بشكل كامل، مما يسمح باستمرار امتزاز جزء من الصبغة على السطح.

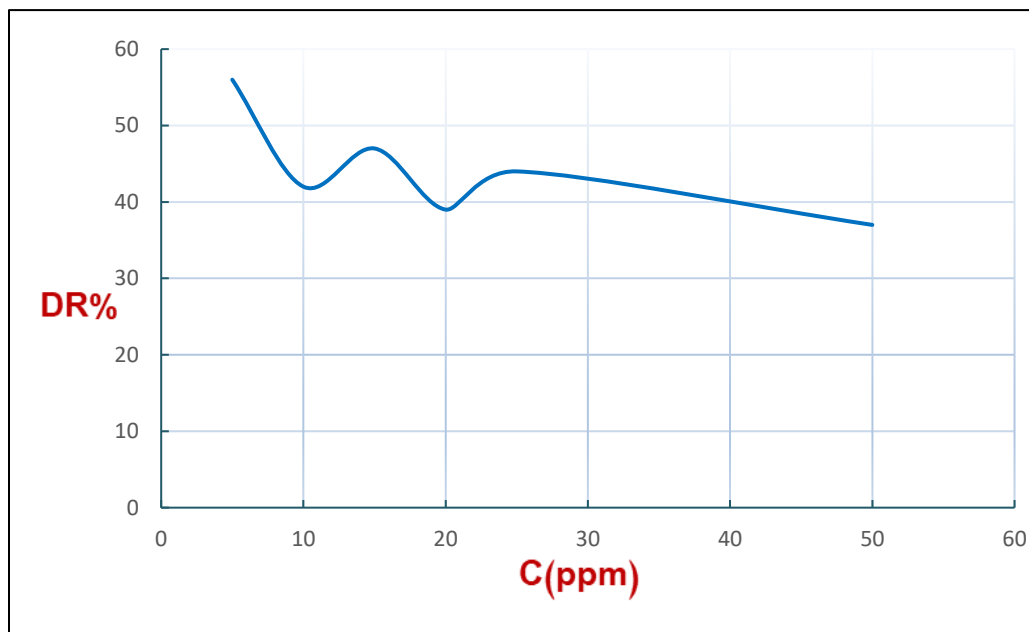
كما لوحظ وجود تغيرات غير منتظمة نسبيًا في قيم كفاءة الإمتزاز عند بعض التراكيز المدروسة. ويمكن أن يُعزى ذلك إلى التأثير المتداخل لعدة عوامل مرتبطة بعملية الإمتزاز، مثل انتقال جزيئات الصبغة داخل المحلول، وتوزعها على سطح المادة المازة، إضافة إلى التغيرات الطفيفة المرتبطة بعمليات القياس والتحليل. ومع ذلك، تبقى كفاءة الإمتزاز عند $pH = 7$ أقل عمومًا من تلك المسجلة عند $pH = 5$ ، مما يؤكد الدور المهم للشحنة السطحية في التحكم في مردود إزالة الصبغة.

ويتوافق هذا السلوك مع ما أشارت إليه دراسة Hassan وآخرين [1]، حيث أوضح الباحثون أن امتزاز الأصبغة الأنيونية باستعمال الجبس يتأثر بصورة مباشرة بطبيعة الشحنة السطحية للمادة الممتزة والوسط الكيميائي للمحلول، إذ تؤدي التغيرات في الرقم الهيدروجيني إلى تعديل قوى التجاذب الكهروستاتيكي بين سطح الجبس وجزيئات الصبغة، وهو ما ينعكس بصورة واضحة على كفاءة الإزالة.

IV-3-3-2- تأثير التركيز الابتدائي عند pH=9 :

الجدول (IV-6): كفاءة الامتزاز لصبغة (CR) عند تراكيز مختلفة pH=9

التركيز الابتدائي C_0 (mg/L)	التركيز عند التوازن C_e (mg/L)	كفاءة الامتزاز (DR%)
5	2.1882	56%
10	5.8068	42%
15	7.8850	47%
20	12.1882	39%
25	13.8753	44%
50	31.3814	37%



الشكل (IV-14): تأثير التركيز الابتدائي للصبغة (CR) على كفاءة الامتزاز على الجبس عند pH=9

بينت النتائج عند $pH = 9$ أن كفاءة امتزاز صبغة أحمر الكونغو كانت الأضعف مقارنة بالأوساط المدروسة، حيث تراوحت نسب الإزالة بين 37% و 56%. ويُعزى هذا الانخفاض بوضوح إلى تجاوز قيمة الرقم الهيدروجيني لنقطة انعدام الشحنة السطحية للجبس ($pH_{PZC} = 7.47$)، مما يؤدي إلى تحول سطح

الجبس إلى سطح سالب الشحنة، وبالتالي تراجع ملحوظ في كثافة المواقع ذات الطابع الموجب القادرة على جذب جزيئات الصبغة الأنيونية.

وبما أن صبغة أحمر الكونغو صبغة أنيونية تحمل شحنة سالبة، فإن هذا التحول في شحنة السطح يحدث تناقضاً كهروستاتيكيًا مباشرًا بين الجبس وجزيئات الصبغة، الأمر الذي يحد من قدرة الجزيئات على الاقتراب من السطح والاستقرار على المواقع النشطة، مما ينعكس سلبيًا على فعالية الامتزاز. ومع ذلك، فإن الانخفاض في الكفاءة لم يكن حادًا بشكل كامل، وهو ما يشير إلى استمرار مساهمة بعض التفاعلات غير الكهروستاتيكية مثل قوى التشنت أو التأثيرات السطحية الضعيفة في عملية الارتباط، رغم محدوديتها في هذا الوسط القاعدي.

