مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية الكيميائية والبترولية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 5

1448 هـ - 2026 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص **المدير المسؤول عن المجلة**

أ. د. وليد حمادة	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الإنسانية**
د.نعيمة عجيب	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية**

د.محمد فراس رمضان	عضو هيئة التحرير
د. مضر سعود	عضو هيئة التحرير
د. ممدوح عبارة	عضو هيئة التحرير
د. موفق تلاوي	عضو هيئة التحرير
د. طلال رزوق	عضو هيئة التحرير
د. أحمد الجاعور	عضو هيئة التحرير
د. الياس خلف	عضو هيئة التحرير
د. روعة الفقس	عضو هيئة التحرير
د. محمد الجاسم	عضو هيئة التحرير
د. خليل الحسن	عضو هيئة التحرير
د. هيثم حسن	عضو هيئة التحرير
د. أحمد حاج موسى	عضو هيئة التحرير

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

سورية . حمص . جامعة حمص . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : 2138071 31 963 ++

. موقع الإنترنت : www.homs-univ.edu.sy

. البريد الالكتروني : journal.homs-univ.edu.sy

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
- طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
- **اذا كان الباحث طالب دراسات عليا:**

يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقته على النشر في المجلة.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:**

يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :**

يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.

- **اذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :**

يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):**

عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1- مقدمة

2- هدف البحث

3- مواد وطرق البحث

4- النتائج ومناقشتها .

5- الاستنتاجات والتوصيات .

6- المراجع.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسـبة لكليات (الآداب – الاقتصـاد– التربية – الحقوق – السياحة – التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):**
- عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1. مقدمة.
2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
3. أهداف البحث و أسئلته.
4. فرضيات البحث و حدوده.
5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
7. منهج البحث و إجراءاته.
8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
9. نتائج البحث.
10. مقترحات البحث إن وجدت.
11. قائمة المصادر والمراجع.

7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:

أ- قياس الورق 17.5×25 B5.

ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 – يمين 2.5- يسار 2.5 سم

ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8

ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20

ـ كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي ـ العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.

ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.

8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.

9- تقديم أي بحث للنشـر في المجلة يدل ضـمناً على عدم نشـره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة ـ الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة ـ سنة النشر ـ وتتبعها معترضة (–) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة ـ دار النشر وتتبعها فاصلة ـ الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة.

وفيما يلي مثال على ذلك:

–MAVRODEANUS, R1986– **Flame Spectroscopy**. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

ـــ بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة ـــ المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة ـــ أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة.

مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases **Clinical Psychiatry News** , Vol. 4. 20 – 60

ج. إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. **دفع رسم نشر (600) ل.س ستمئة ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.**
2. **دفع رسم نشر (2000) ل.س الفا ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .**
3. **دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .**
4. **دفع مبلغ (150) ل.س مئة وخمسون ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.**

المحتوى

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
دراسة تأثير الضوء في الخصائص البنيوية والإلكترونية لمشتق تيريفتال ألدهيدمع فورفورال ومركبه مع النحاس (Cu^{+2}).	د.زهراء العبد د. محمد مضر الخضر د. عدنان كودلأ	38-11
دراسة مخبرية لتركيب وخواص سوائل الحفر النانوية المستخدمة في حفر الطبقات المنتجة للنفط	د.م. مصطفى المصري	70-39
مواصفات الفحم المنشط من عيدان نبات القندريس واستخدامه لإزالة المركبات الفينولية من مياه الصرف الصناعي لمعامل الأدوية	د.م. فاطمة التركي	96-71
تأثير استخدام مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية (GFRP Waste) على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية	لمك بسّام الجداوي د. عامر الشيخ د. عبد الناصر الأعرج	128-97

دراسة تأثير الضوء في الخصائص البنيوية والإلكترونية لمشتق تيريفتال ألدهيدمع فورفورال ومركبه مع النحاس (Cu^{+2}).

زهراء العبد*، د. محمد مضر الخضر**، د. عدنان كودلأ***

ملخص البحث

تمّت دراسة تأثير الضوء على الخصائص البنيوية والإلكترونية لمشتق تيريفتال ألدهيد مع فورفورال ولمركبه مع أيون النحاس في الحالة السائلة بوجود مذيب الإيتانول بالاعتماد على نظرية تابعية الكثافة الإلكترونية المستقلة عن الزمن (DFT) والمتعلقة بالزمن (TD-DFT)، لما تتمتع به هذه الطريقة من دقة عالية بالنسبة للنتائج التي يتم الحصول عليها.

بعد تحديد البنى الهندسية الفضلى لهذين المركبين في الحالة الأساسية والحالة المثارة الأحادية والثلاثية تم إيجاد البنى الفراغية مع توزع الشحنات الجزئية (elemental charges) وأطوال الروابط (bond lengths)، وحساب الخصائص الإلكترونية والضوئية كطاقة الامتصاص والإصدار بالفلورة والفسفرة والمردود الكوانتي وذلك من أجل معرفة الحساسية الضوئية والنشاط الضوئي حيث تبين تأثر هذين المركبين بالضوء وزيادة الفعالية الكيميائية لهما.

. دكتورة في الكيمياء اللاعضوية، حمص، سوريا

.** أستاذ دكتور في الكيمياء اللاعضوية، جامعة حمص ، حمص، سوريا

.*** أستاذ دكتور في الكيمياء الفيزيائية الكوانتية، جامعة حمص، حمص، سوريا

Study of the effect of light on the structural and electronic properties of a terephthalaldehyde derivative with furfural and its complex with copper (Cu^{+2}).

Zahraa Al-Abd * *M.Moudar Al-Khuder* ** *Adnan Kodlaa*****

Research Summary

The effect of light on the structural and electronic properties of the terephthalaldehyde derivative with furfural and of its complex with copper ion in the liquid state in the presence of ethanol solvent was studied based on the theory of time-independent electronic density function (DFT) and time-related (TD-DFT), due to the high accuracy of this method in relation to the results obtained.

After determining the best geometric structures for these two compounds in the basic state and the singlet and triplet excited states, the stereostructures were found with the distribution of elemental charges and bond lengths, and the electronic and optical properties were calculated, such as the energy of absorption and emission by fluorescence, phosphorescence, and quantum yield, in order to know the photosensitivity and photosynthetic activity, as it was shown that these two compounds were affected by light and their chemical effectiveness increased.

Keywords: density functional theory, quantum yield, fluorescence, phosphorescence , absorption energy, density functional theory, optical properties.

* Dr. in inorganic chemistry، Homs، Syria.
** Prof .Dr. in inorganic chemistry in Al-Homs University, Homs, Syria
*** Prof. Dr. in Physical -Quantum Chemistry in Al-Homs University, Homs, Syria

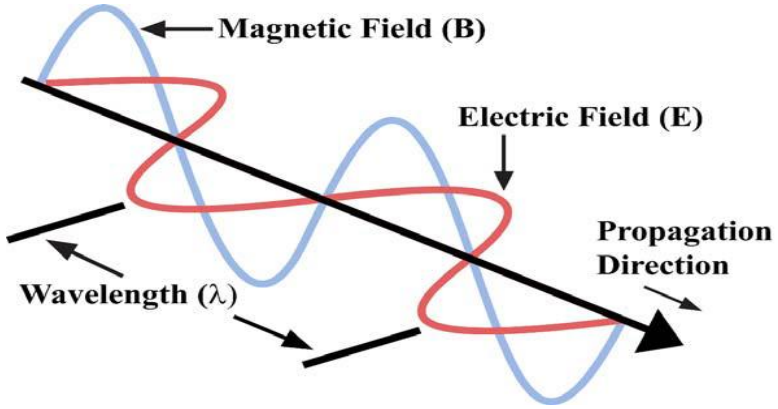
مقدمة (Introduction):

تعد الكيمياء الضوئية فرع من فروع الكيمياء والتي تهتم بالتأثيرات الكيميائيةُ للضوء ويستخدم هذا المصطلح لوصف التفاعلات الكيمائية الناتجة عن امتصاص الأشعة فوق البنفسجية التي تتراوح أطوال أمواجها (200-400 nm)أو امتصاص الضوء المرئي الذي تتراوح أطوال أمواجه-400 nm) (750أو الأشعة تحت الحمراء التي تتراوح أطوال أمواجها. (750-2500 nm)

يسمى التفاعل الناتج عن امتصاص الطاقة على شكل ضوء بالتفاعل الكيميائيُ الضوئي حيث تشكل حالات مثارة انتقالية نتيجة امتصاص الجزيئات للضوء التي تختلف في خصائصها الفيزيائية والكيميائية بشكل كبير عن الجزيئات الأصلية ومن أنواع التفاعلات الكيميائية (التفكك الضوئي، التماكب الضوئي، الأكسدة الضوئية، البلمرة الضوئية ...).

لعبت الكيمياء الضوئية دورا كبيرا ومهما في الصناعات بمختلف أنواعها ومنها صناعة العقاقير والمستحضرات الصيدلانية حيث تلقى المركبات الدوائية اهتماماً استثنائياً في السنوات الحالية نظرا لأهميتها العالية ولإمكانية دراسة الخصائص الكيميائية والفيزيائية لها.

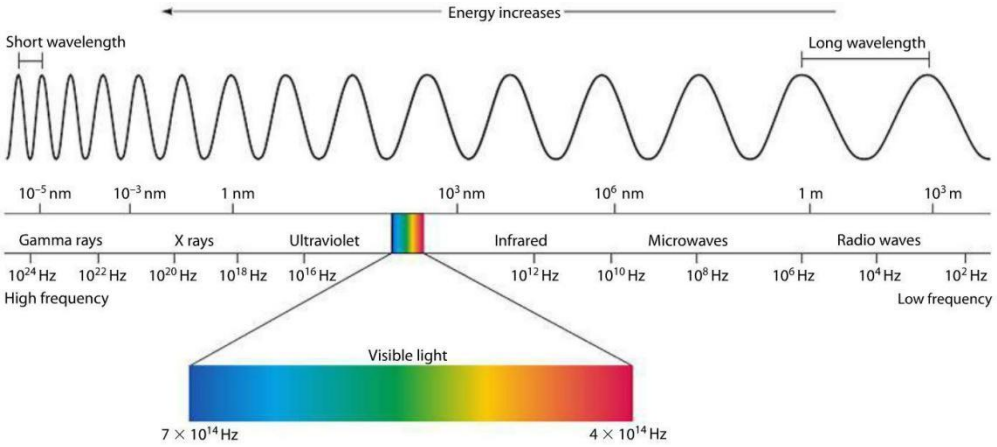
الضوء: عبارة عن أمواج كهرومغناطيسية لأنها تنشأ عن تداخل الحقلين الكهربائي والمغناطيسي المتعامدين معاً والشكل (1) يعبر عن الموجة الكهرومغناطيسية.



الشكل (1): الأمواج الكهرومغناطيسية

يتم استخدام تعبير "الضوء" للإشارة إلى الإشعاع الكهرومغناطيسي القادر على التسبب في الإثارة الإلكترونية أو التخميد الإلكتروني للجزيئات، وهو يتضمن جزء من الطيف الكهرومغناطيسي ضمن

المجال (100-1000 nm) بما في ذلك المناطق القريبة من الأشعة فوق البنفسجية والمرئية وقريبة من الأشعة تحت الحمراء (الشكل 2).



الشكل (2): الطيف الكهرومغناطيسي.

أهداف البحث (Amis Of The Research):

- دراسة التغيرات البنيوية والإلكترونية التي يسببها الضوء للمركب (PDBFE) ومركبها مع النحاس:
- دراسة الخصائص الضوئية (الامتصاصية،الفلورة،الفسفرة،.....) لهذين المركبين.
- تحديد الحساسية الضوئية (طول موجة الامتصاص،تواتر الاشعاع) لهذين المركبين أيضاً.

الطريقة الكوانتية والحسابات:

بالاعتماد على نظرية تابعية الكثافةDFT (Density Functional Theory) تم استخدام طريقة B3LYP المطورة من قبل بيكي (A.D. Becke) [1] و لي و يانغ و بار (C. Lee , W. Yang and R.G. Parr) [2] والمجموعة القاعدية المناسبة وهي (6-311+g(d,p)) .

وذلك باستخدام برنامجي Gaussian03 [3] و Gaussian09 [4.5] حيث نفذت حسابات على الذرات (الهدروجين والكربون والنتروجين والأكسجين والنحاس) وعلى الجزيئات المكونة من بعض أو كل الذرات السابقة . من أجل ذلك كان لابد من إدخال المعاملات الخاصة بالذرة أو المركب المدروس عبر واجهات

بيانية صُممت لعمل برامج غاوسيان (Gaussian 09W , Gaussian 03W ... الخ) مثل (GaussView5.0[6] ، GaussView6.0[7] ... الخ) وهي عبارة عن برامج مستقلة.

يتم حساب طاقة الارتباط ΔE_c (cohesion energy) للجزيئة M كما يأتي:

$$\Delta E_{c\,(M)} = E_{i\,(optimized\ Molecule)} - \sum_{A=1}^{N} E_{i\,(optimized\ Atom)} \quad (1)$$

حيث :

E_i : الطاقة الإلكترونية الكلية (total electronic energy) .

ويُحسب عرض المجال المحظور E_{gap} (energy gap) كما يأتي :

$$E_{gap} = |\varepsilon_{HOMO} - \varepsilon_{LUMO}| \quad (2)$$

حيث :

ε_{HOMO} : طاقة أعلى مدار جزيئي مشغول بالإلكترونات :

(energy of highest occupied molecular orbital)

ε_{LUMO} : طاقة أخفض مدار جزيئي غير مشغول بالإلكترونات :

(energy of lowest unoccupied molecular orbital)

تُحسب طاقة الإثارة لجزيئة ما نتيجة امتصاص الضوء، من خلال حساب الفرق بين الطاقة الكلية الإلكترونية للجزيئة في الحالة الأساسية (أي قبل تعريض الجزيئة للضوء) والطاقة الكلية الإلكترونية للجزيئة في الحالة المُثارة (أي بعد تعريض الجزيئة للضوء):

$$\varepsilon_{absorption} = E_{i\,(optimized\ ground\ state)} - E_{i\,(excited\ state)} \quad (3)$$

أما طول موجة الضوء اللازم لإثارة الجزيئة، فتُحسب، كما يأتي:

$$\varepsilon_{absorption} = h\nu_{absorption} = h\,\frac{c}{\lambda_{absorption}} \Rightarrow \lambda_{absorption} = \frac{hc}{\varepsilon_{absorption}} \quad (4)$$

حيث:

h: ثابت بلانك

$$\mathbf{h = 6.626\times 10^{-27}\ erg\times s}$$
$$\mathbf{= 6.626\times 10^{-27}\times 10^{-7} = 6.626\times 10^{-34}\ J\times s} \quad (5)$$
$$\mathbf{= 6.626\times 10^{-27}\times 0.624\times 10^{12} = 4.1346\times 10^{-15}\ eV\times s}$$

c: سرعة الضوء

$$\mathbf{c = 3\times 10^{10}\ cm\times s^{-1} = 3\times 10^{17}\ nm\times s^{-1}} \quad (6)$$

ويتم حساب طاقة الإصدار بالفلورة من خلال تحديد طاقة الحالة المُثارة الأُحادية الأولى:

$$\boldsymbol{\varepsilon_{fluorescence} = E_{i(optimized\ ground\ state)} - E_{i(optimized\ first\ excited\ singlet\ state)}} \quad (7)$$

وطول موجة الضوء الصادر بالفلورة، فيُحسب، كما يأتي:

$$\boldsymbol{\lambda_{fluorescence} = \frac{hc}{\varepsilon_{fluorescence}}} \quad (8)$$

أما طاقة الإصدار بالفسفرة فتُحسب من خلال تحديد طاقة الحالة المُثارة الثلاثية الأولى:

$$\boldsymbol{\varepsilon_{Phosphorescence} = E_{i(optimized\ gruondstate)} -} \quad (9)$$
$$\boldsymbol{E_{i(optimized\ first\ excited\ triplet\ state)}}$$

وطول موجة الضوء الصادر بالفسفرة، فيُحسب كما يأتي:

$$\lambda_{phosphorescence} = \frac{hc}{\varepsilon_{phosphorescence}} \quad (10)$$

والطاقة التي امتصتها الجزيئة وخزنتها (تغيير البنية الإلكترونية والهندسية للجزيئة)، فتُحسب من العلاقة:

$$\varepsilon_{activation} = \varepsilon_{absorption} - \varepsilon_{emission} \quad (11)$$

أما الطاقة الأديباتية فتُحسب كما يأتي:

في الحالة المثارة الأحادية:

$$E_{adiabatic} = \varepsilon_{fluorescence} + \varepsilon_{freq}(s_0) \quad (12)$$

في الحالة المثارة الثلاثية:

$$E_{adiabatic} = \varepsilon_{phosphorescence} + \varepsilon_{freq}(s_0) \quad (13)$$

حساب مردودي الفلورة Φ^{F} والفسفرة Φ^{Ph}:

$$\Phi^{F} = \frac{\varepsilon^{F}_{emission}}{\varepsilon_{Absorption}} \quad ، \quad \Phi^{Ph} = \frac{\varepsilon^{Ph}_{emission}}{\varepsilon_{Absorption}} \quad (14)$$

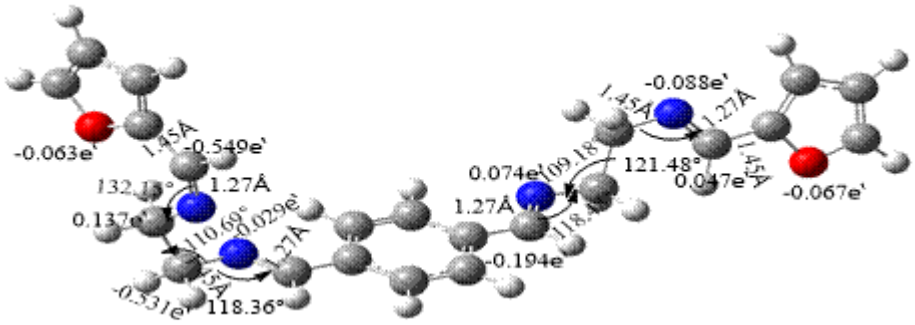
حساب المردود الكوانتي:

$$\Phi = \frac{\varepsilon_{Activation}}{\varepsilon_{Absorption}} \quad (15)$$

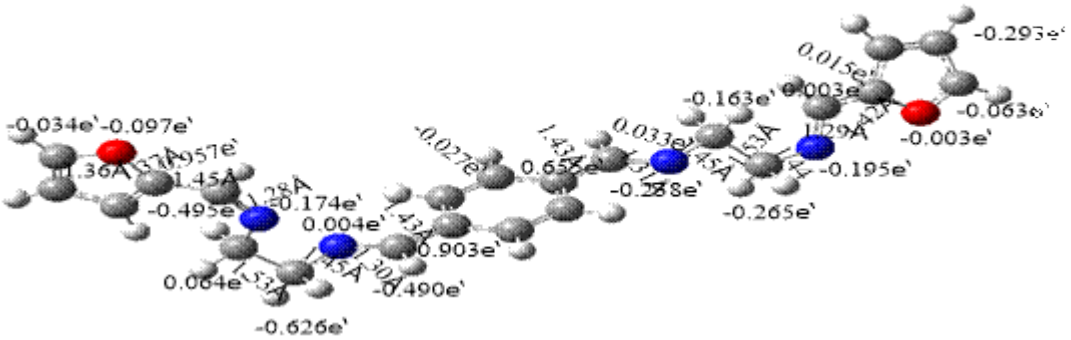
النتائج والمناقشة (Results and Discussion) :

المركب PDBFE:

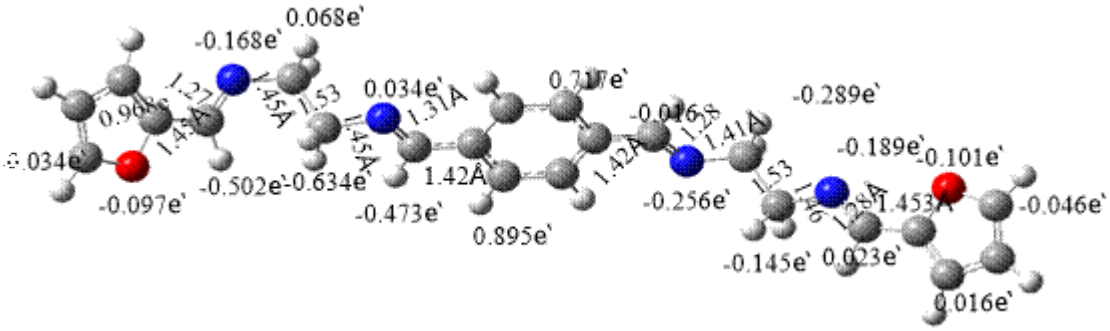
تمّت دراسة تأثير الضوء على الخصائص البنيوية والإلكترونية [8] للمشتق في الحالة السائلة بوجود مذيب الإيتانول لأنه يعد الأقل تأثيراَ على الخصائص البنيوية والإلكترونية للمركبات بالاعتماد على نظرية تابعية الكثافة الإلكترونية المستقلة عن الزمن (DFT) والمتعلقة بالزمن (TD-DFT). كخطوة أولى تمت دراسة التغيرات البنيوية والإلكترونية نتيجة تعريض المركب للضوء وبوجود الإيتانول بوصفه مذيباً. إذ تمّ إيجاد البنى الهندسية الفضلى لهذا المركب في الحالة الأساسية والحالة المثارة الأحادية والثلاثية. يُظهر الشكل (3) هذه البنى الفراغية مع توزع الشحنات الجزئية (elemental charges) وأطوال الروابط (bond lengths)، أما الجدول (1) فيتضمن الخصائص البنيوية والجدول (2) الخصائص الإلكترونية قبل التعريض للضوء وبعده.