كما تُظهر النتائج أن كفاءة الإزالة تميل عموماً إلى الانخفاض مع زيادة التركيز الابتدائي، خاصة عند الانتقال إلى التركيز الأعلى 50 ppm، حيث تصبح كمية جزيئات الصبغة في المحلول أكبر مقارنة بعدد مواقع الإمتزاز المتاحة على سطح الجبس. ومع ذلك، يظهر بعض التذبذب النسبي عند بعض التراكيز، وهو ما يمكن أن يُعزى إلى التأثير المتداخل لعوامل الإمتزاز و القياس، مثل توزع الجزيئات على السطح وانتقالها في المحلول، إضافة إلى التغيرات التجريبية الطفيفة المرتبطة بالتحضير والقياس.

وتتوافق هذه النتائج مع ما أشار إليه Hassan وآخرون [1] بشأن امتزاز الأصبغة الأنيونية على الجبس، حيث أكدوا أن فعالية الامتزاز تعتمد بصورة أساسية على حالة الشحنة السطحية للمادة الممتزة وعلاقتها بالوسط الكيميائي للمحلول، وأن الانتقال نحو الأوساط القاعدية يؤدي إلى إضعاف قوى التجاذب الكهروستاتيكي وبالتالي انخفاض كفاءة الإزالة بشكل ملحوظ.

لوحظ في العديد من الدراسات أن زيادة التركيز الابتدائي تؤدي غالباً إلى انخفاض نسبة الإزالة بسبب محدودية عدد المواقع النشطة المتاحة مقارنة بعدد جزيئات الصبغة الموجودة في المحلول. وقد أشار Mittal و آخرون [5] إلى أن هذا السلوك يعد من الخصائص الشائعة لأنظمة امتزاز أحمر الكونغو، حيث تزداد المنافسة على المواقع الفعالة مع ارتفاع تركيز الصبغة.

IV-2-3-4- مقارنة تأثير الرقم الهيدروجيني على كفاءة الامتزاز:

من خلال مقارنة نتائج الإمتزاز عند قيم الرقم الهيدروجيني المختلفة (5, 7, 9 pH)، يتضح أن الرقم الهيدروجيني يعد من أهم العوامل المؤثرة في كفاءة إزالة صبغة أحمر الكونغو باستعمال الجبس المعاد تدويره. فقد سُجلت أعلى قيم لكفاءة الإزالة في الوسط الحمضي عند 5 pH، في حين انخفضت الكفاءة عند 7 pH و 9 pH.

و يمكن تفسير هذا السلوك بالاعتماد على قيمة نقطة انعدام الشحنة السطحية للجبس

($pH_{PZC} = 7.47$) . فعند $pH = 5$ تكون قيمة الرقم الهيدروجيني أقل من pH_{PZC} ، مما يجعل سطح الجبس مشحونا بشحنة موجبة نسبيا. وبما أن صبغة أحمر الكونغو صبغة أنيونية سالبة الشحنة، فإن ذلك يعزز قوى التجاذب الكهروستاتيكي بين السطح وجزيئات الصبغة، وبالتالي ترتفع كفاءة الإمتزاز. أما عند $pH = 7$ فإن الوسط يكون قريبا من نقطة انعدام الشحنة السطحية، مما يؤدي إلى انخفاض كثافة الشحنات الموجبة على سطح الجبس وتراجع قوى التجاذب الكهروستاتيكي مقارنة بالوسط الحمضي، وهو ما ينعكس في صورة انخفاض في كفاءة الإزالة.

وفي الوسط القاعدي عند $pH = 9$ تصبح قيمة الرقم الهيدروجيني أكبر من pH_{PZC} ، فيكتسب سطح الجبس شحنة سالبة نسبيا. ونظرا لأن صبغة أحمر الكونغو تحمل شحنات سالبة أيضا، فإن ذلك يؤدي إلى ضعف التجاذب الكهروستاتيكي بين السطح والصبغة، مما يساهم في انخفاض كفاءة الإمتزاز مقارنة بالوسط الحمضي.

وتؤكد هذه النتائج أن الرقم الهيدروجيني يلعب دورا أساسيا في التحكم في سلوك إمتزاز صبغة أحمر الكونغو على الجبس، وأن أفضل أداء للجبس المعاد تدويره كمادة مازة قد تحقق في الوسط الحمضي عند $pH=5$.

IV-3- دراسة إيزوتارم الامتزاز:

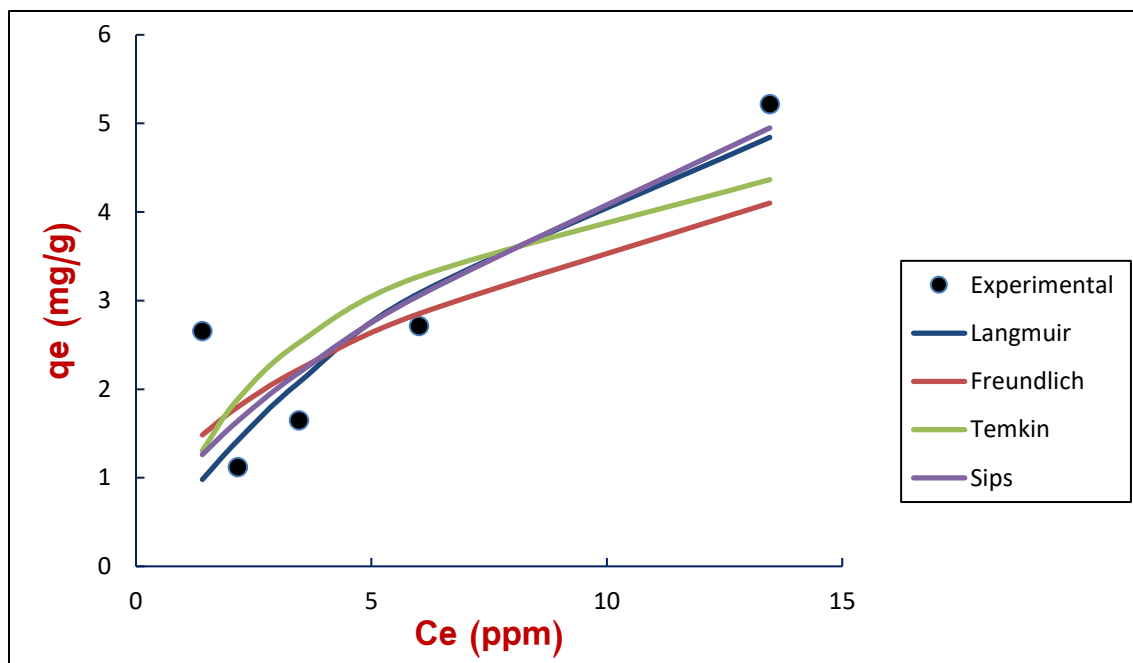
تُعد نماذج إيزوتارم الامتزاز من أهم الأدوات المستعملة في تفسير آلية الامتزاز وفهم طبيعة التفاعل الحاصل بين المادة الممتزة ووسط المادة المازة عند حالة التوازن، إذ تسمح هذه النماذج بدراسة العلاقة بين تركيز المادة الممتزة المتبقية في المحلول عند التوازن (C_e) وكمية المادة الممتزة على سطح الماز (q_e). كما تُساهم في تحديد طبيعة سطح المادة المازة وما إذا كان الامتزاز يتم على سطح متجانس أو غير متجانس، إضافة إلى إمكانية تحديد ما إذا كان الامتزاز يتم على شكل طبقة أحادية أو متعددة الطبقات.

وفي هذه الدراسة، تم تطبيق أربعة نماذج لإيزوتارم الامتزاز، وهي نموذج لانجمير (Langmuir)، ونموذج فروندليش (Freundlich)، ونموذج سيبس (Sips)، ونموذج تمكين (Temkin)، وذلك بهدف تحديد النموذج الأكثر توافقاً مع السلوك التجريبي لامتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عند مختلف قيم الرقم الهيدروجيني ($pH=5,7,9$).

ويُساعد اختيار النموذج الأنسب في الكشف عن طبيعة التفاعل السطحي الحاصل بين جزيئات الصبغة والمواقع النشطة المتوفرة على سطح الجبس، إضافة إلى تفسير تأثير الوسط الحمضي أو المتعادل أو القاعدي على كفاءة الامتزاز وآلية حدوثه.

IV-3-1- دراسة إيزوتارم الامتزاز عند pH=5 :

يبين الشكل (IV-15) منحنيات نماذج إيزوتارم الامتزاز المختلفة الخاصة بامتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عند الوسط الحمضي (pH=5).



الشكل (IV-15): نماذج الايزوتارم المدروسة عند pH=5

أما قيم الثوابت ومعاملات الارتباط الخاصة بكل نموذج فتم توضيحها في الجدول التالي :

الجدول (IV-7): ثوابت نماذج إيزوتارم الامتزاز لصبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عند pH=5

النموذج	R ²	الثوابت	القيمة
Sips	0.7292	q _s	100.000
		K _s	0.0006
		β	0.6228
Langmuir	0.6624	q _{max}	8.9865
		K _L	0.0868
Freundlich	0.6546	K _f	1.2706
		n	2.2186
Temkin	0.5761	B	1.3559
		A _T	1.8590

أظهرت نتائج الملائمة أن نموذج سيبس (Sips) حقق أفضل توافق نسبي مع النتائج التجريبية، حيث سجل أعلى قيمة لمعامل الارتباط ($R^2 = 0.7292$) مقارنة بباقي النماذج المدروسة. ويشير ذلك إلى أن هذا النموذج يمثل سلوك الإمتزاز بصورة أفضل نسبياً من نماذج لانجمير و فروندليش وتمكين في هذا الوسط.

أما نموذج لانجمير فقد أعطى قيمة ($R^2 = 0.6624$) ، و هي أقل من تلك المسجلة لنموذج سيبس، مما يدل على أن فرضية الإمتزاز على سطح متجانس و بطبقة أحادية لا تصف بصورة كاملة السلوك التجريبي للنظام المدروس. كما أظهر نموذج فروندليش توافقاً متوسطاً مع النتائج التجريبية، حيث بلغت قيمة معامل فروندليش ($n = 2.2186$)، و هي قيمة أكبر من الواحد، مما يشير إلى أن عملية الإمتزاز ملائمة في هذا الوسط.