الحالة الأساسية



الحالة المثارة الأحادية



الحالة المثارة الثلاثية

الشكل(3): البنى الهندسية المستقرة للمركب (PDBFE) في الحالة المثارة الأحادية والثلاثية.

الجدول(1): الخصائص البنيوية المركب PDBFE قبل التعريض للضوء وبعده.

الخاصية	قبل التعريض للضوء	بعد التعريض للضوء		نسبة التغيير	
		الحالة المثارة الأحادية	الحالة المثارة الثلاثية	الحالة المثارة الأحادية	**الحالة المثارة الثلاثية**
d (C=C) [Å]	1.45	1.47	1.44	(+1.38 %)	**(+0.69 %)**
d (C=N1) [Å]	1.31	1.28	1.21	(-2.29%)	**(-7.64%)**
d (C-N2) [Å]	1.29	1.30	1.27	(-0.78%)	**(-1.55%)**
d (C=N1-C) [Å]	1.45	1.43	1.41	(-1.38%)	**(-2.76%)**
d (C=N2-C) [Å]	1.45	1.44	1.46	(-0.69%)	**(+0.69%)**
d (CH_2-CH_2) [Å]	1.45	1.53	1.51	(+5.52%)	**(+4.14%)**
d (C-C) [Å]	1.45	1.43	1.42	(-1.38%)	**(-2.07%)**

الجدول(2): الخصائص الإلكترونية للمركب PDBFE قبل التعريض للضوء وبعده.

الخاصية الإلكترونية	قبل التعريض للضوء	بعد التعريض للضوء		نسبة التغيير(Erel %)	
		الحالة المثارة الأحادية	الحالة المثارة الثلاثية	الحالة المثارة الأحادية	**الحالة المثارة الثلاثية**
ΔE_C	33231.5097	33228.9296	33229.4113	(-0.0078%)	**(-0.0063%)**
μ_p (Debye)	3.98	7.556	5.0146	(+89.85%)	**(+25.99%)**
E_{LUMO}(eV)	-1.9738	-2.4310	-1.5790	(+23.16%)	**(-19.99%)**
E_{HOMO}(eV)	-6.2795	-5.9883	-3.7869	(+4.59%)	**(+39.69%)**
E_{gap} (eV)	574.30	733.55	82.207	(-17.38%)	**(-48.72%)**

باستقراء القيم في الجداول (1,2) نلاحظ ما يأتي:

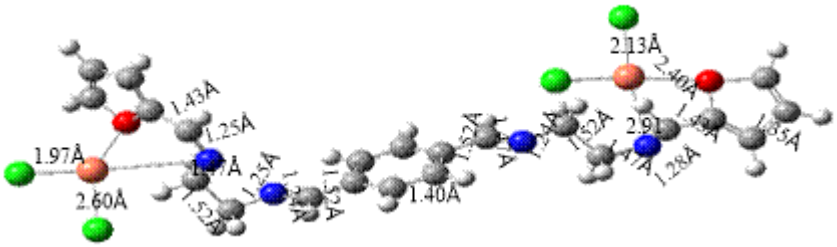
- تغيّر صغير جداً بأطوال الروابط والزوايا.
- تناقص عرض الفجوة بنسبة (17.38%) في الحالة المثارة الأحادية و (48.72%) في الحالة المثارة الثلاثية أي أن المركب أصبح أقل استقراراً الأمر الذي يشير إلى ازدياد النشاط الكيميائي نتيجة تعرضه للضوء.
- ازدياد عزم ثنائي الأقطاب في الحالة المثارة الأحادية (89.85%) و (25.99%) في الحالة المثارة الثلاثية الأمر الذي يشير إلى زيادة استقطابية المركب نتيجة تعرضه للضوء.

المركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$:

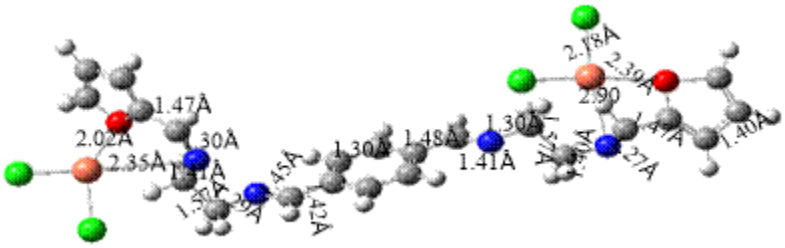
تمّت دراسة تأثير الضوء على الخصائص البنيوية والإلكترونية والطيفية للمركب بالاعتماد على نظرية تابعية الكثافة الإلكترونية المستقلة عن الزمن (DFT) والمتعلقة بالزمن(TD-DFT).

كخطوة أولى تمت دراسة التغيرات البنيوية والإلكترونية نتيجة تعريض المركب للضوء. حيث تمّ إيجاد البنى الهندسية الفضلى لهذا المركب في الحالة الأساسية والحالة المثارة الأحادية والثلاثية. يُظهر الشكل

(4) هذه البنى الفراغية مع توزع الشحنات الجزئية (elemental charges) وأطوال الروابط (bond lengths)، أما الجدول (3) فيتضمن الخصائص البنيوية والجدول (4) الخصائص الإلكترونية قبل التعريض للضوء وبعده.



الحالة المثارة الأولى



الحالة المثارة الثلاثية

الشكل(4): البنى الهندسية المستقرة للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ في الحالة المثارة الأحادية والثلاثية.

الجدول(3): الخصائص البنيوية للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ قبل التعريض للضوء وبعده.

الخاصية	قبل التعريض للضوء	بعد التعريض للضوء		نسبة التغيير	
		الحالة المثارة الأحادية	الحالة المثارة الثلاثية	الحالة المثارة الأحادية	**الحالة المثارة الثلاثية**
d (C-O) [Å]	1.75	1.76	1.73	(+0.57 %)	**(-1.14 %)**
d (C=C) [Å]	1.42	1.38	1.40	(-2.89 %)	**(-1.41 %)**
d (C=N1) [Å]	1.27	1.28	1.25	(+0.79%)	**(-1.57%)**
d (C-N2) [Å]	1.29	1.30	1.27	(-0.78%)	**(-1.55%)**
d (C=N1-C) [Å]	1.45	1.46	1.44	(+0.69%)	**(-0.69%)**
d (C=N2-C) [Å]	1.45	1.44	1.46	(-0.69%)	**(+0.69%)**
d (CH_2-CH_2) [Å]	1.54	1.53	1.52	(-0.65%)	**(-1.29%)**
d (C-C) [Å]	1.47	1.46	1.44	(-0.69%)	**(-2.04%)**

الجدول(4): الخصائص الإلكترونية للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ قبل التعريض للضوء وبعده.

الخاصية الإلكترونية	قبل التعريض للضوء	بعد التعريض للضوء		نسبة التغيير(Erel %)	
		الحالة المثارة الأحادية	الحالة المثارة الثلاثية	الحالة المثارة الأحادية	**الحالة المثارة الثلاثية**
(eV) ΔE_C	172606.8574	172604.3724	172601.3134	(-0.0014%)	**(-0.0032%)**

μ_p (Debye)	0.0038	0.0082	0.01	(+11.57%)	**(+16.32%)**
E_{LUMO}(eV)	-2.6038	-2.7244	-2.9301	(+4.63%)	**(+12.53%)**
E_{HOMO}(eV)	-6.1051	-6.0258	-5.9294	(-1.299%)	**(-2.878%)**
E_{gap} (eV)	3.5013	3.3014	2.9993	(-5.71%)	**(-14.33%)**

باستقراء القيم في الجداول (3,4) نلاحظ ما يأتي:

- تغيّر صغير جداً بأطوال الروابط والزوايا.
- تناقص عرض الفجوة بنسبة (5.71%−) في حالة المثارة الأحادية و(14.33%−) في الحالة المثارة الثلاثية أي أن المركب أصبح أقل استقراراً الأمر الذي يشير إلى ازدياد النشاط الكيميائي نتيجة تعرضه للضوء.
- ازدياد عزم ثنائي الأقطاب في الحالة المثارة الأحادية (11.57%+) و (16.32%+) في الحالة المثارة الثلاثية الأمر الذي يشير إلى زيادة استقطابية المركب نتيجة تعرضه للضوء.

الخصائص الضوئية ومخطط جابلونسكي:

في الخطوة الثانية تمت دراسة الخصائص الضوئية للمركب PDBFE مثل طاقات الامتصاص ($\varepsilon_{Absorption}$ والإصدار بالفلورة ($\varepsilon^{F}_{emission}$) والإصدار بالفسفرة ($\varepsilon^{Ph}_{emission}$) والمردود الكوانتي ϕ والعبور بين الأنظمة إضافةً إلى مردود كل من الفلورة ϕ^{F} والفسفرة ϕ^{Ph} ، كما هو واضح في الجدول (5) الآتي .

الجدول(5): الخصائص الضوئية للمركب PDBFE المدروسة .

الخاصية الضوئية	القيمة
$\varepsilon_{Absorption}$ (eV)	**3.7416**
$\lambda_{Absorption}$ (nm)	**331.51**

$\varepsilon^{F}_{emission}$ (eV)	**3.1698**
$\varepsilon^{Ph}_{emission}$ (eV)	**0.2505**
$\varepsilon_{Adiabatic}$ (eV)	**2.7632**
(eV) $\varepsilon_{Activation}$	**0.5457**
$\varepsilon_{Intersystem\ crossing}$ (eV)	**2.1061**
ϕ	**0.1458**
ϕ^{F}	**860.**
ϕ^{Ph}	**0.067**

باستقراء القيم في الجدول (5) نلاحظ ما يأتي:

- لإثارة المركب علينا تسليط ضوء طاقته:

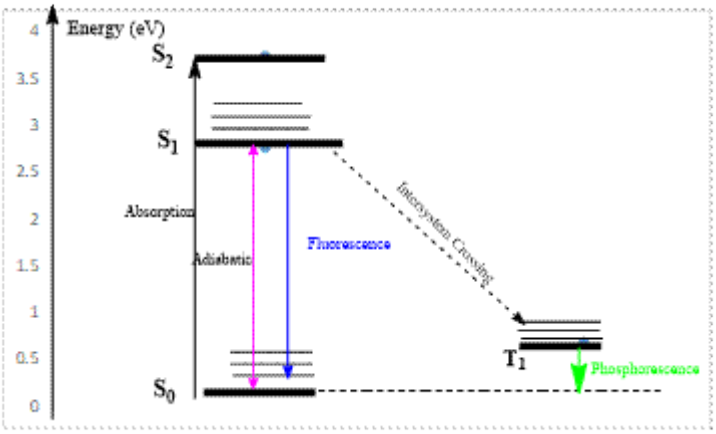
$$\varepsilon_{Absorption} = 3.741\,eV$$

- أي أن طول موجة الضوء اللازم لإثارة المركب:

$$\lambda_{Absorption} = 331.51\ nm$$

أي أننا نحتاج إلى ضوء في منطقة فوق البنفسجي.

كما تم توصيف مخطط جابلونسكي للمركب حيث تتم الإثارة نتيجة الانتقالات الإلكترونية من الحالة الأساسية إلى الحالات المُثارة الأحادية، وتحديداً إلى المستوي الإلكتروني الثاني S_2 حيث تم تمثيل المستويات الإلكترونية بخطوط عريضة وغامقة ورمز لها بـ $(S_1,S_2,T_1,T_2\ldots)$ أما السويات الاهتزازية فتم تمثيلها بخطوط رفيعة ورمز لها بأرقام، وتم الاكتفاء بثلاث سويات اهتزازية السوية الصفرية (0) والسوية الاهتزازية الموافقة لأعلى عدد موجي والسوية الاهتزازية الموافقة لأعلى شدة امتصاص، كما يبين المخطط طاقة الامتصاص وعملية الفلورة والفسفرة والعبور بين الأنظمة إضافة إلى الطاقة الأدياباتية المعبرة عن فرق الطاقة بين المستوي الإلكتروني الأساسي والمستوي المثار الأول.



كما تمت دراسة الخصائص الضوئية للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ مثل طاقات الامتصاص ($\varepsilon_{Absorption}$) والإصدار بالفلورة ($\varepsilon^{F}_{emission}$) والإصدار بالفسفرة ($\varepsilon^{Ph}_{emission}$) والمردود الكوانتي ϕ والعبور بين الأنظمة إضافةً إلى مردود كل من الفلورة ϕ^{F} والفسفرة ϕ^{Ph} ، كما هو واضح في الجدول (6) الآتي .

الجدول(6): الخصائص الضوئية للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ المدروسة .

الخاصية الضوئية	القيمة
$\varepsilon_{Absorption}$ (eV)	**1.7519**
$\lambda_{Absorption}$ (nm)	**707.99**
$\varepsilon^{F}_{emission}$ (eV)	**1.0251**
$\varepsilon^{Ph}_{emission}$ (eV)	**0.2353**
$\varepsilon_{Adiabatic}$ (eV)	**1.4901**

$\varepsilon_{Activation}$ (eV)	**1.4769**
$\varepsilon_{Intersystem\ crossing}$ (eV)	**0.4353**
ϕ	**0.843**
ϕ^{F}	**0.585**
ϕ^{Ph}	**0.1343**

باستقراء القيم في الجدول (6) نلاحظ ما يأتي:

- لإثارة المركب علينا تسليط ضوء طاقته:

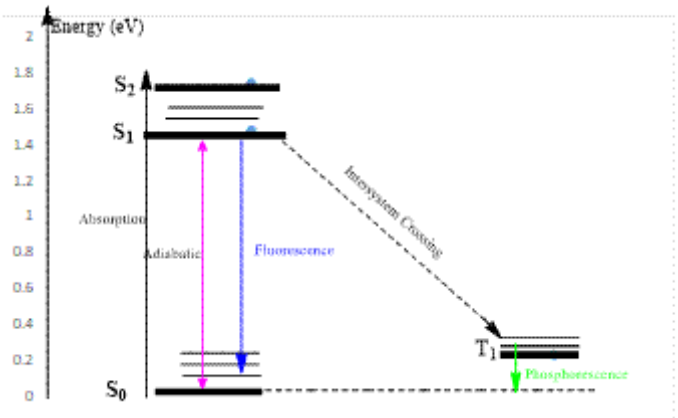
$$\varepsilon_{Absorption} = 1.7519\,\mathbf{eV}$$

- أي أن طول موجة الضوء اللازم لإثارة المركب:

$$\lambda_{Absorption} = 707.99\,\mathrm{nm}$$

أي أننا نحتاج إلى ضوء في منطقة الضوء المرئي.

كما تم توصيف مخطط جابلونسكي للمركب كما هو موضح.

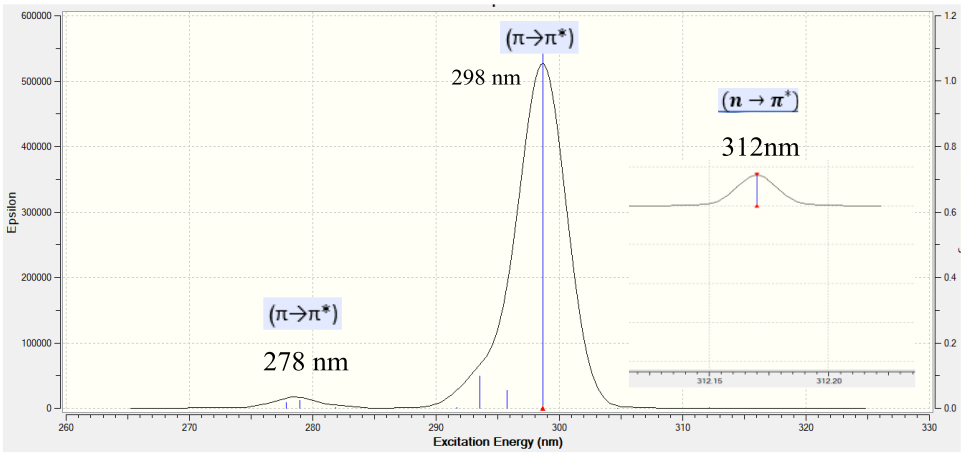


الخصائص الطيفية:

وفي الخطوة الثالثة تمّ دراسة امتصاصية المركبات للأشعة تحت الحمراء (IR) وللأشعة المرئية و فوق البنفسجية (UV-Vis) كوانتياً وتجريبياً.

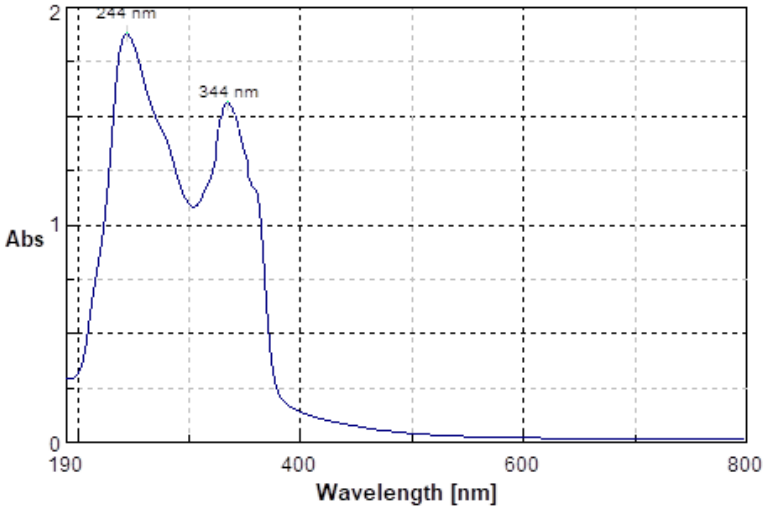
أطياف UV-Vis:

حيث يلاحظ في الطيف الكوانتي وجود عصابات امتصاص عند القيمة (278/298 nm) وعند (312nm) ويمكن أن تعزى إلى الانتقالات الإلكترونية من نوع ($\pi \rightarrow \pi^*$) نتيجة لاحتواء المركب على روابط ثنائية (C=N) و(C=C) العائدة للحلقة العطرية و ($n \rightarrow \pi^*$) نتيجة وجود أزواج إلكترونية حرة على نتروجين مجموعة الازوميثين و أكسجين فورفورال على التوالي، كما هو موضح بالشكل (3) و الجدول(7) يبين أهم قيم عصابات الامتصاص للمركب PDBFE كوانتياً.



الشكل (3): طيف الأشعة فوق البنفسجية للمركب PDBFE المحسوب كوانتياً.

سجلت عصابات الامتصاص في الطيف التجريبي في مذيب الإيتانول وباستخدام خلية كوارتز ذات عرض (1cm) وعند درجة حرارة الغرفة الموضح في الشكل(4) نلاحظ ظهور عصابة عند 344 (nm ناتجة عن الانتقالات ($n \rightarrow \pi^*$) نتيجة وجود أزواج إلكترونية حرة على نتروجين مجموعة الازوميثين وعند(244 nm) ناتجة عن الانتقالات ($\pi \rightarrow \pi^*$) نتيجة لاحتواء المركب على روابط ثنائية (C=N) و (C=C) العائدة للحلقة العطرية على التوالي.

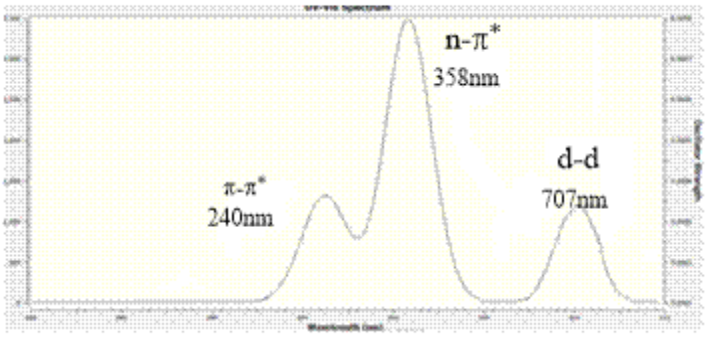


الشكل(4) : طيف (UV−Vis) للمركب(PDBFE)

الجدول(7) : قيم عصابات الامتصاص للمركب PDBFE كوانتياً وتجريبياً .

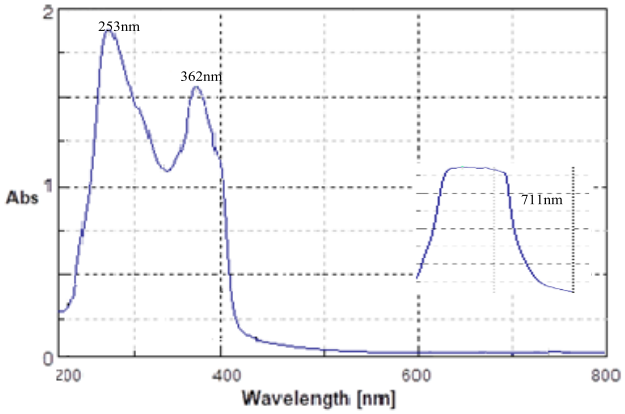
PDBFE	Quantum Value nm	Experimental value nm
π-π*	278/298	244
n-π*	312	344

كما دُرسَت امتصاصية المركب للأشعة المرئية وفوق البنفسجية (UV-Vis) وسجلت عصابات الامتصاص، ففي الطيف تظهر عصابة امتصاص عند القيمة (240nm) تعزى إلى الانتقالات الإلكترونية من نوع ($\pi \rightarrow \pi^*$) وعصابة امتصاص عند القيمة (358nm) تعزى الى نوع ($n \rightarrow \pi^*$) وعصابة امتصاص عند القيمة (707nm) ناتجة عن انتقالات d-d كما هو موضح في الشكل (5).



الشكل(5): طيف (UV-VIS) للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ والمحسوب كوانتياً.

سجلت عصابات الامتصاص في الطيف التجريبي في مذيب الإيتانول وباستخدام خلية كوارتز ذات عرض (1cm) وعند درجة حرارة الغرفة الموضح في الشكل(5) نلاحظ ظهور عصابة عند (362 nm) ناتجة عن الانتقالات ($n \rightarrow \pi^*$) نتيجة وجود أزواج إلكترونية حرة على نتروجين مجموعة الازوميثين وعند(253 nm) ناتجة عن الانتقالات ($\pi \rightarrow \pi^*$) نتيجة لاحتواء المركب على روابط ثنائية (C=N) و (C=C) العائدة للحلقة العطرية على التوالي وظهرت قمة جديدة عند (711 nm) تعود لانتقالات (d-d).



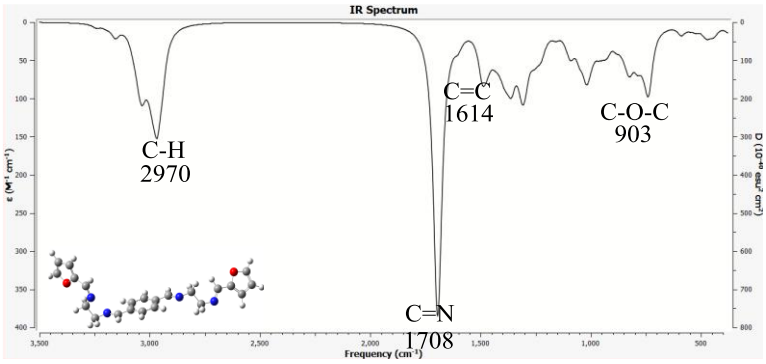
الشكل(5): طيف (UV-VIS) للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$.

الجدول(8): قيم عصابات الامتصاص للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ كوانتياً وتجريبياً.

$[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$	Quantum Value nm	Experimental Value nm
π-π*	240	253
n-π*	358	362
d-d	707	711

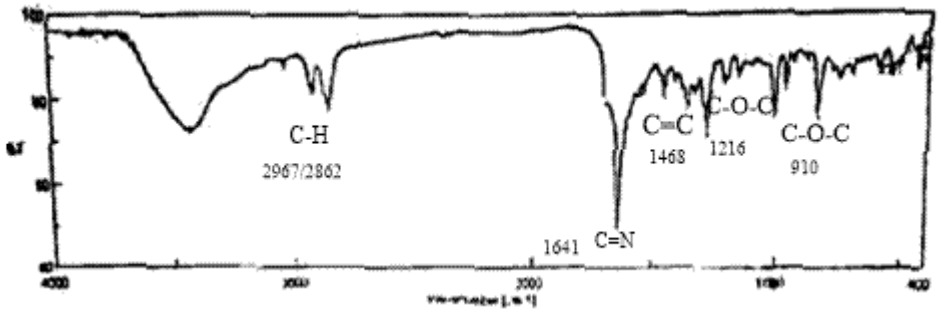
أطياف IR :

تبين من خلال دراسة طيف الأشعة تحت الحمراء للمركب PDBFE الشكل(6) المحسوب كوانتيا ظهور عصابة امتصاص عند($1708\ cm^{-1}$)عائدة لامتطاط زمرة (C=N) وظهور إشارة الفورفورال (C-O-C) عند($903\ cm^{-1}$) PDBFE.



الشكل(6): طيف IR للمرتبطة (PDBFE) بالموضع المفروق المحسوب كوانتياً.

كما تبين من خلال دراسة طيف الأشعة تحت الحمراء للمركب PDBFE الشكل(7) ومقارنته مع طيف المادة الأولية للفورفورال نلاحظ اختفاء إشارة زمرة (C=O) وظهور عصابة امتصاص عند($1641cm^{-1}$)عائدة لامتطاط زمرة (C=N) واختفاء عصابتي امتصاص(NH_2) وعصابة امتصاص عائدة لحني (NH_2) وظهور إشارة الفورفورال (C-O-C) عند($1216\ cm^{-1}$/ 910) مما يؤكد تشكل المركب PDBFE.



الشكل (7) : طيف الأشعة تحت الحمراء للمركب (PDBFE)

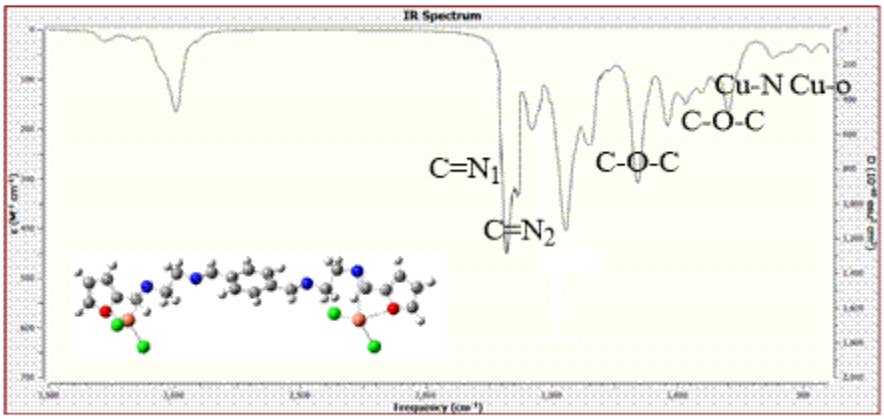
بمقارنة القيم التجريبية مع القيم الكوانتية لأهم المجموعات الوظيفية، نلاحظ تقارب بين القيم التجريبية والقيم المسجلة كوانتياً بحيث الفرق في القيم أقل من 100 درجة وفق الجدول(9).

الجدول(9): قيم تواترات الاهتزاز لأهم المجموعات الوظيفية للمركب PDBFE كوانتياً وتجريبياً .

PDBFE	Quantum Value cm^{-1}	Experimental value cm^{-1}
C-Hst	2988	2967
C=Nst	1700	1641
C=Cst	1446	1468
C-O-C	1214/903	1216/910

المركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$.:

تمّ حساب طيف IR للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ كوانتياً (الشكل 8) ، حيث أظهر الطيف انزياح قيم تواترات الاهتزاز للمجموعات التي تتساند مع الأيون المعدني عن قيمها في المركب PDBFE ويبيّن الجدول (10) أدناه مقارنة لقيم تواترات الاهتزاز المسجلة كوانتياً للمجموعات الوظيفية الأساسية في المركب والمركب الناتج.



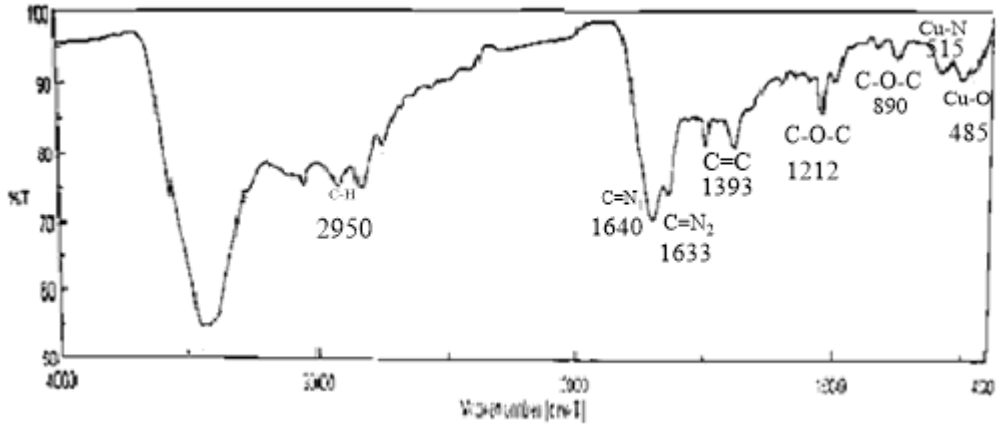
الشكل (8): طيف IR للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ والمحسوب كوانتياً.

الجدول (10): مقارنة قيم تواترات الاهتزاز كوانتياً لأهم المجموعات الوظيفية للمركبين (PDBFE) و $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$

Compound	$C=N_{st.}$ cm^{-1}	C-O-Ccm^{-1}	Cu-O cm^{-1}	Cu-N cm^{-1}
PDBFE	1708	1214/903	——	——
$[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$	1691/1652	1239/939	433	597

في طيف (FT-IR) للمركب نلاحظ انزياح عصابة امتصاص الرابطة (C=N) من القيمة (1641 cm^{-1}) في المرتبطة إلى القيمة ($1640/1633cm^{-1}$) في المركب أي أنه لدينا عصابتين ، حيث أن تساند النتروجين في المرتبطة مع أيون النحاس من خلال الزوج الإلكتروني الحر يؤدي إلى اضعاف

الرابطة وتناقص الطاقة اللازمة لاهتزازها ومن ثم انزياح امتصاص الرابطة بين الكربون والنتروجين نحو الأعداد الموجية الأقل ، وهذا دليل على تساند ذرة نتروجين في المرتبطة مع أيون النحاس ، أما العصابة الثانية فهي لامتصاص الرابطة (C=N) غير مشاركة في التساند، وانزياح عصابة الامتصاص التابعة للرابطة (C-O-C) من القيمة (1216/910 cm^{-1}) إلى القيمة 1212/890 (cm^{-1}) في المركب وهذا دليل على تساند ذرة النتروجين وذرة الأكسجين مع أيون المعدن، مما سبق يمكن القول بإن تساند الأيون المعدني Cu^{2+} مع المرتبطة (PDBFE) يتم من خلال ذرة نتروجين وذرة الأكسجين وذلك إثر انزياح العصابة العائدة لكل منهما نحو الأعداد الموجية الأقل مقارنة مع طيف المرتبطة الحرة.



الشكل(1): طيف IR للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$.

بمقارنة القيم التجريبية مع القيم الكوانتية لأهم المجموعات الوظيفية، نلاحظ تقارب بين القيم التجريبية والقيم المسجلة كوانتياً بحيث الفرق في القيم أقل من 100 درجة وفق الجدول(11).

الجدول(11): قيم تواترات الاهتزاز لأهم المجموعات الوظيفية للمركب $[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$ كوانتياً وتجريبياً .

$[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$	Quantum Value cm^{-1}	Experimental value cm^{-1}
C=Nst	1691/1652	1640

1393	1446	**C=Cst**
1212/890	1239/939	**C-O-C**

الإستنتاجات(Summary)

مقارنة الخصائص الضوئية:

يوضح الجدول (12) الخصائص الضوئية (طاقات الامتصاص والإصدار بالفلورة والإصدار بالفسفرة والمردود الكوانتي والعبور بين الأنظمة إضافة إلى مردود كل من الفلورة والفسفرة) للمركبات المدروسة .

الجدول (12): الخصائص الضوئية للمركبات المدروسة.

الخاصية	PDBFE	$[Cu_2(PDBFE)Cl_4]$
$\varepsilon_{Absorption}$ (eV)	3.7416	**1.75197**
$\lambda_{Absorption}$ (nm)	331.512	**707.99**
نوع الضوء	فوق بنفسجي	**مرئي(أحمر)**
$\varepsilon^{F}_{emission}$ (eV)	3.1698	**1.0251**
$\varepsilon^{Ph}_{emission}$ (eV)	0.2505	**0.2353**
$\varepsilon_{Activation}$ (eV)	0.5457	**1.4769**

$\varepsilon_{\text{Intersystem crossing}}$ (eV)	2.1061	**0.5898**
ϕ	0.1458	**0.843**
ϕ^{F}	0.857	**0.585**
ϕ^{Ph}	0.067	**0.1343**

باستقراء قيم الجدول (12) نلاحظ بأن المرتبطات تمتص الضوء فوق البنفسجي في حين امتصت المركبات الضوء المرئي (أحمر) ونلاحظ بأن مركب النحاس هو الأكثر تأثراً بالضوء

باستقراء الجداول والأشكال نلاحظ :

بالمقارنة بين المركبين نلاحظ أن إدخال المعدن قد زاد من النشاط الضوئي.

- نلاحظ من عرض الفجوة في الحالة الأساسية أن $[Cu_2(PDBTE)Cl_4]$ هو الأقل استقراراً و الأكثر نشاطاً.
- نلاحظ من قيم HOMO بالحالة الأساسية بأن المركب$[Cu_2(PDBTE)Cl_4]$ أكثر فاعلية .

الخلاصة(Conclusion):

تمّ في هذا البحث دراسة الخصائص البنيوية والإلكترونية والضوئية والطيفية باستخدام المجموعة القاعدية

(6-311++G(2d,p)) ضمن الطريقة الكوانتية B3LYP المعتمدة على نظرية تابعية الكثافة DFT حيث تم:

- ❖ ايجاد البنى الهندسية المستقرة للمركبات المدروسة قبل وبعد التعريض للضوء (الحالة المثارة الأحادية والحالة المثارة الثلاثية) حيث لوحظ حدوث تغيير بسيط في أطوال الروابط والزوايا.
- ❖ حساب بعض الخصائص الإلكترونية للمركبين (طاقة الارتباط، عرض فجوة الطاقة، وعزم ثنائي الأقطاب) حيث تبين ازدياد النشاط الكيميائي لهذه المركبات بعد تعريضها للضوء.
- ❖ حساب بعض الخصائص الضوئية (طاقات الامتصاص وطاقات التنشيط والإصدار بالفلورة والإصدار بالفسفرة والمردود الكوانتي والعبور بين الأنظمة إضافةً إلى مردودي كل من الفلورة والفسفرة)
- ❖ تحديد الحساسية الضوئية للمركبين من خلال إيجاد الحد الأعظمي لطول موجة الضوء الذي تمتصه هذه الجزيئات.
- ❖ توصيف مخطط جابلونسكي للمركبين.
- ❖ إيجاد أطياف الأشعة المرئية وفوق البنفسجية (UV-Vis)وأطياف الأشعة تحت الحمراء (IR) لهذه المركبات كوانتياً وتجريبياً، حيث لوحظ توافق جيد بين القيم الكوانتية والتجريبية.

المراجع

1- Hossain MS, Zakaria C, Kudrat-E-Zahan M, Zaman B. **Synthesis, Spectral and Thermal Characterization of Cu (II) Complexes with Two New Schiff Base Ligand towards.** Potential Biological Application**. 2017**;8(3):380-392
2- Frisch M. J. , et.al : **GAUSSIAN 09, Revision A.02** Gaussian, Inc., Wallingford CT, (**2009**).
3- Frisch M. J. , et.al : **GAUSSIAN 09, Revision D.01**Gaussian, Inc., Wallingford CT, (**2013**).

4- Roy D. Dennington II, Todd A. Keith and John M. Millam, **GaussView 5.0.8,** Semichem, Inc**.(2000-2008)**
5- Roy D. Dennington II, Todd A. Keith and John M. Millam, GaussView 6.0.16, Semichem, Inc. (2000-2016)
6- Simonovich S., Physical Organic Photochemistry and Basic Photochemical Transformations, Journal of Organic Chemistry, (2011).
7- Alessandrini, A., & Piraccini, B. M. (2016). Essential of hair care cosmetics. Cosmetics, 3(4), 34.

دراسة مخبرية لتركيب وخواص سوائل الحفر النانوية المستخدمة في حفر الطبقات المنتجة للنفط

د.م. مصطفى المصري – قسم الهندسة البترولية – كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – جامعة حمص

الملخص:

إن أفضل طريقة لتقليل تخريب المنطقة المجاورة للبئر المخترقة للمكمن، الناتجة عن دخول الطور الصلب وفاقد الرشح، هي تشكيل قشرة طينية (كعكة حفر) رقيقة ومتينة، ذات نفاذية منخفضة. حيث أن تلوث المكمن يقلل من إنتاجية البئر ويقلل من معدل الاختراق بشكل كبير.