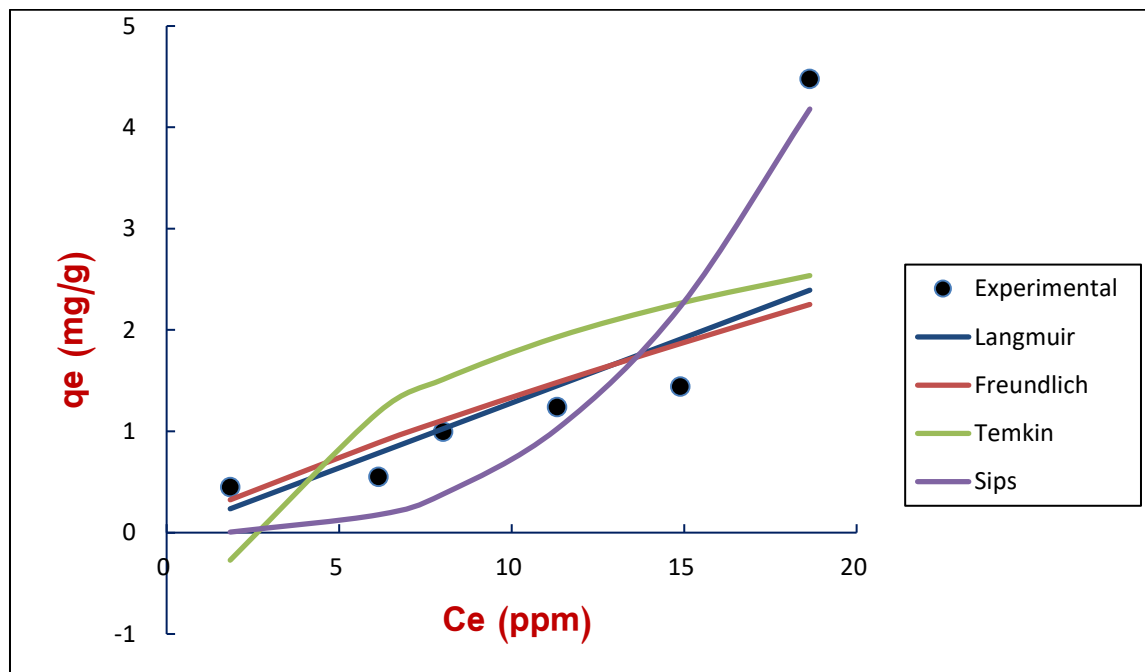
في المقابل، سجل نموذج تمكين أضعف توافق مع النتائج التجريبية ($R^2 = 0.5761$) ، و هو ما يدل على أن هذا النموذج لا يمثل بدقة سلوك الإمتزاز في الظروف المدروسة.

و بصفة عامة، يمكن تفسير السلوك الجيد نسبياً للإمتزاز في الوسط الحمضي بكون قيمة الرقم الهيدروجيني أقل من نقطة انعدام الشحنة السطحية للجبس ($pH_{pzc} = 7.47$) ، مما يجعل سطح الجبس مشحوناً بشحنة موجبة نسبياً. و بما أن صبغة أحمر الكونغو ذات طبيعة أنيونية، فإن ذلك يعزز قوى التجاذب الكهروستاتيكي بين الصبغة و سطح الجبس، ويساهم في رفع قابلية إمتزازها على المادة المازة.

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن نموذج Sips هو الأكثر ملائمة لوصف امتزاز أحمر الكونغو على الجبس المعاد تدويره في الوسط الحمضي. ويختلف ذلك جزئياً عن دراسة Hassan وآخرين [1] التي وجدت أن نموذج Freundlich هو الأفضل لوصف امتزاز Chlorazol Yellow على الجبس. ويمكن تفسير هذا الاختلاف باختلاف البنية الكيميائية للصبغتين واختلاف طبيعة المواقع السطحية المشاركة في عملية الامتزاز. ومع ذلك فإن كلا الدراستين تؤكدان وجود درجة من عدم تجانس السطح ووجود مواقع امتزاز ذات طاقات مختلفة.

IV-3-2- دراسة إيزوتارم الامتزاز عند pH=7 :

يبين الشكل (IV- 16) منحنيات نماذج إيزوتارم الامتزاز المختلفة عند الوسط المتعادل (pH=7).



الشكل (IV- 16): نماذج الايزوتارم المدروسة عند pH=7

أما نتائج ثوابت النماذج ومعاملات الارتباط الخاصة بكل نموذج فتظهر في الجدول التالي :

الجدول (IV- 8): ثوابت نماذج إيزوتارم الامتزاز لصبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عند pH=7

النموذج	R ²	الثوابت	القيمة
Sips	0.8682	q _s	100.0000
		K _s	0.0181
		β	2.8843
Langmuir	0.5789	q _{max}	-384.0836
		K _L	-0.0003
Freundlich	0.5230	K _f	0.1940
		n	1.1933
Temkin	0.4534	B	1.2137
		A _T	0.4338

تكشف النتائج المتحصل عليها عن اختلاف واضح في قدرة النماذج الرياضية على تمثيل السلوك الحقيقي لعملية الامتزاز عند هذا الوسط، حيث سجل نموذج سيبس أعلى قيمة لمعامل الارتباط ($R^2 = 0.8682$)، مما يدل على امتلاكه أفضل توافق مع البيانات التجريبية مقارنة ببقية النماذج المدروسة.

و يشير ذلك إلى أن إمتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس في هذا الوسط يتم وفق سلوك أكثر تعقيدا من الإمتزاز المثالي المفترض في نموذج لانجمير، كما أنه لا يتبع بصورة كاملة الفرضيات المبسطة لنموذج فروندليش.