تم تحضير سائل حفر نانوي باستخدام البنتونايت النانوي (NB)، فكانت خواصه الريولوجية سيئة. تم تحسين هذه الخواص الريولوجية بمعالجته بكميات مختلفة من الإضافات الكيميائية (PAC, Starch, Xanthan Gum)، كما كانت خواصه الارتشاحية جيدة ومحققة لمتطلبات (API)، لكن كان فاقد الرشح معكر (يحتوي على جزيئات نانوية) تسبب تلوث المنطقة المجاورة للبئر. لدى خلط البنتونايت النانوي والبنتونايت التقليدي وتحضير سائل حفر بتركيب (75% Bent + 25% NB)، تم الحصول على فاقد رشح نظيف (غير معكر)، ولدى معالجة هذا السائل بكميات مختلفة من الإضافات الكيميائية الآنفة الذكر، تم تحسين جميع الخواص الجريانية والارتشاحية والحصول على قشرة طينية (كعكة حفر) رقيقة جداً ومتماسكة. وكان أفضل سائل نانوي حصلنا عليه مكون من (75% Bent + 25% NB + 1 g PAC) وهو يكافئ التركيب (75% Bent + 25% NB + 3 % PAC).

تبين أن سوائل الحفر الذكية النانوية، تمتلك القدرة على تكوين كعكة طينية رقيقة وغير نفوذه لمنع تغلغل سوائل الحفر ضمن الطبقة عبر جدران وقاع البئر.

الكلمات المفتاحية:

البنتونايت النانوي، سوائل الحفر الذكية، الطبقة المنتجة، الإضافات الكيميائية لسائل الحفر.

Laboratory study of the composition and properties of nano-drilling fluids used in drilling oil-producing formations

Abstract:

The best way to minimize damage to the reservoir surrounding the wellbore, caused by the intrusion of solid phase and mud loss, is to form a thin, durable, low-permeability mud cake. Reservoir contamination significantly reduces well productivity and the rate of penetration.

A nano-drilling fluid was prepared using nano-bentonite (NB), resulting in poor rheological properties. These properties were improved by treating it with varying amounts of chemical additives (PAC, starch, xanthan gum). Its filtration properties were good and met API requirements, but the filtration mud loss was cloudy (containing nanoparticles), causing contamination of the area surrounding the well. When nano-bentonite and conventional bentonite were mixed to prepare a drilling fluid with a composition of (75% Bentonite + 25% NB), a clean (non-turbid) filtration mud loss was obtained. Treating this fluid with varying amounts of the aforementioned chemical additives improved all flow and filtration properties, resulting in a very thin and cohesive mud cake. The best nano-fluid obtained was composed of (75% Bentonite + 25% NB + 1 g PAC), which is equivalent to the composition (75% Bentonite + 25% NB + 3% PAC).

It turns out that smart, nano-based drilling fluids have the ability to form a thin, impermeable mud cake to prevent drilling fluids from penetrating the formation through the walls and bottom of the well.

Keywords:
Nano-bentonite, smart drilling fluids, production formation, chemical additives for drilling fluid.

1. المقدمة:

يهدف هذا البحث، إلى دراسة مدى قابلية استخدام الغضار النانوي في سائل الحفر ذو الأساس المائي لتقليل تخريب المنطقة المجاورة للبئر أثناء اختراق الطبقات المنتجة.

وتأتي أهمية هذه الدراسة لتركيب سائل الحفر ذو الأساس المائي القائم على تقنية النانو باستخدام الغضار النانوي في تحضيره، ولدراسة تأثير الغضار النانوي على الخواص الريولوجية (الجريانية) لسائل الحفر ومدى تلويثه للطبقة الحاملة، ومقارنته مع أداء سائل الحفر التقليدي.

كما وتخص هذه الدراسة سوائل الحفر المستخدمة لعمليات الحفر التقليدية، حيث تعتبر أنها صلة الوصل بين المكمن النفطي وتصميم برنامج انهاء البئر.

الدراسة تتطلب اجراء تجارب عملية وتقييم سوائل الحفر ويمكن اجراء الاختبارات في مخابر سوائل الحفر التي توفر جميع المعدات اللازمة، وقد يتطلب مراكز أبحاث تقنية النانو لإعداد المواد النانوية وتوصيفها.

ولتحقيق هذا الهدف فإن هذه الدراسة تتضمن عرض لسوائل الحفر (وظائفها وخواصها وأنواعها)، الأجهزة المخبرية المستخدمة في قياس خواص سائل الحفر، تطور تقنية النانو وخصائصه ومن ثم إعداد وتحضير سوائل الحفر النانوية.

2. مبررات البحث:

أثناء عملية الحفر يعتبر مائع الحفر أول مائع غريب يتصل بالمكمن، حيث تسبب الإضافات الصلبة المستخدمة في تحضير سائل الحفر أضراراً شديدة على المكمن وذلك بسبب فاقد الرشح. ينتج عن عملية الحفر فتاتات صغيرة وجزيئات صغيرة الحجم صخرية وأخرى غروية، يمكن أن تلحق الضرر بالمكمن الهيدروكربوني، وبالتالي يجب أن يكون سائل الحفر قادراً على تكوين قشرة طينية جيدة ورقيقة

مثل كعكة الحفر (كعكة طينية خارجية تتكون على جدار البئر وذلك لحماية المنطقة المجاورة في الفراغ الحلقي مقابل المكمن – الطبقة المنتجة).

إن التفاعل بين المواد الصلبة والسوائل مع المكمن قد يؤدي إلى تهدم جدران البئر وانتفاخ الغضار الموجود في مسامات الطبقة الخازنة، وإن انسداد المسامات سيخلق حاجزاً أمام تدفق الهيدروكربونات، وبالتالي سيؤدي إلى تخريب المكمن وستزيد التكلفة الناتجة عن عملية التحريض عند بدء الإنتاج. حيث أن تغلغل راشح سائل الحفر في مسامات الصخر الخازن سيؤدي إلى مشكلة خطيرة، نظراً لأن التفاعل بين المياه وحبيبات الغضار سيؤدي إلى انتفاخها من جهة وتشكل مستحلبات على حدود تماس الراشح المائي مع النفط الموجود في الطبقة، حيث أن سوائل الحفر التقليدية تشكل كعكة حفر سميكة، وبالتالي فهي غير فعالة لإغلاق سطح الصخر ومنع ارتشاح السوائل تحت فارق الضغط بسبب نفوذيتها المرتفعة. يؤدي انتفاخ الغضار إلى اعاقة تدفق الموائع الهيدروكربونية وبالتالي ستنعكس سلباً على عملية الإنتاج. ومن هذه المشاكل الناجمة عن انتفاخ الغضار في الطبقة إغلاق المسامات، ولدى انتفاخ الغضار المشكل لجدران البئر، يسبب استعصاء تشكيلة الحفر الذي قد يسبب فقدان البئر بشكل كامل.

سائل الحفر ذو الأساس النفطي يؤدي إلى مشاكل كثيرة، استخدامه غير اقتصادي وغير صديق للبيئة، وبالتالي سيكون من المفضل استخدام السائل المائي إذا أمكن من اختراق الطبقة المنتجة دون تلويث. وبالتالي فإن استخدام سوائل الحفر التقليدية يؤدي إلى تشكيل كعكة حفر غير فعالة ولا تمنع الارتشاح وتلويث المكمن كما تؤدي إلى عدم استقرار حفرة البئر وغير فعالة من حيث التكلفة بالإضافة للمشاكل البيئية.

3. هدف البحث:

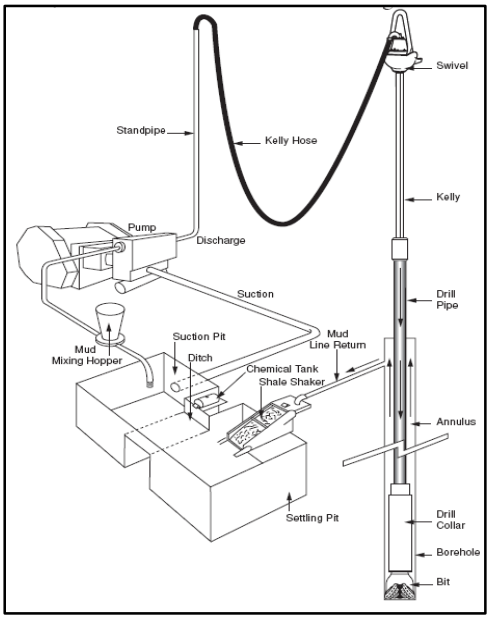
يعد تقليل نفوذية القشرة الطينية المتشكلة (كعكة الحفر)، هو أكثر الطرق فعالية لمنع الاتصال بين الصخور المكونة للطبقة المنتجة وسائل الحفر، لذلك يهدف البحث الى تطوير سائل الحفر الطبيعي ذو الأساس المائي من خلال استخدام مواد نانوية واضافات كيميائية، التي من الممكن أن تساهم في تشكيل سائل حفر عالي الجودة (يشكل كعكة حفر رقيقة وكتيمة) دون المساس بمتطلبات الخصائص الريولوجية للسائل.

4. سوائل الحفر: (وظائفها – خواصها – أنواعها): [1,2,8]

تعتبر سوائل الحفر هي المفتاح الرئيسي لنجاح عملية حفر آبار النفط والغاز، لذلك يجب أن تتناسب نوعية وخواص سائل الحفر مع ظروف الحفر لتحقيق أفضل أداء، لذا فأن التقدم والفعالية في عمليات الحفر يتوقفان إلى حد كبير على استخدام سائل الحفر المناسب الطبقات التي يراد حفرها.

إن سائل الحفر يطلق على أي سائل يستخدم في أعمال الحفر الدوراني ويتم ضخه بواسطة مضخات خاصة به ويجري عبر مجموعة مواسير الحفر حتى قاع البئر. سوائل الحفر تشمل الغازات والزيت والسوائل وتتكون سوائل الحفر العادية من مواد غضارية غروية معلقة في الماء وغالباً ما تكون مادة البنتونايت ويطلق عليها بعض الأحيان طين الحفر. حيث يؤمن سائل الحفر القيام بوظائفه خلال عمليات الحفر: تزييت وتبريد رأس الحفر ومجموعة مواسير الحفر، إزاحة ونقل الفتاتات الصخرية من قاع البئر إلى السطح، حمل الفتاتات الصخرية المحفورة وبقاؤها معلقة خلال توقف دوران سائل الحفر، تشكيل ضغط معاكس لضغط الطبقات الصخرية المشكلة لجدران البئر، تغطية جدار البئر بطبقة غير نفوذه (Mud Cake)، المساعدة في حت الصخور على قاع البئر وتشغيل توربين الحفر في الحفر التوربيني. يتمكن سائل الحفر من القيام بالوظائف المذكورة من خلال ضبط خواصه: الكثافة، اللزوجة، قوة الهلام، فاقد الرشح.

يتم خلط وتحضير السائل في خزانات خاصة تسمى (Mud pit)، ثم تقوم المضخات عبر خط السحب بضخ سائل الحفر من خلال الأنبوب القائم (Stand pipe) والخرطوم المرن (Kelly hose)، إلى منظومة الرأس الهيدروليكي (Swivel) المعلق بالخطاف المتصل مع قلم الحفر(Kelly)، الذي ينقل الحركة الدورانية وسائل الحفر إلى مجموعة مواسير وأعمدة الحفر التي تنتهي برأس الحفر عند قعر البئر. يخرج سائل الحفر من رأس الحفر عبر فالات خاصة، ويبدأ بالعودة إلى السطح، عبر قاع البئر ويصعد إلى الفراغ الحلقي بين مجموعة مواسير الحفر وجدران البئر محملاً بنواتج الحفر، ويخرج من البئر عبر الخط الراجع ماراً عبر شبكة المناخل الهزازة لفصل فتاتات الحفر عن سائل الحفر. بينما السائل النظيف يعود إلى خزانات سائل الحفر.



الشكل (1): معدات دورة سائل الحفر.

1.4. أنواع سوائل الحفر : [1,2,8]

سوائل الحفر الطبيعية (مزيج عادي من الماء العذب والغضار)، تسمى بالسوائل الطبيعية أو العادية، حيث يمكن تحضيرها على السطح من الماء والغضار (بنتونايت) يمكن استخدام بنتونايت صودي بنسبة تتراوح بين (3%–8%)، ويمكن أن تصل الى (30%–40%) في حالة كون البنتونايت ذو مردود منخفض. يمكن معالجة هذه السوائل كيميائياً، حيث أن الهدف من المعالجة هو تحسين خواص السائل الأصلي فقط، خاصة فيما يتعلق بالخواص الجريانية وليس للحصول على سوائل خاصة. يتم تأمين خواص السائل عن طريق مزج (بنتونايت + ماء) ويتم تحسين خواص السائل الأصلي عن طريق إضافة بعض المواد مثل مقللات اللزوجة ومقللات فاقد الرشح وغيرهما من المواد لتي تؤثر على خواص السائل الأصلي. أما سوائل الحفر الممنعة، فهي تختلف عن السوائل المعالجة أنها تعالج مسبقاً (أي قبل استخدامها) بمواد كيميائية تمنع تأثير أي عامل عليها. ومنها السوائل ذات الأساس الكلسي الجيرية والجصية.

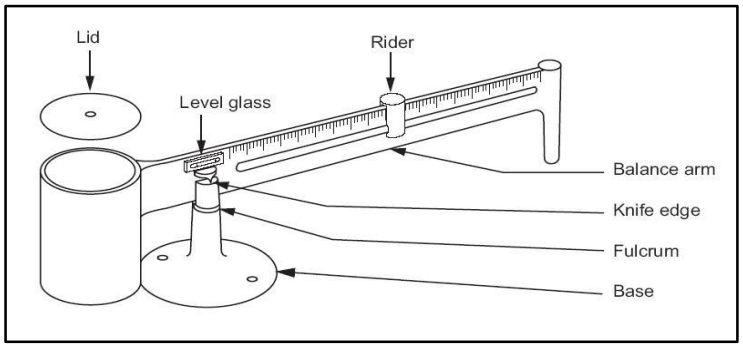
سوائل الحفر ذات الأساس النفطي: يكون الطور الأساسي هو النفط ومن سلبيات هذا النوع: ذات كلفة عالية، صعوبة تخزينها حيث أنها تتميز بدرجة عالية من الخطورة (قابلة للاشتعال). ولها نوعان: مستحلبات عكسية (من نوع ماء في الزيت، وسوائل الحفر النفطية السوداء.

5. الأجهزة المخبرية المستخدمة في قياس خواص سائل الحفر:[1,8]

تتواجد في مخبر سوائل الحفر الأجهزة والمعدات اللازمة لتحضير سوائل الحفر، وقياس خواصها. من أهم الأجهزة المخبرية المستخدمة في قياس خواص سائل الحفر:

1.5. جهاز قياس كثافة سائل الحفر:

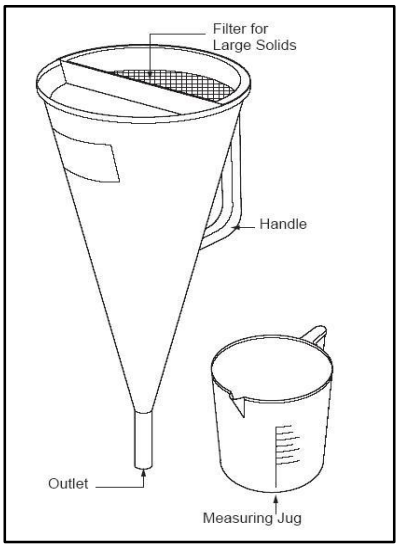
يوضح الشكل رقم (2) جهاز قياس كثافة سائل الحفر، حيث يملأ الكأس بشكل كامل بعينة سائل الحفر، ويوضع الغطاء (Lid) فوق الكأس (يجب أن يخرج بعض سائل الحفر من خلال الثقب الموجود في الغطاء)، بعد ذلك يوضع ذراع الميزان على القاعدة الخاصة به ويتم تعيير القطعة المعدنية (Rider) على الذراع حتى يصبح الذراع متوازن بشكل مستوي، عندئذ يمكن قراءة الكثافة بشكل مباشر على المقياس المدرج من الجهة اليسرى للقطعة المعدنية.



الشكل (2) يبين جهاز قياس كثافة سائل الحفر.

2.5. قمع مارش (Marsh Funnel) لقياس لزوجة سائل الحفر:

يستخدم قمع مارش الموضح في الشكل (3)، ليعطي فقط مؤشر على التغير في اللزوجة. يتم سكب عينة سائل الحفر داخل قمع مارش ويسجل الوقت من أجل عبور ربع جالون (أي ما يقارب 960 mL) من خلال القمع ضمن وعاء القياس المدرج (من أجل الماء وعند درجة حرارة 75 F فإنه يملك لزوجة بواسطة قمع مارش 26 sec).



الشكل (3) يبين جهاز قمع مارش

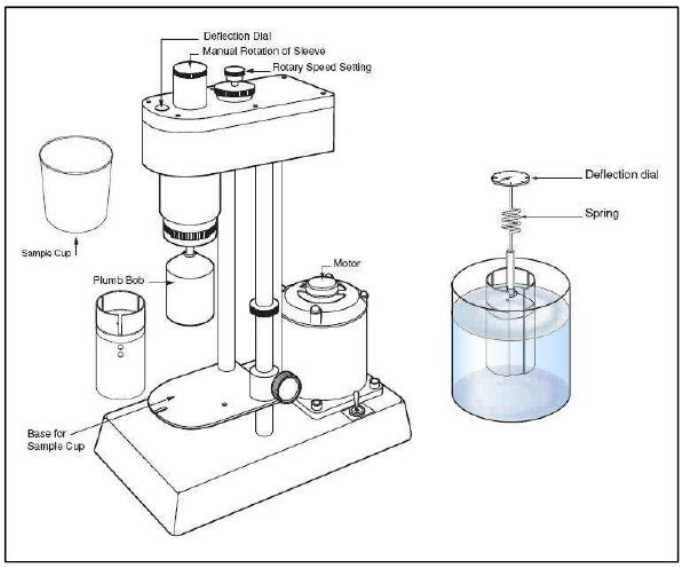
3.5. جهاز فان الدوار: موضح بالشكل رقم (4)، حيث يستخدم هذا الجهاز لتحديد قيمة لزوجة سائل الحفر، ويتم فيه تقييم اللزوجة من خلال قص عينة سائل الحفر عند سلسلة من معدلات الدوران المحددة وقياس إجهاد القص للسائل عند هذه المعدلات المختلفة. العنصر الأساسي في هذا الجهاز هو الثقل الشاقولي (Plumb Bob) المتصل مع النابض (Spring) ومؤشر القياس، واسطوانة يمكن أن تدور عند معدل سرعات دوران مختلفة. الثقل الشاقولي يعلق داخل الاسطوانة والكل يكون مغمور في عينة سائل الحفر، عندما تدور الاسطوانة الخارجية فإن سائل الحفر بين الاسطوانة والثقل الشاقولي سوف يتعرض للقص وعندها يقيس المؤشر قيمة القراءة عند معدل القص.

يجرى الاختبار عند سرعات مختلفة للدوران (3 r.p.m – 300 – 600). يتم وضع السرعة على (600 r.p.m) ويتم الانتظار حتى يستقر المؤشر وتقرأ القيمة على المقياس. يتم تغيير السرعة إلى (300 r.p.m) وتؤخذ القراءة ثانية. وعندها يمكن حساب اللزوجة ونقطة الخضوع بالعلاقات الآتية:

$$\eta_p = \phi_{600} - \phi_{300} \qquad (cp) \qquad (1)$$

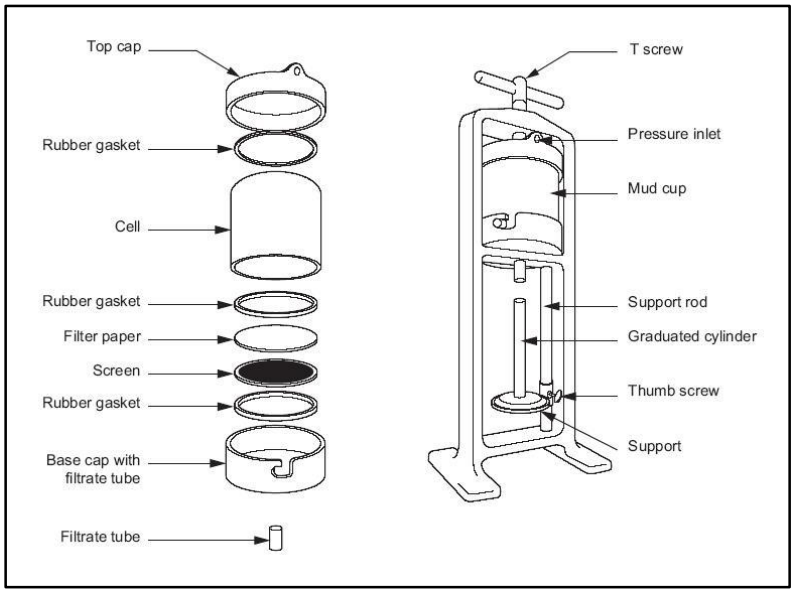
$$\tau_D = (\phi_{300} - \eta_p) * 4.88 \quad \left(\frac{mg_f}{cm^2}\right) \qquad (2)$$

ϕ_n: القراءة على الجهاز عند عدد الدورات (n)



الشكل (4) يبين جهاز قياس اللزوجة (فان الدوار).

4.5. جهاز قياس فاقد الرشح: موضح في الشكل (5).



الشكل (5) يبين جهاز قياس فاقد الرشح.

يتألف جهاز قياس فاقد الرشح من خلية سائل الحفر وتركيبة الضغط بالإضافة لأداة الترشيح وحسب (API) فإن الاختبار يتم عند درجة حرارة الوسط المحيط وضغط (100 psi). حيث يتم إغلاق الخلية من الأسفل بواسطة غطاء يكون مناسباً لوضع شبكة (Screen)، ثم يوضع على الشبكة ورقة الترشيح (Filter paper) والتي تكون مثبتة بواسطة مانعة تسرب، يتم وضع اسطوانة مدرجة أسفل الشبكة لتجميع الراشح، يطبق ضغط (100 psi) لمدة (30 min) وعندئذ يمكن قياس حجم الراشح بـ (cm^3) وبعد تفريغ الضغط في الخلية نقيس سماكة كعكة الراشح المترسبة على ورقة الترشيح.

6. تطور تقنية النانو وخصائصه:[9,10,11,13,16,19]

في السنوات القليلة الماضية، هناك كلمة صغيرة مع إمكانيات كبيرة. هذه الكلمة هي النانو (Nano) وأدت إلى تحول كبير في كل الجوانب الحياتية من العلوم والهندسة والاقتصاد والعلاقات الدولية. انتقل النانو من عالم المستقبل إلى عالم الحاضر، حيث دخلت الإبداعات المتعلقة بتقنية النانو في الصناعة النفطية.

النانو هو عبارة عن وحدة قياس صغيرة جداً يساوي واحد من مليون من الميلمتر $[1nm = 10^{-9}m]$ أي انه تستحيل رؤيته بالعين المجردة أو بعض المكبرات البسيطة ويستخدم النانو في القياسات الذرية من أجل تحديد أحجام جزيئات المادة فيها، بناء على ذلك يمكن تعريف تقنية النانو على انها العلم الذي يدرس إمكانية تغيير المادة على مستوى النانو وذلك لإنتاج مواد جديدة. إن أصل كلمة (النانو) مشتق من الكلمة الإغريقية (نانوس) وهي كلمة إغريقية تعني القزم ويقصد بها كل ما هو صغير وتقنية النانو تعني تقنية المواد متناهية الصغر أو التكنولوجيا المجهرية الدقيقة. وعلم النانو هو دراسة المبادئ الأساسية للجزيئات والمركبات التي لا يتجاوز قياسها ال 100 نانومتر.

تم تطبيق تقنية النانو في عدة مجالات في الصناعات النفطية ومنها: تم استخدام الروبوتات النانوية التي تعتمد على تقنية النانو الخاصة بالمكامن، كما أصبحت الجسيمات النانوية أكثر شيوعا للاستخدام في تطوير موائع الحفر، وخصوصاً موائع الحفر التي أساسها الماء، وبسبب خواصها الكيميائية والميكانيكية والكهربائية والحرارية والهيدروديناميكية المختلفة تماما والمحسنة بدرجة كبيرة والتفاعل الفعال للمواد النانومترية، فإن الجسيمات النانوية ينظر إليها على أنها مادة مشجعة للاختيار للحصول على تطوير لموائع الحفر، التي يعول عليها للتطبيقات في حقول النفط والغاز.

7. القسم العملي:(الدراسة المخبرية):

1.7. سوائل الحفر النانوية: [6,7,17,20]، يحتوي سائل الحفر النانوي على مادة مضافة على الأقل بحجم جسيم في مجموعة من 1 إلى 100 نانومتر حيث أن الجسيمات النانوية أبعادها من رتبة 10^{-9} من المتر. يمكن تصنيف سوائل الحفر النانوية (وذلك حسب عدد الإضافات النانوية في السائل): إلى سوائل نانوية بسيطة (تحتوي مادة مضافة جزيئية واحدة بحجم نانوي) وسوائل نانوية مركبة (تحتوي على أكثر من مادة بحجم النانو).

يعد تثبيت جزيئات النانو في سائل الحفر أمراً ضرورياً أثناء تحضير السوائل وذلك من أجل إعداد سائل حفر متجانس ومستقر يحتوي مواد نانوية، حيث تؤدي القوى السطحية العالية لجزيئات النانو إلى التلبد السريع للجزيئات المشتتة ميكانيكياً عندما يتوقف التحريض الميكانيكي، مما يؤدي إلى تكتل الجزيئات.

سوف تتسبب قوة الجاذبية في ترسيب الجسيمات بمجرد توقف سائل الحفر عن الدوران، لذلك هناك حاجة إلى تعزيز خصائص لزوجة السائل من أجل إنشاء حواجز حول جزيئات النانو ومنع التكتل.

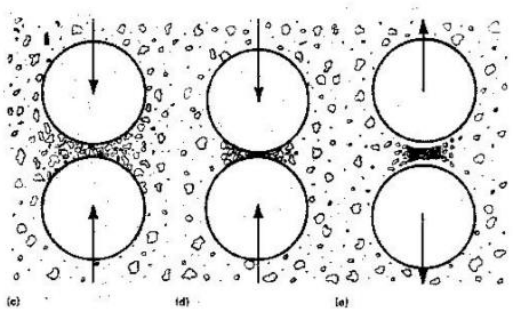
المواد الكيميائية والبوليميرات قادرة على توفير الاستقرار على المدى الطويل للسوائل ذات الأساس النانوي، ولكنها غير اقتصادية لذلك كان تحديد مادة مضافة إلى السائل ذات اقتصادية وصديقة للبيئة جزء ضروري في تحضير السائل. يعد الاستقرار طويل المدى للسوائل النانوي مهماً حتى تتمكن من الحفاظ على الخواص الريولوجية لإنجاز مهامها الوظيفية أثناء الحفر. وبالتالي فإن سائل الحفر العادي ذو الأساس المائي غير قادر على تكوين كعكة طينية فعالة وغير قادرة على حماية المكمن النفطي من التخريب والمتضمنة فقدان كمية كبيرة من سائل الحفر المرتشح من خلال جدران البئر نتيجةً تشكيل كعكة حفر غير قادرة على تلييس جدران البئر بفعالية تامة.

2.7. منهجية العمل المخبري:

يتضمن البحث بشكل رئيسي التجارب المخبرية على سائل الحفر وفق التالي:

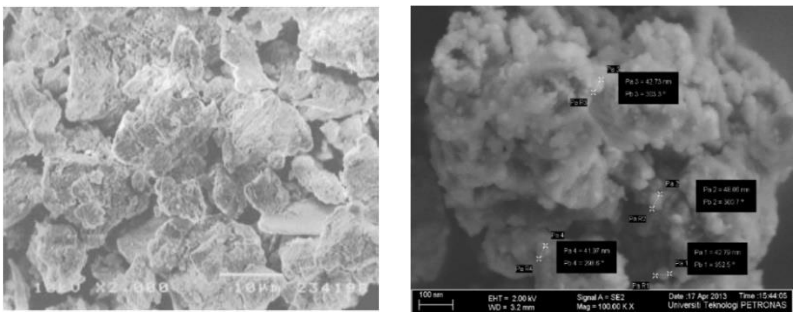
- تحضير الجسيمات النانوية وتوصيفها.
- تشخيص سائل الحفر:
  - قياس الخواص الريولوجية لسائل الحفر المحضر.
  - قياس فاقد راشح سائل الحفر وقدرة تشكيل كعكة الحفر.
- اختبار تلويث الطبقة المنتجة.

تحضير الجسيمات النانوية وتوصيفها: تستخدم معدات لتحضير البنتونايت النانوي بجزيئات ذات أبعاد تبلغ من 1−100 نانو متر. يمثل الطحن بالكرات احدى الطرق الميكانيكية لإنتاج الجسيمات النانوية. تستخدم المطحنة ذات الكرات، لتقليل حجم الجسيمات إلى مقياس النانو، حيث يعتمد المبدأ الأساسي في أجهزة الطحن بالكرات على الطاقة المنقولة للعينة أثناء وجودها ضمن وسيط الطحن. ويعتمد على الاصطدام بين كرات الطحن بسحق العينة بينهما مما يقلل من حجمها كما في الشكل (6).



الشكل (6): المبدأ الأساسي للطحن بالكرات.

يتم استخدام اعدادات الطحن التالية لإنتاج عينات البنتونايت النانوية لاستخدامها في تحضير سوائل الحفر وتقييمها: توضع كمية (30 غرام) من البنتونايت في حوجلة المطحنة (التي تحتوي 100 مل ايزو بروبانول كوسيط طحن)، كما تحتوي كرات من الزريكون (ذات قطر 10 مم ووزن 300 غرام). حيث زمن الطحن (24 ساعة، توقف 15 دقيقة كل ساعة) بسرعة $(400\ rpm)$، يتم استرداد العينة المطحونة وكرات الطحن، ثم يتم تسخين عينة البنتونايت في الفرن (100 ℃) لمدة 18 ساعة لإزالة الشوائب المتبقية من وسيط الطحن. ثم يتم تصوير العينة باستخدام المجهر الإلكتروني FESEM لتحديد حجم الجسيمات النهائية من المنتج. [9,10,13,14]



الشكل (7): بنية البنتونايت (تحت المجهر الالكتروني) قبل الطحن (يسار) وبعد الطحن (يمين).



الشكل (8): بنية البنتونايت قبل الطحن (يمين) وبعد الطحن (يسار).

وبسبب عدم توفر المطحنة ذات الكرات والمجهر الالكتروني في مخبر سوائل الحفر، تم استخدام عينات بنتونايت نانوي محضرة في مخابر هيئة الطاقة الذرية.

تشخيص سائل الحفر: يتضمن:

- قياس الخواص الريولوجية لسائل الحفر باستخدام مقياس اللزوجة (فان الدوار)، من أجل حساب اللزوجة البلاستيكية، نقطة الخضوع وقوة الهلام.
- قياس فاقد راشح سائل الحفر وسماكة كعكة الحفر.

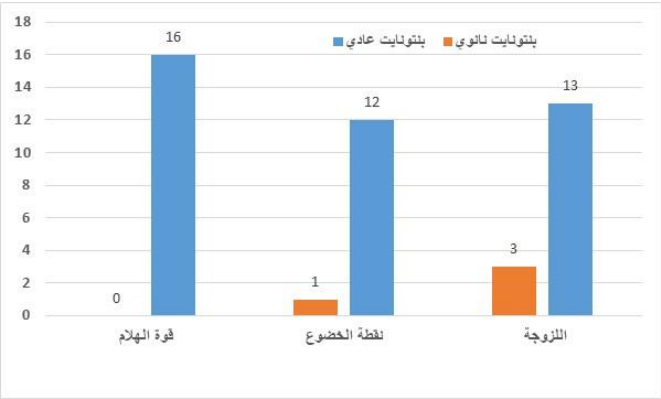
اختبار تلويث الطبقة المنتجة: تستخدم تجربة فاقد راشح سائل الحفر كمحاكاة عملية الحفر واستخدام سوائل الحفر في ظروف قاع البئر.

2.7. تحضير سائل الحفر النانوي:

تم تحضير سائل حفر تقليدي (المكونات 35غرام بنتونيت (Bent) و350 مل ماء مقطر)، وسائل حفر نانوي (المكونات 35غرام بنتونيت نانوي (NB) و350 مل ماء مقطر). كانت النتائج كما هو موضح بالجدول (1) والشكل (9).

الجدول (1): الخواص الريولوجية لسائل الحفر

قراءة الجهاز – الخواص الريولوجية	بنتونايت (Bent)	بنتونايت نانوي (NB)
600 RPM	38	7
300 RPM	25	4
اللزوجة البلاستيكة (CP)	13	3
نقطة الخضوع (Lb_f/ft^2)	12	1
قوة الهلام (10 sec)	12	0
قوة الهلام (10 min)	16	0



الشكل (9): مقارنة الخواص الريولوجية لسائل الحفر بالبنتونايت العادي والنانوي.

يقارن الشكل (9) الخواص الريولوجية (اللزوجة البلاستيكية ونقطة الخضوع وقوة الهلام) لسائل الحفر النانوي مقابل سائل الحفر التقليدي. أظهرت التركيبة الأولية لسائل الحفر باستخدام البنتونايت النانوي وحده (دون أي إضافات) خواص ريولوجية منخفضة. يمكن تفسير ذلك بالتغيرات الهيكلية للمونتموريلونيت الموجود في البنتونايت الناجم عن التشوه الميكانيكي عن طريق الطحن بالكرات بطاقة عالية، عملية الطحن الميكانيكية تتسبب في تقليل حجم الحبيبات وتغيير التشكيل في جزيئات البنتونايت ايضاً، حيث تحولت من جسيمات صفائحية ذات بلورات سداسية من المونتوريلونيت الى تجمع من الجسيمات المستديرة تقريباً وبأحجام في نطاق النانو متر، وقد أدى ذلك الى تغيير خصائص التهلم في البنتونايت وبالتالي انخفاض الأداء الريولوجي.

بعد ترك سائل الحفر لمدة 24 ساعة، حدث اندماج لمكونات سائل الحفر وتراكمت في القاع. ويعود ذلك إلى التكتل السهل والسريع للجزيئات النانوية، حيث تؤدي القوى المتولدة على سطحها إلى الاندماج السريع لهذه الجزيئات المشتتة ميكانيكاً بمجرد إيقاف الخلط. القوى السطحية تولد كتل متجمعة، متبوعة بقوى الجاذبية التي تؤدي إلى ترسيب مكونات سائل الحفر. كما يظهر بالشكل التالي.



الشكل (10): سائل الحفر النانوي الأولي (يسار)، وبعد 24 ساعة من توقف الخلط (يمين).

تم إضافة مكونات جديدة لسائل الحفر النانوي لتحسين خواصه الريولوجية، لتطابق مواصفة معهد البترول الأمريكي الخاصة بالبنتونايت (API Specification 13A)، الجدول (2) [4,5]. تم إضافة مواد مختلفة بتراكيز متزايدة حتى تصبح مواصفات سائل الحفر النانوي مطابقة للمواصفة المطلوبة (API Specification 13A). المواد المضافة (البوليمير السيللوزي PAC، وبوليمير Xanthan gum والنشا Starch).

جدول (2): المواصفات الريولوجية لسائل الحفر حسب API

Property	الخاصية	API Specification 13A
Viscometer 600 rpm	600 rpm	30 min
Viscometer 300 rpm	300 rpm	23 min
PV (CP)	اللزوجة البلاستيكية (CP)	7 min

YP (Lb_f/ft^2)	نقطة الخضوع (Lb_f/ft^2)	50 max
YP/PV Ratio	نسبة (YP/PV)	3 max
Filtration (mL/30 min)	فاقد الرشح (mL/30 min)	15 max

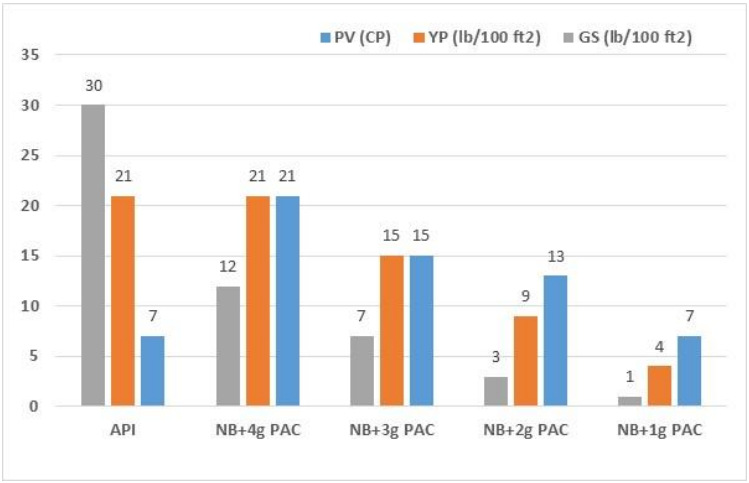
3.7. الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (PAC):

تم تحضير سائل حفر نانوي (35 g NB + 350 mL Water)، واضفنا له السيللوز الصناعي (PAC) بنسب مختلفة، وكانت نتائج القياسات المخبرية وفق الجدول (3).

الجدول (3): الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (PAC).

الخاصية	NB+1g PAC	NB+2g PAC	NB+3g PAC	NB+4g PAC
600 rpm	18	33	45	63
300 rpm	11	21	30	42
PV	7	13	15	21
YP	4	9	15	21
GS 10sec	0	1	2	5
GS 10min	1	3	7	12

يوضح الجدول (3) الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام البنتونايت النانوي وتراكيز مختلفة من ال (PAC). كما نلاحظ من الشكل (11) أنه كلما كان تركيز ال (PAC) أكبر اقتربت خواص سائل الحفر النانوي من مواصفات (API)، حيث يعمل ال (PAC) كرافع لزوجة ومقلل فاقد رشح ويمنع اندماج الجزيئات النانوية. إضافة ال (PAC) لوحده غير كافية حيث تبقى قوة الهلام منخفضة كثيراً، وبالتالي يجب إضافة إضافات أخرى لسائل الحفر لتعديل خواصه وجعلها مطابقة لمواصفات ال API.



الشكل (11): الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (PAC).

لاحظنا مخبرياً تمثل الكمية (4 g) الحد الأقصى لمقدار ال (PAC) الذي يمكن إضافته إلى سائل الحفر النانوي، لأن مكونات سائل الحفر تبدأ بالتكتل بمجرد تجاوز التركيز (4 غرام). عند تركيز ال (PAC) أقل من (5 غرام) يبقى سائل الحفر مستقر ولم يلاحظ أي اندماج لمكوناته بعد ترك سائل الحفر سكاناً لمدة 24 ساعة.