أما نموذج لانجمير فقد أظهر توافقا جيدا نسبياً مع النتائج التجريبية، مما يدل على إمكانية حدوث إمتزاز على مواقع إمتزاز محددة على سطح الجبس، في حين أظهر نموذج فروندليش توافقا مقبولا يشير إلى احتمال وجود اختلاف نسبي في خصائص مواقع الإمتزاز. أما نموذج تمكين فقد سجل توافقا أقل مقارنة بالنماذج الأخرى، مما يدل على محدودية قدرته على وصف سلوك الإمتزاز في هذا الوسط.

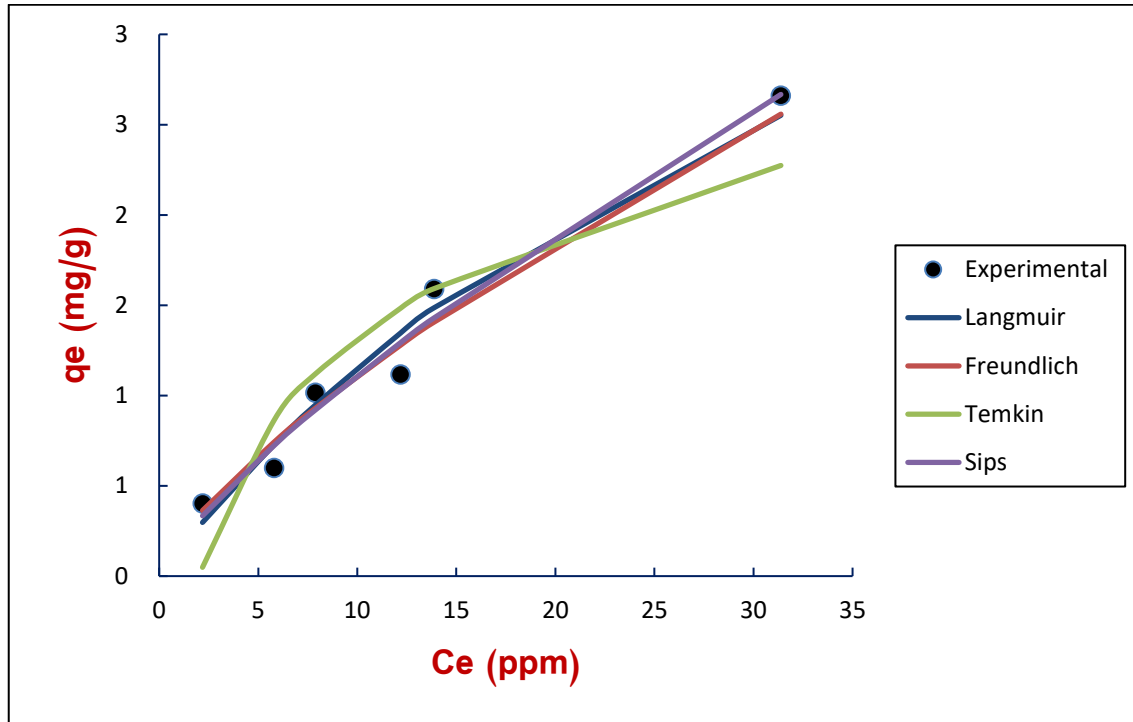
و يمكن تفسير هذا السلوك بكون قيمة الرقم الهيدروجيني ($pH = 7$) قريبة من قيمة نقطة انعدام الشحنة السطحية للجبس ($pH_{pzc} = 7.47$)، حيث يصبح سطح الجبس شبه متعادل كهربائيا. ويؤدي ذلك إلى انخفاض تأثير التجاذب الكهروستاتيكي مقارنة بالوسط الحمضي، مما يجعل عملية الإمتزاز أكثر ارتباطا بخصائص السطح و توزيع مواقع الإمتزاز، و هو ما يفسر تفوق نموذج سيبس في تمثيل النتائج التجريبية.

وعموماً، تشير نتائج الإيزوتارم عند ($pH=7$) إلى أن عملية الامتزاز تصبح أكثر تعقيداً في الوسط المتعادل، نتيجة تغير خصائص سطح الجبس واختلاف توزيع المواقع النشطة، وهو ما يفسر تفوق نموذج سيبس مقارنة بالنماذج الأخرى في وصف السلوك التجريبي

وتتفق هذه النتيجة مع ما توصل إليه Hassan وآخرون [1] عند دراسة امتزاز صبغة أنيونية على الجبس، حيث سجلوا أفضل أداء للامتزاز عند الوسط المتعادل، وأرجعوا ذلك إلى التوازن المناسب بين خصائص السطح وشحنة جزيئات الصبغة، مما يهيئ ظروفًا ملائمة لتثبيت الملوثات على المادة المازة.

IV-3-3-دراسة إيزوتارم الامتزاز عند pH=9 :

يبين الشكل (IV-17) منحنيات نماذج إيزوتارم الامتزاز المختلفة عند الوسط القاعدي (pH=9).



الشكل (IV-17): نماذج الايزوتارم المدروسة عند pH=9

أما ثوابت النماذج المختلفة ومعاملات الارتباط فتظهر في الجدول التالي :

الجدول (IV-9): ثوابت نماذج إيزوتارم الامتزاز لصبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عند pH= 9

النموذج	R ²	الثوابت	القيمة
Sips	0.9740	q _s	42.2762
		K _s	0.0011
		β	0.8018
Langmuir	0.9675	q _{max}	5.9147
		K _L	0.0242
Freundlich	0.9699	K _f	0.2045
		n	1.3641
Temkin	0.8523	B	0.8356
		A _T	0.4844

أظهرت نتائج الملائمة أن نموذج سيبس (Sips) حقق أفضل توافق مع النتائج التجريبية، حيث سجل أعلى قيمة لمعامل الارتباط ($R^2 = 0.9740$)، متفوقاً على بقية النماذج المدروسة. وتشير هذه النتيجة إلى أن نموذج سيبس يوفر الوصف الأقرب لسلوك إمتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس في هذا الوسط.