الشكل (12): سائل الحفر النانوي بعد الخلط (يسار)، وبعد 24 ساعة (يمين) بقي السائل ثابت.

4.7. الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (Starch):

تم تحضير سائل حفر نانوي (35 g NB + 350 mL Water)، واضفنا له النشا (Starch) بنسب مختلفة، وكانت نتائج القياسات المخبرية وفق الجدول (4).

الجدول (4): الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (Starch)

الخاصية	NB + 1 g Starch	NB + 2 g Starch	NB + 3 g Starch
600 rpm	19	22	25
300 rpm	12	14	16
PV	7	8	9
YP	5	6	7
GS 10sec	2	3	5
GS 10min	20	25	29

من الجدول (4)، نلاحظ أن ال (Starch) له تأثير أقل على الخواص الريولوجية لسائل الحفر مقارنةً ب ال (PAC)، لكنه يحسن قوة الهلام أكثر من ال (PAC). بقي سائل الحفر مستقراً أيضاً بعد الخلط، ولم يلاحظ عليه أي اندماج على غرار ال (PAC). يجب استخدام إضافات أخرى لتحسين خواص سائل الحفر الريولوجية.

5.7. الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (Xanthan gum):

تم تحضير سائل حفر نانوي (35 g NB + 350 mL Water)، واضفنا له (Xanthan Gum) بنسب مختلفة، وكانت نتائج القياسات المخبرية وفق الجدول (5).

يعمل ال (Xanthan gum) كرافع لزوجة لسائل الحفر مما يحسن الخواص الريولوجية وقوة الهلام بشكل فعال. ومع ذلك بدأت مكونات سائل الحفر النانوي بالاندماج عندما وصل تركيز ال (Xanthan gum) إلى (2 غ).

الجدول (5): الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي باستخدام ال (Xanthan gum)

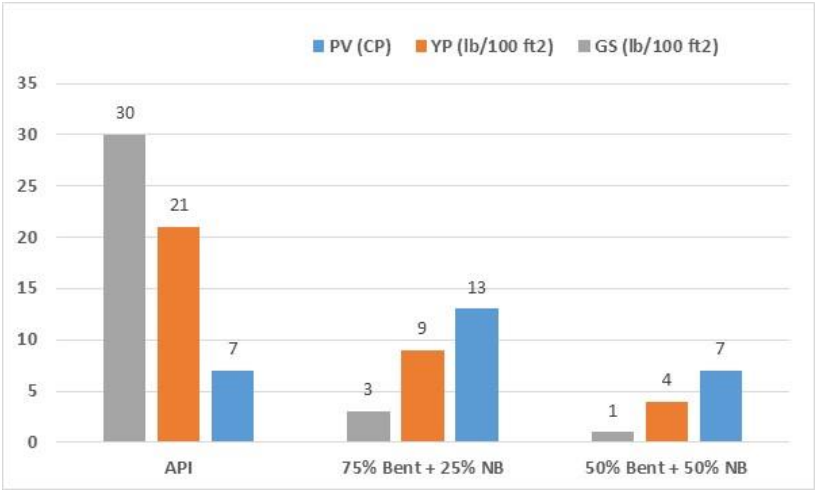
الخاصية	NB + 1 g Xanthan
600 rpm	22
300 rpm	16
PV	6
YP	10
GS 10sec	5
GS 10min	25

6.7. الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونايت نانوي مع إضافات كيميائية أخرى:
تم اضافة بنتونايت نانوي بتراكيز مختلفة لسائل الحفر التقليدي (WBM) (المكونات 35غرام بنتونيت و350 مل ماء مقطر)، وتم قياس قيم خواصه الريولوجية.

الجدول (6): الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونايت نانوي.

الخاصية	50% Bent + 50% NB	75% Bent + 25% NB
600 rpm	22	31
300 rpm	15	23
PV	7	8
YP	8	12
GS 10sec	1	5
GS 10min	5	18

نلاحظ من الجدول (6) والشكل (13)، أن وجود البنتونايت والبنتونايت النانوي غير كافي لتحقيق المواصفات الريولوجية المطلوبة حسب ال (API)، لذلك يجب إضافة مواد أخرى إلى سائل الحفر لتحسين خواصه الريولوجية.



الشكل (13): الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونايت نانوي مقارنة مع ال (API).

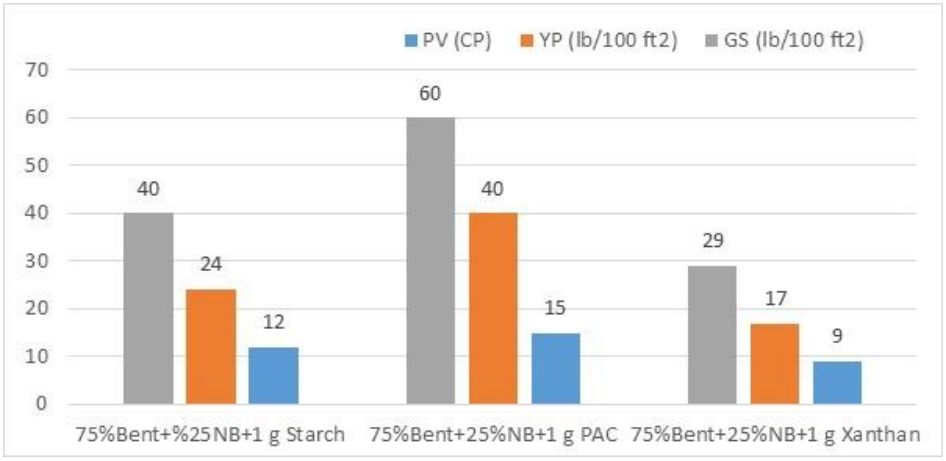
تم اضافة عدة مواد بتراكيز مختلفة لسائل الحفر التقليدي (WBM) (بوجود البنتونايت النانوي)، وتم قياس قيم خواصه الريولوجية.

الجدول (7): الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونيت نانوي مع إضافات أخرى

الخاصية	75% Bent + 25% NB + 1 g Xanthan	75% Bent + 25% NB + 1 g PAC	75% Bent + 25% NB + 1 g Starch
600 rpm	35	70	48

300 rpm	26	55	36
PV	9	15	12
YP	17	40	24
GS 10sec	11	30	15
GS 10min	29	60	40

من التراكيب المدروسة في الجدول (7) والموضحة بالشكل (14)، نلاحظ أن الخواص الريولوجية لسائل الحفر تحسنت حتى يتمكن من القيام بوظائفه أثناء عمليات الحفر وأفضلها للسائل الذي يحتوي (PAC) مع البنتونيت والبنتونيت النانوي، وسنقوم بدراسة خواصها الارتشاحية.



الشكل (14): مقارنة الخواص الريولوجية لسائل الحفر التقليدي بإضافة بنتونيت نانوي مع إضافات أخرى.

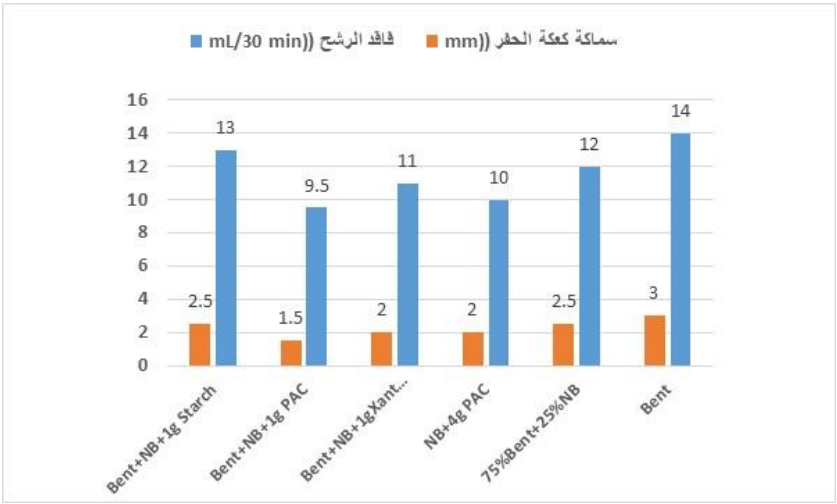
7.7. اختبار فاقد الرشح عند ضغط منخفض ودرجة حرارة منخفضة (LPLT):

تم قياس حجم فاقد الرشح لسائل الحفر التقليدي (WBM)، ولسوائل الحفر النانوية (ذات التراكيب المدروسة وفق التجارب المخبرية)، والتي تحقق المواصفات الريولوجية حسب (API). حيث تم تلخيص النتائج في الجدول (8).

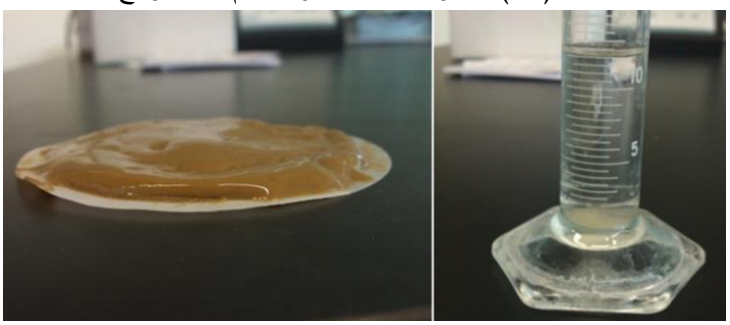
الجدول (8): ملخص اختبارات الارتشاح لسوائل الحفر النانوية

تركيب سائل الحفر	فاقد الرشح (mL/30 min)	معدل انخفاض حجم فاقد الرشح	سماكة كعكة الحفر (mm)
Bent	14	---	3
75% Bent + 25% NB	12	14 %	2.5
NB+4g PAC	10	28 %	2
75% Bent + 25% NB + 1 g Xanthan	11	21 %	2
75% Bent + 25% NB + 1 g PAC	9.5	32 %	1.5
75% Bent + 25% NB + 1 g Starch	13	7 %	2.5

سائل الحفر التقليدي (Bent) يعتبر نموذج مقارنة من أجل الخواص الارتشاحية. من أجل هذا السائل، حجم فاقد الرشح (14 mL) مع قشرة طينية بسماكة (3 mm)، كما موضح بالشكل (15) والشكل (16).



الشكل (15): مقارنة كعكة الحفر وحجم فاقد الرشح.



الشكل (16): القشرة الطينية (كعكة الحفر) وفاقد الرشح لسائل الحفر التقليدي.

أظهرت اختبارات الارتشاح، ان بعض سوائل الحفر النانوية لها المقدرة على تخفيض فاقد الرشح بمقدار يصل حتى (32 %) في حالة سائل الحفر ذو التركيب (75% Bent +25% NB +1 g PAC) حيث (1 g PAC) تكافئ تركيز (3 %). كما تبين من خلال هذه التجارب، أن سماكة كعكة الحفر الناتجة عن الارتشاح (فيما يخص السوائل النانوية مقارنة بالسوائل التقليدية)، تكون بسماكة أقل في حالة السوائل النانوية بمقدار من (1 mm) الى (1.5 mm). كما نستنتج ان سوائل الحفر النانوية المكونة من البنتونايت النانوي مع بعض الإضافات (NB+4g PAC)، تقلل فاقد الرشح الى قيم أدنى من قيمة فاقد رشح سائل الحفر المعياري (مكون من بنتونايت فقط) بمقدار 28%. لكن كان فاقد الرشح غير نظيف وبالتالي فإن حبيبات البنتونايت النانوية ذات الحجم الصغير جداً استطاعت العبور من

خلال فتحات ورقة الترشيح وهذا يتوافق مع ما تم التوصل اليه في الدراسات المرجعية [3,14,15]. يمكن ملاحظة تلوث الراشح بهذه الحبيبات النانوية وعكارته من خلال الشكل التالي:



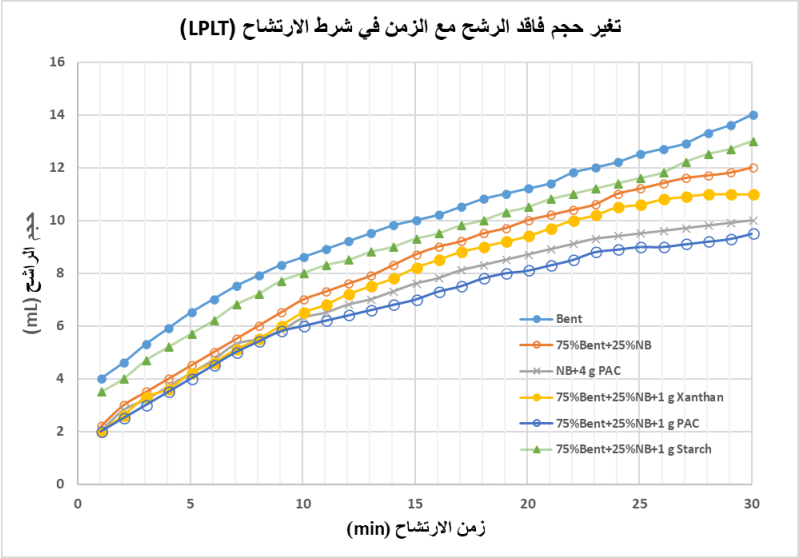
الشكل (17): كعكة الحفر رقيقةً (يسار)، فاقد الرشح المعكر (يمين) لسائل الحفر النانوي المكون من (NB+4g PAC).

يمكن تلافي حدوث هذه الظاهرة لسائل الحفر النانوية عند اختراقها للطبقات الغضارية، كون أبعاد الفراغات المسامية من رتبة النانو وبالتالي لا تستطيع الجزيئات النانوية عبورها. حسب نظرية تشكل كعكة الحفر الداخلية [7,17]، فإن حجم الحبيبات التي تشكل الكعكة تكون ذات أبعاد تساوي أو أكبر قليلاً من حجم مسامات الطبقة وهذا يساهم في تشكل كعكة الحفر الفعالة بشكل أسرع وبالتالي يقل حجم فاقد الرشح. في سوائل الحفر المكونة من خليط بنتونيت وبنتونايت نانوي، فاقد الرشح نظيف بدون شوائب.



شكل (18): كعكة حفر رقيقة (يسار) وفاقد رشح نظيف (يمين) لسائل حفر مكون من خليط من البنتونايت العادي والبنتونايت النانوي (75% Bent + 25% NB).

تم رسم نتائج القياسات المخبرية لتجارب الارتشاح حسب المنحنيات البيانية التالية:



الشكل (19): حجم الراشح مع الزمن.

من الشكل (19)، نلاحظ، بشكل عام، انخفاض بمعدل ازدياد حجم الراشح بعد مرور زمن مقداره (10) دقائق. وهذا يفسر بالتشكل الفعال لكعكة الحفر وانخفاض نفوذيتها.

مناقشة النتائج:

من النتائج المخبرية نلاحظ أن سوائل الحفر النانوية، قادرة على تقليل فاقد الرشح وبالتالي يقل تلوث المنطقة المجاورة للبئر أثناء عمليات الحفر، نظراً لأحجام الجسيمات النانوية الصغيرة جداً والتي تكون أصغر بكثير من أحجام مسامات المكمن، فإن سوائل الحفر النانوية قادرة على تقليل غزو السوائل إلى الحد الادنى ومنع مشاكل عدم ثبوتية جدران البئر وخاصةً في الطبقات الغضارية. وهذه النتائج تتوافق مع النتائج في الدراسات المرجعية [12,18] حيث تم استخدام مواد سيليكاتية نانوية واضافات كيميائية أخرى بأبعاد نانوية.

يعد تخفيض فاقد الرشح في سوائل الحفر النانوية امراً مهماً، حيث ان هذا الفاقد هو أحد العوامل الرئيسية التي تسبب تخريب المكمن وتلويث المنطقة المجاورة للبئر. حيث يسبب هذا الفاقد ادخال الحبيبات الصلبة الصغيرة الى الطبقة وبالتالي تشكيل كعكة الحفر الداخلية. في سوائل الحفر النانوية

يقل التأثير المتبادل بين سائل الحفر وجدران البئر في الطبقات الغضارية، ويقل اغلاق مسامات الطبقة الخازنة الناتج عن هدرجة الغضار وانتفاخه. ومع ذلك يتطلب هذا المزيد من الاختبارات باستخدام ورق الترشيح ذو حجم مسامات أصغر.

اثبتت اختبارات الارتشاح التي تم اجراؤها ترسيب كعكة الحفر رقيقة ومتماسكة، على ورق الترشيح بواسطة سائل الحفر النانوي مقارنةً بالسائل التقليدي، حيث يلعب سائل الحفر النانوي دوراً مهماً في الحد من المشاكل المتعلقة بكعكة الحفر، كون كعكة الحفر الرقيقة المتماسكة التي ترسبها السوائل النانوية تتمتع بالقدرة على تقليل مشكلة الالتصاق التفاضلي وبالتالي هي مناسبة لاختراق التشكيلات الجيولوجية المعرضة لوجود مشاكل الالتصاق التفاضلي اثناء الحفر.

في تطبيقات حفر الآبار الموجهة والأفقية وذات الامتداد الكبير، تزداد مشاكل عزم الدوران والسحب والتعليق اثناء الحفر الناجم عادةً عن احتكاك تشكيلة الحفر مع جدران البئر. لذلك يلعب سائل الحفر النانوي دوراً مهماً في تقليل المشاكل المتعلقة بعزم الدوران والاستعصاء من خلال تقليل مقاومة الاحتكاك بين المواسير وجدران البئر، نتيجة تشكل كعكة الحفر (قشرة طينية) متماسكة ورقيقة تساعد في تزليق مواسير الحفر وبالتالي منع مشاكل تعليق والتصاق مواسير الحفر.
تم حساب كل من قيمة اللزوجة البلاستيكية ونقطة الخضوع وفق العلاقتين الرياضيتين (1) و (2) المذكورتين في سياق البحث، حيث تم تكرار القياس المخبري ثلاث مرات لكل من القراءات (600 rpm) و (300 rpm).

ثم تم حساب قيمة المتوسط الحسابي (بجمع القيم وتقسيمها على ثلاثة)، ثم تم حساب التباين (S^2) وفق العلاقة:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{n} x_i)^2}{n}}{n-1} \qquad (3)$$

حيث: (n) تمثل عدد مرات القياس، (x_i): قيمة القياس.

أخيراً يحسب الانحراف المعياري بالعلاقة:

$$S = \sqrt{S^2} \qquad (4)$$

تم برمجة هذه الخطوات باستخدام (Microsoft Excel)، والشكل (20) يوضح مثال، حيث القيم المقاسة هي قراءة جهاز فان الدوار عند (600 rpm) في أحد التجارب.

القيم المقاسة	مربع القيم المقاسة	عدد القيم	المتوسط الحسابي
37	1369	3	38
38	1444		
39	1521		
مجموع القيم	مجموع مربع القيم	التباين (s2)	الانحراف المعياري
114	4334	1	1

الشكل (20): واجهة برنامج حساب المتوسط الحسابي والانحراف المعياري للقيم التجريبية.

كما تم اتباع نفس المنهجية لدى قياس حجم فاقد راشح سائل الحفر. بشكل عام كانت قيم الانحراف المعياري في جميع التجارب تتراوح بين الصفر والواحد.

النتائج والمقترحات:

تم في هذا البحث استقصاء تطبيقات الغضار النانوي في سوائل الحفر ذات الأساس المائي، لتقليل تلوث الطبقات المنتجة وتخفيض فاقد الرشح. حيث قمنا باستخدام البنتونايت النانوي مع بعض الإضافات الكيميائية لتحضير سائل الحفر النانوي.

تم اجراء تجارب مخبرية لدراسة تأثير البنتونايت النانوي على الخواص الريولوجية لسائل الحفر النانوي، وعلى تلوث الطبقات المنتجة مقارنة بسائل الحفر التقليدي، من خلال تجربة فاقد الرشح. وهذه النتائج تتوافق مع النتائج المرجعية [15,18].