كما أظهر نموذج لانجمير توافقاً جيداً نسبياً ($R^2 = 0.9675$)، مما يدل على أن جزءاً من عملية الإمتزاز يمكن وصفه بفرضية تكوين طبقة إمتزاز أحادية على سطح المادة المازة. غير أن تفوق نموذج سيبس يشير إلى أن السلوك الفعلي للإمتزاز أكثر تعقيداً من النموذج المثالي الذي يفترضه لانجمير، وأن سطح الجبس قد يحتوي على مواقع إمتزاز تختلف في خصائصها وقدرتها على تثبيت جزيئات الصبغة.

أما نموذج فروندليش فقد أظهر توافقاً مقبولاً مع النتائج التجريبية، مما يدعم احتمال وجود تباين نسبي في خصائص مواقع الإمتزاز على سطح الجبس. في حين سجل نموذج تمكين توافقاً أقل مقارنة بالنماذج الأخرى، مما يدل على محدودية قدرته على تمثيل سلوك الإمتزاز في هذا الوسط.

و على الرغم من أن الوسط القاعدي ($pH = 9$) يؤدي إلى انخفاض كفاءة إزالة الصبغة مقارنة بالوسط الحمضي، نتيجة تجاوز قيمة الرقم الهيدروجيني لنقطة انعدام الشحنة السطحية للجبس ($pH_{pzc} = 7.47$)، فإن نتائج الإيزوتارم تبين أن عملية الإمتزاز ما تزال ممكنة وتخضع لتفاعل بين عدة عوامل سطحية، وهو ما يفسر التوافق الممتاز لنموذج سيبس مع النتائج التجريبية.

و بصفة عامة، تشير نتائج الإيزوتارم عند $pH = 9$ إلى أن نموذج سيبس هو الأكثر قدرة على وصف سلوك إمتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره في الوسط القاعدي، مما يدل على أن عملية الإمتزاز لا تتم وفق نموذج مثالي بسيط، وإنما تتأثر بخصائص السطح وتوزيع مواقع الإمتزاز المتاحة.

ويتوافق هذا السلوك مع ما ورد في دراسة Hassan وآخرين [1]، حيث سُجل تراجع في كفاءة إزالة الصبغة الأنيونية عند القيم القاعدية للرقم الهيدروجيني. وقد أرجع الباحثون ذلك إلى التغير في طبيعة التفاعلات السطحية المسيطرة على عملية الامتزاز مع ازدياد قلوية الوسط، وهو ما ينعكس على قدرة الجبس على تثبيت جزيئات الصبغة. وتدعم هذه الملاحظة النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة، والتي تشير إلى أن شروط الوسط تؤثر بشكل مباشر في آلية الامتزاز وكفاءة إزالة أحمر الكونغو.

IV-3-4- المناقشة العامة لنماذج الإيزوتارم :

من خلال مقارنة نتائج دراسة إيزوتارم الإمتزاز يتضح أن النماذج المدروسة لم تقدم نفس القدرة على تمثيل السلوك التجريبي لإمتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره، حيث اختلفت قيم معاملات الارتباط باختلاف النموذج و الرقم الهيدروجيني للوسط.

و قد تبين أن نموذج سيبس (Sips) حقق أفضل توافق مع النتائج التجريبية عند مختلف قيم الرقم الهيدروجيني المدروسة (pH=5, 7, 9)، حيث سجل أعلى قيم لمعامل الارتباط مقارنة بنماذج لانجمير و فروندليش و كذلك تمكين. و يشير ذلك إلى أن هذا النموذج هو الأكثر قدرة على وصف سلوك الإمتزاز في النظام المدروس.

و يُعزى تفوق نموذج سيبس إلى كونه يجمع بين خصائص نموذجي لانجمير و فروندليش، مما يجعله أكثر ملائمة لوصف أنظمة الإمتزاز الحقيقية التي لا تتبع بصورة كاملة فرضية السطح المتجانس أو فرضية عدم التجانس المطلق. و تشير هذه النتيجة إلى أن إمتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس يتم على مواقع إمتزاز تختلف نسبيا في خصائصها وطاقتها، مع إمكانية اقتراب السلوك من الإمتزاز أحادي الطبقة عند بعض الظروف.

كما أظهرت النتائج أن الرقم الهيدروجيني يؤثر بصورة واضحة على سلوك الإمتزاز، حيث تحققت أفضل كفاءة إزالة في الوسط الحمضي (pH = 5)، بينما انخفضت الكفاءة عند الوسطين المتعادل والقاعدي. و يمكن تفسير ذلك بالاعتماد على قيمة نقطة انعدام الشحنة السطحية للجبس (pH_{PZC} = 7.47)، إذ يكون سطح الجبس موجب الشحنة نسبيا عند pH = 5، مما يعزز التجاذب الكهروستاتيكي مع صبغة أحمر الكونغو الأنيونية، في حين يضعف هذا التأثير تدريجيا عند الاقتراب من قيمة pH_{PZC} أو تجاوزها.

وبصفة عامة، تشير نتائج الإيزوتارم إلى أن إمتزاز صبغة أحمر الكونغو على سطح الجبس المعاد تدويره عملية معقدة نسبيا تتأثر بكل من خصائص السطح والرقم الهيدروجيني للوسط، وأن نموذج سيبس يوفر الوصف الأكثر ملائمة للسلوك التجريبي مقارنة ببقية النماذج المدروسة.

IV-4- خلاصة الفصل

حُصص هذا الفصل لدراسة إمتزاز صبغة أحمر الكونغو باستعمال الجبس المعاد تدويره، مع التركيز على توصيف المادة المازة و فهم العوامل المؤثرة في عملية الإمتزاز و آليتها المحتملة.

أظهرت نتائج التوصيف البنيوي و السطحي أن الجبس يمتلك خصائص مناسبة لعملية الإمتزاز، حيث أكدت نتائج FTIR وجود المجموعات الوظيفية المميزة للجبس و لصبغة أحمر الكونغو، كما بينت

نتائج SEM بنية سطحية تسمح بتفاعل الصبغة مع سطح المادة المازة. و قد أظهرت دراسة نقطة انعدام الشحنة السطحية أن قيمة pH_{pzc} للجبس بلغت 7.47، و هو ما يفسر تأثير الرقم الهيدروجيني على كفاءة إمتزاز صبغة أحمر الكونغو.

كما بينت دراسة سلوك الإمتزاز أن زمن التلامس و الرقم الهيدروجيني والتركيز الابتدائي للصبغة تعد من العوامل الأساسية المتحكممة في كفاءة الإزالة. وقد سجلت أعلى كفاءة إمتزاز في الوسط الحمضي عند $pH=5$ ، في حين انخفضت الكفاءة في الوسطين المتعادل و القاعدي، و هو ما يتوافق مع تغير الشحنة السطحية للجبس مقارنة بالشحنة الأنيونية لصبغة أحمر الكونغو.

و أظهرت نتائج الإيزوترام أن نموذج سيبس (Sips) كان الأكثر توافقا مع النتائج التجريبية عند مختلف قيم الرقم الهيدروجيني المدروسة، مما يشير إلى أن عملية الإمتزاز لا تتبع نمودجا مثاليا بسيطا، بل تتأثر بتعدد خصائص مواقع الإمتزاز و طبيعة التفاعلات السطحية بين الجبس والصبغة.

كما أكدت نتائج FTIR و SEM بعد الإمتزاز حدوث تثبت لجزيئات الصبغة على سطح الجبس مع المحافظة على البنية الكيميائية الأساسية للمادة المازة، مما يدعم نجاح عملية الإمتزاز.

و بصفة عامة، تبين النتائج المتحصل عليها أن الجبس المعاد تدويره يمتلك قدرة واعدة على إزالة صبغة أحمر الكونغو من المحاليل المائية، مما يجعله مادة مازة منخفضة التكلفة و قابلة للتثمين في تطبيقات معالجة المياه والحد من التلوث الناتج عن الأصباغ العضوية.

قائمة المراجع:

- [1] M. J. Hassan, M. F. Islam, N. Akter, M. Nizam Uddin, A. Y. Abir, S. Ben Aoun & M. A. Hasnat (2021). *Applicability of gypsum in selective removal of anionic dye molecules from aqueous medium*. Applied Water Science, 11, 7.
- [2] Alotaibi, A. M., Aljabbab, A. A., Alajmi, M. S., Qadrouh, A. N., Farahat, M., Abdel Khalek, M. A., Baioumy, H., Alzahrani, R. Y., Mana, T. H., & Almutairi, R. S. (2025). *Utilization of Phosphogypsum as Sustainable Adsorbent for Removal of Crystal Violet Dye from Wastewater: Kinetics, Thermodynamics, and Applications in Textile Effluent Treatment*. Sustainability, 17(8), 3320
- [3] Wang, L., & Wang, A. (2008), Adsorption properties of Congo Red from aqueous solution onto surfactant-modified montmorillonite. *Journal of Hazardous Materials*, 160(1), 173–180
- [4] Obunwo, C. C., Ubong, I., Orgu, G. I. (2012). *Removal of Reactive Red 1 dye from aqueous solution using gypsum*.
- [5] Mittal, A., Mittal, J., Malviya, A., Kaur, D., & Gupta, V. K. (2009). *Adsorptive removal of hazardous anionic dye Congo Red from wastewater using waste materials and recovery by desorption*. Journal of Colloid and Interface Science, 340(1), 16–26

خاتمة

خاتمة

في ظل تزايد الضغوط البيئية الناجمة عن الأنشطة الصناعية، وتفاقم مشكلة تلوث الموارد المائية بالأصبغ العضوية السامة، تكتسب الحاجة إلى حلول تقنيات معالجة فعّالة ومتوفرة محلياً أولوية قصوى. هدفت هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية استخدام الجبس المعاد تدويره كمادة مازة منخفضة التكلفة لإزالة صبغة أحمر الكونغو من المحاليل المائية، وذلك من خلال توصيف خصائصه البنيوية والكيميائية والسطحية، ودراسة تأثير بعض العوامل التشغيلية على مردود الامتزاز، إضافة إلى تحليل سلوك التوازن وتفسير آلية الامتزاز اعتماداً على نماذج الإيزوتارم المختلفة.

أظهرت نتائج التوصيف البنيوي بواسطة إنعراج الأشعة السينية (XRD) أن العينة تتكون أساساً من طور الجبس ثنائي الإماهة ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، مع توافق جيد بين النمط التجريبي والمحسوب، مما يؤكد سيادة طور الجبس واستقرار البنية البلورية للمادة المستعملة. كما بين تحليل الأشعة تحت الحمراء (FTIR) ظهور تغيرات في الحزم المميزة للصبغة بعد الامتزاز، مما يؤكد ارتباط جزيئات أحمر الكونغو بمواقع الامتزاز على سطح الجبس.