أثبتت نتائج التجارب المخبرية (خواص ريولوجية، فاقد الرشح) التي تم تنفيذها، مقدرة السائل النانوي على تحضير سوائل حفر ذكية (Smart Drilling Fluids) مناسبة لعمليات الحفر وانهاء الآبار.

نتيجة أبعاد جزيئات الغضار النانوي الدقيقة جداً، يتم تقليل درجة تلوث الطبقات المنتجة المخترقة من خلال نقصان فاقد الرشح وتشكل كعكة حفر (قشرة طينية) رقيقة ومتماسكة.

أظهرت تجارب فاقد الرشح (LPLT)، مقدرة سائل الحفر النانوي على تخفيض فاقد الرشح وتشكل كعكة حفر (قشرة طينية) رقيقة ومتماسكة.

سوائل الحفر النانوية المحضرة من البنتونايت النانوي فقط وبعض الإضافات مثل: (PAC, Xanthan Gum, Starch)، فاقد رشحها منخفض لكنه معكر (يحوي حبيبات بنتونايت نانوي).

لدى استخدام البنتونايت النانوي كإضافة للبنتونايت التقليدي في سوائل الحفر ذات الأساس المائي مثل (75% B + 25% NB + 3 % PAC)، تم الحصول على كعكة حفر رقيقة ومتماسكة وفاقد رشح قليل وغير معكر، وبالتالي يمكن استخدام هذا السائل لدى اختراق الطبقات الخازنة لتقليل تلوثها بفاقد راشح سائل الحفر.

نقترح اجراء تجارب مخبرية لقياس فاقد الرشح لسوائل الحفر النانوية (مكونة من بنتونايت نانوي وبنتونايت تقليدي وبعض الإضافات الكيميائية) في الشروط الطبقية (HPHT).

المراجع العلمية:

1. د. مرهج، أحمد – سوائل الحفر – كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – منشورات جامعة حمص، 2008.

2. د. نصور، طاهر و د. مسرور، سليمان – هندسة الحفر3 – كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – منشورات جامعة حمص، 2009.

3. AS. Ali et MM Elhusseiny. A Comparative Evaluation of Nanoparticle-Based Drilling Fluids for HPHT Wells: A Meta-Analytical Approach. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition - onepetro.org. 2025.

4. Amanullah, M., Al-Arfaj, M.K., and Al-Abdullatif, Z. Preliminary Test Results of Nano-based Drilling Fluids for Oil and Gas Field Application. SPE/IADC, 2011.

5. Amanullah, M. and Al-Tahini, A.M. Nano-Technology- Its Significance in Smart Fluid Development for Oil and Gas Field Application. SPE, 2009.

6. Cai, J., Chenevert, M.E., Sharma, M.M. and Friedheim, J. Decreasing Water Invasion into Atoka Shale Using Nonmodified Silica Nanoparticles. SPE, 2011.

7. Duha D. et al. Development of smart bentonite drilling fluids introducing iron oxide nanoparticles to the reservoirs of Upper Assam. Upstream Oil and Gas Technol, 2021.

8. Hossain, M.E. and Al-Majed, A.A. Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering, John Wiley & Sons and Scrivener Publishing Company, Austin, 2012.

9. Kong, X. L. and Ohadi, M. M. Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry–Overview of the Recent Progress. SPE, 2010.

10. Nabhani, N., Emami, M. and Moghadam, T. A. B. Application of Nanotechnology and Nanomaterials in Oil and Gas Industry. AIP Conference Proceedings, 2011.

11. Riley, M. et al. Wellbore Stability in Unconventional Shale – The Design of a Nano-particle Fluid. SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, 2012.

12. Martin, C. et al. Designing smart drilling fluids using modified silicate improve drilling operation in geothermal wells. Geothermic, 2023.

13. Mohamad, A.I. et al. A review on the effect of nanoparticle in drilling fluid on filtration and formation damage. Journal of petroleum science and engineering, 2022.

14. Mohamad, A.I. et al. The influence of nanoparticle size, concentration, and functionalization on drilling fluid filtration properties. Physicochemical and engineering aspects, 2024.

15. Mohammad, B. et al. Impact of low-molecular-weight poly sodium salt on filtration and rheological parameters of nanoparticles enhanced drilling fluids. J. Vinyl Add Technol, 2022.

16. MN. Yahya et al. Nanoparticles in Drilling Fluid. Exploring the World of Drilling, 2024.

17. O. Johnpaul et al. Programmable nanoparticles for smart drilling mud systems in over-pressured shale formation. SPE Nigeria annual international conference, 2025.

18. U. Abdullatif et al. Smart nano clay to reduce water-based mud filter cake. University Technology PETRONAS, 2022.

19. V. Gokarn et al. Nanoparticles in drilling fluids: A review of Types, Mechanisms, Applications, and Future Prospects. MDPI, 2024.

20. Y. Tian et al. Leveraging a novel Nano composite for enhanced drilling fluid efficiency. Scientific Reports, 2025.

مواصفات الفحم المنشط من عيدان نبات القندريس واستخدامه لإزالة المركبات الفينولية من مياه الصرف الصناعي لمعامل الأدوية

د.م. فاطمة التركي

الملخص

تشكل المركبات الفينولية الموجودة في مياه الصرف الصناعي الخارجة من صناعات مختلفة ولاسيما الصناعات الدوائية خطراً كبيراً ينعكس بشكل سلبي على البيئة بشكل عام وعلى صحة الانسان والكائنات الحية بشكل خاص.

تم في هذا البحث دراسة تصنيع فحم منشط من عيدان نبات القندريس، وتم تحديد خواص الفحم المصنّع ومقارنتها بخواص فحم منشط تجاري تم اعتماده كعينات مرجعية.

بينت النتائج أن رقم اليود الخاص بالفحم المصنّع أكبر من رقم اليود الخاص بالفحم التجاري بنسبة 2.13% ، وكانت كثافة الفحم المصنّع أقل من كثافة الفحم التجاري بنسبة 10.3% ، وكانت نسبة الرماد للفحم المصنّع أقل من نسبة رماد الفحم التجاري بنسبة 19.14%، وتفوق الفحم التجاري على الفحم المصنّع من ناحية تحمله للضغط بنسبة 7.8% . استطاع الفحم المصنّع إزالة الفينولات من مياه صرف أحد معامل الأدوية بنسبة إزالة وصلت إلى 93.7% بينما أزال الفحم المنشط التجاري نسبة 90% من تلك الفينولات وعند نفس الكمية من الفحم المنشط، وبينت الدراسة أيضاً أن الكمية الاقتصادية الأفضل لإزالة الفينولات من المياه المدروسة هي 4 g/500ml من كلا النوعين من الفحم.

في المحصلة وجِد أن الفحم المنشط المصنّع يقترب من خواصه بشكل كبير من الفحم المنشط التجاري مما يجعله بديلاً مستداماً وفعالاً من حيث التكلفة لأنظمة معالجة المياه التقليدية.

الكلمات المفتاحية: ساق نبات القندريس، الفحم المنشط، الفينولات، مياه صرف معامل الأدوية.

Specifications of activated charcoal from Syrian stems and its use to remove phenolic compounds from industrial wastewater in pharmaceutical factories

Dr. Fatima Alturki

Abstract

Phenolic compounds found in industrial wastewater from various industries, particularly the pharmaceutical industry, pose a significant threat, negatively impacting the environment in general and human health and other living organisms in particular.

This research investigated the production of activated carbon from the Thistle Syrian stems. The properties of the manufactured carbon were determined and compared to those of commercially available activated carbon used as a reference sample.

The results showed that the iodine value of the manufactured carbon was 2.13% higher than that of the commercially available carbon. The density of the manufactured carbon was 10.3% lower than that of the commercially available carbon, and the ash content was 19.14% lower. However, the commercially available carbon outperformed the manufactured carbon in terms of compressive strength by 7.8%. Manufactured activated carbon successfully removed phenols from the wastewater of a pharmaceutical plant, achieving a removal rate of 93.7%. Commercially available activated carbon removed 90% of these phenols using the same quantity. The study also indicated that the optimal economical concentration for phenol removal from the tested water was 4 g/500 ml for both types of activated carbon.

In conclusion, the manufactured activated carbon exhibited properties very similar to those of commercially available activated carbon,

making it a sustainable and cost-effective alternative to conventional wastewater treatment systems.

Key Words: Thistle Syrian stems, activated charcoal, phenols, wastewater from pharmaceutical factories.

1.مقدمة:

تُعدّ المياه من أهم الموارد الطبيعية الحيوية لاستمرار الحياة ودعم التنمية الاقتصادية والاجتماعية في مختلف أنحاء العالم. ومع ذلك، يشهد العالم في العقود الأخيرة تزايداً ملحوظاً في الطلب على الموارد المائية نتيجة النمو السكاني المتسارع، والتوسع الحضري، والتطور الصناعي المستمر، إضافةً إلى التأثيرات المتزايدة للتغيرات المناخية التي تؤثر في توافر المياه وتوزيعها الجغرافي. وقد أدى هذا التزايد في الطلب إلى زيادة الضغط على مصادر المياه العذبة المحدودة، مما جعل إدارة الموارد المائية والحفاظ على جودتها من أبرز التحديات البيئية التي تواجه المجتمعات الحديثة.

وفي هذا السياق، يُعدّ تلوث المياه من أخطر المشكلات البيئية التي تهدد استدامة الموارد المائية، إذ تتعرض العديد من المسطحات المائية لمختلف أنواع الملوثات الناتجة عن الأنشطة البشرية، ولا سيما النشاطات الصناعية. وتعتمد العديد من الصناعات على كميات كبيرة من المياه في عمليات الإنتاج المختلفة مثل الغسيل والتبريد والنقل والتفاعلات الكيميائية، مما يؤدي إلى توليد كميات كبيرة من المياه العادمة الصناعية التي تحتوي على مجموعة متنوعة من الملوثات الكيميائية والفيزيائية والعضوية.

تتميز المياه العادمة الصناعية بتركيب معقد نتيجة احتوائها على طيف واسع من الملوثات مثل المعادن الثقيلة، والمركبات العضوية السامة، والمواد الصبغية، والمركبات الفينولية، والمذيبات الكيميائية، إضافة إلى المواد الصلبة العالقة والمركبات التي تسبب ارتفاع الطلب الحيوي والكيميائي على الأكسجين. وفي حال تصريف هذه المياه إلى البيئة دون معالجة مناسبة، فإنها قد تؤدي إلى تدهور نوعية المياه السطحية والجوفية، وإلحاق أضرار بالكائنات الحية المائية، إضافة إلى المخاطر الصحية المحتملة على الإنسان نتيجة تراكم المواد السامة في السلاسل الغذائية.

كما أن العديد من الملوثات الصناعية تتميز بثباتها الكيميائي ومقاومتها لعمليات التحلل الطبيعي، الأمر الذي يؤدي إلى بقائها في البيئة لفترات طويلة ويجعل إزالتها باستخدام تقنيات المعالجة التقليدية أكثر صعوبة. ولذلك أصبحت معالجة المياه العادمة الصناعية ضرورة بيئية ملحّة تهدف إلى الحد من التلوث المائي وتحسين جودة المياه قبل تصريفها إلى البيئة أو إعادة استخدامها في التطبيقات المختلفة.

وقد طُوّرت العديد من التقنيات لمعالجة المياه العادمة الصناعية، وتشمل هذه التقنيات العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تهدف إلى إزالة الملوثات المختلفة وتحسين نوعية المياه. ومن بين هذه التقنيات، تُعدّ عملية الامتزاز باستخدام الفحم المنشط (Activated Carbon) من أكثر الطرق كفاءة وانتشاراً في مجال معالجة المياه، نظراً لما يتميز به الفحم المنشط من مساحة سطحية عالية وبنية مسامية متطورة تمنحه قدرة كبيرة على امتزاز مجموعة واسعة من الملوثات العضوية وغير العضوية.

ويُستخدم الفحم المنشط على نطاق واسع في إزالة العديد من الملوثات مثل المركبات العضوية السامة، والمواد الصبغية، والمركبات الفينولية، وبعض المعادن الثقيلة، إضافة إلى المركبات التي تؤثر في الطعم والرائحة واللون في المياه. وتكمن أهمية هذه التقنية في قدرتها العالية على إزالة الملوثات حتى عند التراكيز المنخفضة، فضلاً عن إمكانية استخدامها في مراحل مختلفة من عمليات المعالجة سواء كمرحلة أساسية أو كمعالجة متقدمة لتحسين جودة المياه.

ومع التزايد المستمر في تعقيد الملوثات الصناعية وارتفاع متطلبات جودة المياه، ازداد الاهتمام في السنوات الأخيرة بتطوير مواد كربونية منشّطة ذات خصائص محسنة، مثل زيادة المساحة السطحية وتحسين البنية المسامية وتعديل الخصائص السطحية للفحم المنشط بهدف تعزيز كفاءته في إزالة الملوثات المختلفة. كما اتجهت العديد من الدراسات الحديثة إلى إنتاج الفحم المنشط من مواد أولية منخفضة التكلفة ومصادر حيوية متجددة، مما يساهم في تقليل التكاليف وتحقيق الاستدامة البيئية في عمليات معالجة المياه.

وانطلاقاً من هذه المعطيات، يكتسب استخدام الفحم المنشط أهمية متزايدة في مجال معالجة المياه العادمة الصناعية باعتباره تقنية فعالة وقابلة للتطبيق في العديد من الأنظمة البيئية والصناعية. ولذلك يركز العديد من الباحثين على دراسة كفاءة الفحم المنشط في إزالة الملوثات المختلفة من المياه العادمة الصناعية، إضافة إلى تطوير تقنيات جديدة تعتمد على الامتزاز لتحسين أداء عمليات المعالجة والمساهمة في حماية الموارد المائية من التلوث.

وبناءً على ما سبق، يتناول هذا البحث دراسة إمكانية تصنيع فحم منشط من عيدان نبات القندريس واستخدامه كمادة مازة لإزالة المركبات الفينولية من مياه الصرف الناتجة عن أحد معامل الأدوية. وتُعدّ المركبات الفينولية من الملوثات العضوية الخطرة التي تنتشر في المياه العادمة الصناعية، ولا سيما في الصناعات الدوائية والكيميائية، نظراً لسميتها العالية وتأثيراتها الضارة على الكائنات الحية والبيئة المائية. ولذلك تناول هذا البحث عملية تحضير فحم منشط من مصدر نباتي متوافر ودراسة كفاءته في امتزاز الفينولات من المياه الملوثة، بما يساهم في تطوير مواد مازة منخفضة التكلفة ويمكن استخدامها في معالجة المياه الصناعية والحد من آثارها البيئية.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في استخدام أحد المصادر الزراعية التي تُعتبر نفايات زراعية في تصنيع فحم منشط يُستخدم في إزالة الفينولات من المياه العادمة لأحد معامل تصنيع الأدوية، وهذا يمثل حلاً مستداماً صديقاً للبيئة، ويوفر بديلاً اقتصادياً للفحم المنشط التجاري الذي غالباً ما يكون مكلفاً. كما أن استخدام الفحم المنشط المشتق من مصادر متجددة في معالجة المياه العادمة الصناعية يساهم بشكل مباشر في تحقيق أهداف التنمية المستدامة.

أهداف البحث:

1- الاستفادة من سيقان نبات القندريس في صناعة فحم منشط بمواصفات جيدة.

2- إعطاء توصيف دقيق للخصائص الفيزيائية والكيميائية للفحم المنشط الناتج.

3- تقييم فعالية الفحم المنشط المُنتج في إزالة الفينولات من المياه العادمة الناتجة عن أحد معامل الأدوية ومقارنتها بفعالية الفحم المنشط التجاري لأداء نفس الغرض.

4- تحديد الظروف المثلى لعملية الامتزاز من حيث كمية الفحم المنشط.

3. الدراسات المرجعية:

شهدت العقود الأخيرة اهتماماً متزايداً بتطوير الفحم المنشط واستخدامه في مجالات معالجة المياه الملوثة بمختلف أنواعها. وقد اتجهت العديد من الدراسات البحثية إلى تحسين خصائص الفحم المنشط بطرق متعددة؛ حيث ركّز بعض الباحثين على تطويره من خلال تحسين تقنيات التنشيط المستخدمة في تحضيره، في حين اتجه آخرون إلى اقتراح مواد أولية عضوية، خاصة المخلفات الزراعية، كمصادر بديلة منخفضة التكلفة لإنتاج الفحم المنشط. كما عمل عدد كبير من الباحثين على دراسة كفاءة أنواع مختلفة من الفحم المنشط في إزالة طيف واسع من الملوثات الموجودة في المياه. وفيما يلي نستعرض بعض الدراسات السابقة التي تناولت استخدام الفحم المنشط في مجال معالجة المياه.

في العام 2009 قام سعيد ورفاقه بإجراء بحث تناولوا فيه استخدام ثلاثة أنواع من الفحم المنشط من أجل إزالة الفينولات الموجودة في كل من مياه الصرف الصحي ومياه الصرف الصناعي، وقد استخدم الباحثون في دراستهم الكربون المنشط المُصنّع مخبرياً من قشور اللوز وقشور الجوز كمواد مازة. وقورنت النتائج بنتائج الكربون المنشط التجاري. بلغت أعلى معدلات إزالة فينول من مياه الصرف الصحي باستخدام الفحم المخبري التجاري وفحم قشر اللوز وفحم قشر الجوز 99.87% و 91.36% و 78.17% على التوالي، ومن مياه الصرف الصناعي بلغت 99.71% و 85.54% و 65.49% على التوالي. [1]

قام برنجيل وزملائه في العام 2009 ببحث عملوا فيه على تصنيع فحم منشط من قشور جوز الهند لاستخدامه في إزالة الفينولات الموجودة في المياه الناتجة عن مصافي تكرير البترول، حيث تم تصنيع الفحم المنشط مخبرياً وتنشيطه باستخدام حمض الفوسفوريك، وتم بعد ذلك اختبار الفحم الجديد

في امتزاز الفينول من مياه المدروسة، وقد أثبت الفحم المدروس بأنه قادر على إزالة الفينولات التي تحتويها مياه الصرف الناتجة عن مصافي البترول. [2]

أجرى دهماني ورفاقه عام 2022 دراسة هدفت إلى استخدام الفحم المنشط المحضّر من خشب البلوط لإزالة الفينول من مياه الصرف الصحي. حيث تم تحضير الفحم أولاً من خشب البلوط، ثم تنشيطه كيميائياً باستخدام حمض الفوسفوريك. وأظهرت النتائج تفوق الفحم المنشط المحضّر في هذه الدراسة على الفحم المنشط التجاري من حيث كفاءة إزالة الفينول، إذ بلغت نسبة إزالة الفينول باستخدام فحم البلوط المنشط 98.77% ، في حين بلغت نسبة الإزالة باستخدام الفحم التجاري حوالي 91.48%. [3]

أما من ناحية استثمار سيقان نبات القندريس، فقد تم اجراء العديد من الأبحاث في هذا المجال نذكر منها البحث الذي أجراه قرمو ورفاقه في العام 2016 والذي قام فيه باستخدام سيقان نبات القندريس في تصنيع ألواح عزل حراري، لما تمتلكه هذه المادة من مواصفات وتركيبة كربونية. [4]

4. طرائق البحث:

1.4.المواد والأجهزة المستخدمة:

المواد الأولية:

1- سيقان نبات القندريس: نبتة القندريس هي نبتة سورية بامتياز، موطنها المشرق العربي وحوض البحر الأبيض المتوسط، وهي نبتة برية شوكية، لها زهرة شوكية وساق تنبت على ارتفاع جيد. يعتبر نبات القندريس نبتة ضارة، يتم التخلص منها إما بالحرق أو بإزالتها باقتلاعها من الأرض. حيث أنها تنتشر محلياً بمساحات واسعة جداً، وخاصةً في الأراضي المهملة، وإن عملية جمعها سهلة جداً، لذلك فإن استثمارها لأي غرض مفيد يعتبر أمراً ناجعاً في حال أثبت نجاحه. في الصيف تجف هذه النبتة ويصبح لونها أصفر، وتصبح سيقانها على شكل عيدان جافة، خفيفة الوزن، قصفة وقاسية، وذات كثافة منخفضة. يعتبر جمع عيدان القندريس وإجراء أبحاث عليها وتصنيع فحم منشط منها أمراً مغرياً في حال أثبت نجاحه. [5]



الشكل (1) يبين نبات القندريس وهو في حالتيه الخضراء والجافة.