كما كشفت دراسة نقطة انعدام الشحنة السطحية (pH_{PZC}) عن قيمة بلغت 7.47، وهو ما يدل على أن سطح الجبس يكون موجب الشحنة في الأوساط الحمضية وسالب الشحنة في الأوساط القاعدية. وقد ساهمت هذه الخاصية في تفسير السلوك الامتزازي للصبغة المدروسة، باعتبار أن أحمر الكونغو صبغة أنيونية تتأثر بشكل مباشر بالتفاعلات الكهروستاتيكية مع سطح المادة المازة.

بينت نتائج دراسة تأثير الرقم الهيدروجيني أن الوسط الحمضي كان الأكثر ملاءمة لعملية الامتزاز، حيث سُجلت أعلى كفاءة إزالة بلغت 93% عند $\text{pH} = 5$ وبتركيز ابتدائي قدره 20 ppm، بينما انخفضت الكفاءة في الوسط المتعادل لتتراوح بين 39% و63%، وفي الوسط القاعدي بين 37% و56%. ويُعزى هذا السلوك إلى ازدياد التجاذب الكهروستاتيكي بين سطح الجبس المشحون إيجابياً وجزيئات أحمر الكونغو سالبة الشحنة في الأوساط الحمضية، في حين يؤدي ارتفاع قيمة pH إلى إضعاف التجاذب الكهروستاتيكي بين السطح والصبغة، مما يحد من فعالية الامتزاز.

وأظهرت دراسة الإيزوتارم أن نموذج سيبس (Sips) كان الأكثر توافقاً مع النتائج التجريبية عند مختلف قيم الرقم الهيدروجيني المدروسة، مما يشير إلى أن عملية امتزاز أحمر الكونغو على الجبس المعاد تدويره لا تتم وفق آلية مثالية بسيطة، بل تتأثر بخصائص سطح المادة المازة وتوزيع مواقع الامتزاز وطاقتها.

وبصفة عامة، تؤكد النتائج المتحصل عليها أن الجبس المعاد تدويره يمتلك قدرة واعدة على إزالة صبغة أحمر الكونغو من المحاليل المائية، مما يجعله مادة مازة منخفضة التكلفة وقابلة للتنمين في تطبيقات

معالجة المياه، مع مساهمة إضافية في تئمين النفايات الجبسية والحد من آثارها البيئية، وهو ما يبرز الجدوى البيئية والاقتصادية لهذا التوجه.

وعلى الرغم من هذه النتائج الإيجابية والمُشجعة، فإن العمل لم يخلُ من بعض القيود، لا سيما عدم دراسة تأثير عوامل مهمة مثل درجة الحرارة، وعدم تقييم إمكانية إعادة استخدام الجبس بعد التشبع وهو جانب محوري لتعزيز استدامة العملية على الصعيدين البيئي والاقتصادي.

بناءً على ذلك، تُقدّم الآفاق البحثية المستقبلية التوصيات التالية:

- دراسة تأثير العوامل الديناميكية مثل درجة الحرارة T على كفاءة الامتزاز.
- تطبيق منهجية استجابة السطح (RSM) لتحسين الظروف التجريبية وتحديد التفاعل بين المتغيرات المؤثرة بشكل أمثل.
- تعديل الجبس بواسطة وسائل كيميائية أو فيزيائية لتعزيز أدائه الامتزازي.
- تطبيق المنهجية المطبقة على مياه ملوثة حقيقية ناتجة عن مصادر صناعية.
- تقييم إمكانية إعادة تدوير الجبس وإعادة استخدامه بعد التشبع بالصبغة، بما يسهم في رفع استدامة العملية وتقليل النفايات.
- تقييم الأثر البيئي الشامل للعملية من أجل تحقيق استدامة متكاملة على المدى الطويل.

الملاحق

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research

University of Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculty of Exact Sciences

Department of Chemistry

In Partnership with ACE & LEVRES Research Laboratories



CERTIFICATE OF PARTICIPATION

This is to certify that

Rayane Sai / Hadjer Mekki

has successfully presented a Poster entitled:

"pH-Dependent Photocatalytic Degradation of Congo Red Using Recycled Gypsum Plasterboard for Environmental Remediation"

Co-authored by: Kods Mennai, Latra Medaoui and Mohammed Sadok Mahboub

At the 3rd Study Day on Applied Chemistry and Environmental Engineering (SDACEE'3), held at the Faculty of Exact Sciences, University of El Oued, on April 23, 2026.



The Dean



Presented this 23rd day of April, 2026

الملاحق

الملاحق

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
University of Echahid Hamma Lakhdar – El Oued

Faculty of Exact Sciences

Department of Chemistry

In Partnership with ACE & LEVRES Research Laboratories



CERTIFICATE OF PARTICIPATION

This is to certify that

Mennai Kods

has successfully presented a Poster entitled:

“Applicability of gypsum for Enhanced Dye Removal: Structural Characterization and Equilibrium, Kinetics, and Isotherm”

Co-authored by: Medaoui Latra , Mekki Hadjer, Sai Rayane, and Zobeidi Ammar

At the 3rd Study Day on Applied Chemistry and Environmental Engineering (SDACEE'3), held at the Faculty of Exact Sciences, University of El Oued, on April 23, 2026.

The Dean



Presented this 23rd day of April, 2026