2- حمض الفوسفوريك (H_3PO_4): بتركيز 85% كعامل تنشيط كيميائي.

3- حمض كلور الماء (HCl): لضبط درجة الحموضة والغسيل.

4- نشاء الذرة: بنسبة وزنية تبلغ 10% من وزن الفحم، كعامل ربط لتشكيل الحبيبات الفحم.

5- مياه صرف صناعي ناتجة عن معامل الأدوية: تم جمع عينات من مياه صرف أحد معامل الأدوية.

6- ماء مقطر: لأغراض الغسيل والتحضير.

7- غاز النيتروجين: عالي النقاء، لتوفير جو خامل أثناء الكربنة والتنشيط.

الأجهزة المستخدمة:

1- فرن كهربائي مزود بمدخل ضخ غاز نيتروجين: من أجل استخدامه في عملية كربنة عيدان نبات القندريس، ويمكن التحكم في درجات حرارة الكربنة والتنشيط (حتى 800 C°).

2- مجفف مزود بمروحة: لتجفيف عيدان القندريس وتجفيف الفحم في مراحل تصنيعه المختلفة.

3- مطحنة: لطحن الفحم بعد كربنة عيدان القندريس.

4- ميزان رقمي دقيق: لقياس وزن كميات المواد.

5- جهاز قياس درجة الحموضة (pH meter): لتحديد وضبط درجة الحموضة.

6- خلية ترشيح: لفصل الفحم عن السائل بعد عملية الامتزاز.

8- مفاعل اهتزازي: للخلط وذلك لضمان التجانس أثناء تجارب الامتزاز.

9- جهاز سبيكتروفوتومتر: لقياس تركيز الفينولات في المياه المدروسة.

10- جهاز اختبار الضغط: وذلك لتحديد قوة كسر الفحم المنشط، واجهاد الكسر نتيجة الضغط.

2.4. طريقة تصنيع الفحم المنشط:

مراحل تصنيع الفحم المنشط:

أولاً: التحضير الأولي لعيدان القندريس

تم في البداية غسل عيدان نبات القندريس بالماء المقطر حتى تتخلص من الغبار والاتربة المتراكمة عليها، من ثم تم تقطيع العيدان بأحجام مناسبة كما هو مبين في الشكل رقم (2) ووضعها في المجفف عند درجة حرارة 105 °C وتركها لفترة زمنية تبلغ 24 ساعة وإجراء وزن دوري للعيدان حتى التأكد من ثبات الوزن وضمان الجفاف التام لها.



يوضح الشكل (2) عملية تقطيع عيدان نبات القندريس.

ثانياً: الكربنة (إنتاج الفحم الأولي)

تم وضع عيدان القندريس في فرن خاص للكربنة، حجرته معزولة عن الهواء ويتم تزويدها بشكل مستمر بغاز النيتروجين لضمان الكربنة وتحويل العيدان إلى فحم دون احتراقها، حيث تم ضبط الفرن عند درجة الحرارة 600 °C ، بقيت العيدان فترة زمنية تزيد عن الساعتين لضمان تفحيم العيدان بشكل كامل، ويبين الشكل (3) عيدان القندريس بعد عملية الكربنة.



الشكل (3) عيدان نبات القندريس بعد التفحيم

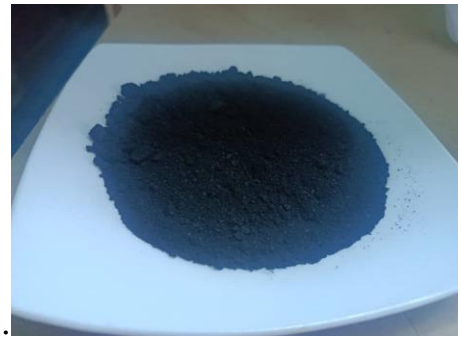
ثالثاً: طحن الفحم الأولي وتشكيل حبيبات الفحم والتنشيط

في هذه المرحلة جرى تحويل الفحم الناتج من المرحلة السابقة إلى مسحوق باستخدام مطحنة مناسبة للطحن. بعد ذلك أضيف نشاء الذرة بوصفه مادة رابطة بنسبة وزنية مقدارها 10%، ثم خلطت المكونات جيداً لضمان توزيع متجانس للنشاء داخل مسحوق الفحم. عقب ذلك أضيف حمض الفوسفوريك بتركيز 85% إلى الخليط ليعمل كعامل تنشيط كيميائي، واستمر الخلط لفترة كافية إلى أن تشكلت مادة ذات قوام عجيني متجانس.

لاحقاً خضعت العجينة لعملية الكبس والتشكيل باستخدام مكبس يدوي بهدف إنتاج حبيبات ذات شكل متقارب ومنتظم، بحيث تكون مشابهة في هيئتها للحبيبات التجارية للفحم المنشط المستخدمة كعينات مرجعية للمقارنة، (الحبيبات المرجعية ذات شكل مكعب وطول ضلع المكعب 3mm تقريباً).

بعد تشكيل الحبيبات، وضعت داخل فرن حراري مع تمرير مستمر لغاز النيتروجين بمعدل تدفق ثابت، وذلك لتوفير وسط خامل يمنع احتراق الفحم أثناء المعالجة الحرارية. ثم رفعت درجة حرارة الفرن تدريجياً حتى بلغت حوالي 400°C، واستمرت المعالجة لمدة تزيد عن ساعة لضمان حدوث عملية التنشيط بكفاءة.

تؤدي هذه المعالجة الحرارية في وجود عامل التنشيط (حمض الفوسفوريك) إلى تكوين بنية مسامية داخل الحبيبات، حيث تتشكل مسامات متعددة الأحجام إضافة إلى شقوق مجهرية ونانوية ضمن البنية الداخلية للمادة. وتؤدي هذه المسامية العالية إلى زيادة المساحة السطحية الفعالة للفحم المنشط، الأمر الذي يعزز من قدرته على الامتزاز. وفي النهاية أخرجت الحبيبات من الفرن وتركت لتبرد إلى درجة حرارة الغرفة. ويبين الشكل (4) الفحم بعد طحنه.



الشكل (4) الفحم بعد طحنه

رابعاً: المعادلة الحمضية للفحم

بعد الانتهاء من مرحلة التبريد، خضع الفحم المنشط الناتج لعملية غسيل لإزالة بقايا المواد الكيميائية والشوائب المتبقية من عملية التنشيط. حيث عولج أولاً باستخدام محلول حمض الهيدروكلوريك، ثم غسل عدة مرات بالماء المقطر لضمان التخلص من بقايا الحمض والأملاح الذائبة. وخلال هذه العملية جرى قياس قيمة الرقم الهيدروجيني (pH) بصورة متكررة إلى أن أصبحت متعادلة تقريباً عند قيمة تقارب 7. بعد استكمال عملية الغسل والمعادلة، نقل الفحم المنشط إلى فرن تجفيف حيث جفف عند درجة حرارة 105°C، واستمر التجفيف إلى أن تحقق ثبات في الوزن، مما يدل على إزالة الرطوبة بشكل كامل من العينة. ويبين الشكل (5) الشكل النهائي لحبيبات الفحم.



الشكل (5) شكل حبيبات الفحم النهائي

3.4. تحديد مواصفات الفحم المنشط المصنوع من ساق القندريس ومقارنتها بمواصفات الفحم التجاري:

تم تحديد أهم المواصفات القياسية للفحم الجديد المنتج ومواصفات الفحم التجاري (فحم المقارنة)

1- تحديد رقم اليود:

إن الغرض من تحديد رقم اليود هو أخذ مؤشر لمسامية الفحم والذي يُعتبر مقياساً لمساحة السطح الفعال لحبيبات الفحم المدروسة، فكلما زاد رقم اليود؛ زادت مساحة السطح الفعال، وبالتالي زادت إمكانية امتزازه لملوثات أكثر، ويعرف رقم اليود بأنه كمية اليود التي يمتزها الغرام الواحد من الفحم، ويقاس رقم اليود بـ mg/g.

تم وضع كميتان من محلول اليود في دورقين مختلفين، وهاتين الكميتين معلومتي الحجم والتركيز، وتم وزن كمية من الفحم المنشط الذي تم تصنيعه وكمية مشابهة من الفحم التجاري (فحم المقارنة)، من ثم تم وضع كميتي الفحم من كلا النوعين في الدورقين المليئين باليود، من ثم تم رج الدورقين وتركهما لفترة زمنية كافية ليمتز الفحم أكبر كمية من اليود، تم بعد ذلك ترشيح المحلولين لفصل الفحم عن المحاليل، من ثم تم معايرة اليود المتبقي الراشح لكل عينة باستخدام ثيوسلفات الصوديوم لتحديد كميته وبناءً عليه تحديد رقم اليود حسابياً.

تم اجراء هذا القياس بالاعتماد على الموصفة الأمريكية ASTM D4607 والتي يتم الاعتماد عليها في تحديد رقم اليود للفحم المنشط. [6]

2- تحديد الكثافة الظاهرية:

تم وزن كميتين متساويتين فحم منشط من كلا النوعين كلاً على حدى، من ثم تم تحديد حجم كل كمية على حدى، وتم بعد ذلك حساب الكثافة وذلك بقسمة الوزن على الحجم لكل عينة من العينات، وبذلك تم حساب كثافة كل نوع من أنواع الفحم المدروس، تم تطبيق هذا الاجراء عدة مرات على كميات مختلفة من الفحم المنشط المدروس، وحساب الكثافة في كل مرة، من ثم حساب متوسط الكثافة الظاهرية لكل نوع من الأنواع.

تم تحديد الكثافة الظاهرية لحبيبات الفحم المنشط التي تم صناعته والفحم التجاري بالاعتماد على معايير الجمعية الأمريكية لاختبار المواد وفقاً للمواصفة ASTM D2854-09(2025) ، الخاصة بتحديد الكثافة الظاهرية للفحم المنشط. [7]

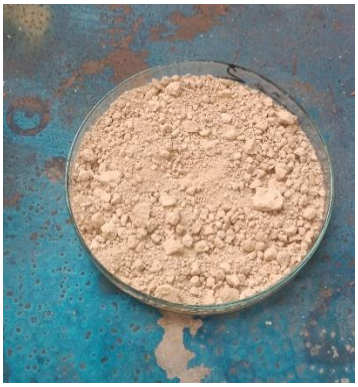
3- تحديد نسبة الرماد:

تم تحديد نسبة الرماد بالاعتماد على المواصفة الأمريكية ASTM D2866-11 الخاصة بتحديد نسبة الرماد للفحم المنشط، وذلك بترميد الفحم المنشط باستخدام مرمدة وفي جو يحتوي على اوكسجين لإتمام احتراق الفحم المنشط، وقد تم وزن كمية الفحم قبل عملية الترميد ووزن الرماد المتبقي بعد الترميد، وبتطبيق العلاقة التالية تم حساب نسبة الرماد لكل نوع من أنواع الفحم المدروس.

$$\text{نسبة الرماد}[\%] = \frac{W2}{W1} X100$$

حيث: W1: وزن العينة قبل الترميد، W2: وزن الرماد المتبقي.

تم تطبيق هذا الاجراء على الفحم المنشط التجاري وعلى الفحم المنشط المصنوع من عيدان القندريس.[8]



الشكل (6) الرماد الناتج عن عملية ترميد الفحم المنشط

4- اختبار صلادة (متانة) الفحم المنشط:

تم تطبيق اختبار الكسر الناتج عن الضغط باستخدام جهاز قياس الكسر نتيجة الضغط الموضح بالشكل (7)، حيث تم تطبيق حمولة متزايدة على الفحم الموجود بين فكي الجهاز، ومراقبة قيم الحمولة المطبقة، وعند انهيار العينة تم اخذ القراءة من الجهاز حيث تم اعتماد هذه القراءة كقوة لتحمل

الفحم نتيجة الضغط، وعلى أساسها تم حساب إجهاد الانكسار نتيجة الضغط لكل نوع من أنواع الفحم المدروس وفقاً للمعادلة التالية:

$$\sigma = F/A$$

حيث:

σ : اجهاد الانكسار بـ MPa ، F: القوة التي تنكسر عندها العينة بـ N

A: مساحة سطح العينة بـ m^2

تم تطبيق هذا الاختبار وفقاً للجمعية الأمريكية للمواصفات والمقاييس بالاعتماد على المواصفة القياسية ASTM D4179-22. [9]



يبين الشكل (7) جهاز اختبار الضغط

5- اختبار كفاءة فحم عيدان القندريس المنشط في تخفيض تركيز الفينولات من مياه معامل الأدوية:

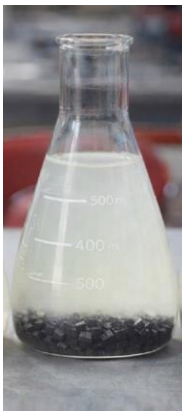
تم جمع عينات من مياه أحد معامل الأدوية باستخدام حاويات زجاجية معقمة، ووفقاً للطرائق التقنية والمعيارية المعتمدة. بعد ذلك، خضعت العينات لعملية ترشيح باستخدام جهاز تفريغ (شفط) بهدف تسريع عملية الترشيح، حيث تم تمرير العينات عبر ورق ترشيح ماكروي بمسامية 0.45 µm، وذلك لإزالة الشوائب الصلبة العالقة والمواد القابلة للترشيح.

من ثم تم أخذ العينات للمخبر لأجراء التحاليل الأولي عليها وتحديد تركيز الفينولات الأولي، وقد تم التحليل باستخدام جهاز السبيكتروفوتومتر المبين في الشكل (8)، وتم تحديد مواصفات أخرى وفقاً لتحاليل أخرى، فبلغت الحموضة 9 ، وكانت القساوة 180 mg/l وبلغت قيمة TSS في تلك المياه 45 mg/l وبين الفحص أن المواد الصلبة السائلة 1220 mg/l .



الشكل (8) جهاز السبيكتروفوتومتر المستخدم لقياس تركيز الفينولات

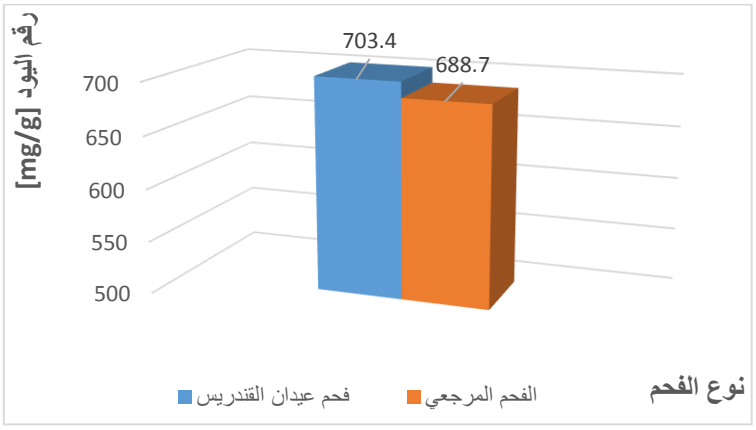
تم بعد ذلك وضع كميات متماثلة من المياه الملوثة المرشحة في أواني زجاجية 500 ml ، ثم البدء بإضافة الفحم المنشط لعينات المياه، حيث تم وضع كميات متدرجة معلومة الوزن من الفحم المنشط لعينات المياه المراد معالجتها (من فحم عيدان القندريس ومن الفحم المنشط المرجعي)، والكميات هي 0.5 g و 1 g و 2 g و 4 g و 8 g، ووضع هذه الاواني على جهاز هزاز من أجل تحسين الامتزاز من ثم ترك العينات فترة زمنية بلغت 120 min، وجرت تلك العملية بشكل كامل ضمن شروط المخبر فكانت درجة الحرارة 20 C° وكانت الرطوبة % 50 ، من ثم تمت عملية فصل الفحم عن المياه بالترشيح، وإجراء تحليل تراكيز الفينولات الجديدة لجميع العينات لمعرفة فعالية كل كمية مضافة من الفحم المنشط. ويبين الشكل (9) عملية إضافة الفحم المنشط لإحدى عينات المياه المدروسة.



الشكل (9) عملية إضافة الفحم المنشط لإحدى عينات المياه المدروسة

5.النتائج والمناقشة:

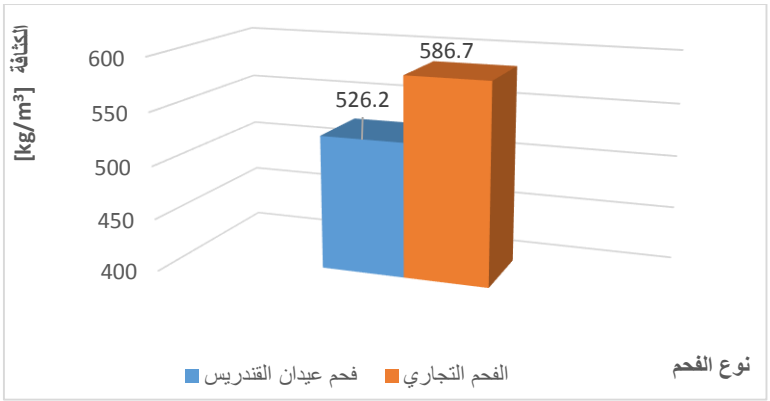
تم تحضير فحم منشط انطلاقاً من عيدان نبات القندريس، وخضع كل من الفحم المُصنَّع وعينة من فحم تجاري (تم الحصول عليها من السوق المحلي لاستخدامها كمرجع) لسلسلة من الاختبارات. بعد اكتمال العمليات التحليلية والحصول على جميع النتائج، تمت مقارنة أداء الفحم المحضر من عيدان القندريس بالفحم المرجعي. ويوضح الشكل (10) النتائج المقارنة لقيم رقم اليود المقاسة لكل من الفحمين.



الشكل (10) مقارنة رقم اليود بين فحم عيدان القندريس والفحم التجاري

تشير النتائج الموضحة في الشكل السابق إلى تفوق قيمة رقم اليود للفحم المنشط المحضر من عيدان نبات القندريس على نظيره في الفحم التجاري المرجعي، حيث بلغت 703.4 mg/g مقارنة بـ 688.7 mg/g للفحم المعياري. يعكس هذا الارتفاع في رقم اليود اتساعاً في المساحة السطحية الفعالة للفحم المحضر محلياً، مما يمنحه قدرة امتزازية أعلى؛ إذ تتيح المساحة السطحية الأكبر مجالاً أوسع لامتزاز الملوثات. تُعزى هذه الزيادة في السطح النوعي الفعال إلى وفرة المسام والشقوق داخل بنية العينة، والتي تنتج عن كفاءة عملية التنشيط في إحداث هذه الفراغات الدقيقة.

وبالنظر لنتائج تحديد الكثافة نجد من خلال الشكل (11) مقارنة بين الكثافة لفحم عيدان القندريس المنشط وكثافة الفحم التجاري المرجعي.



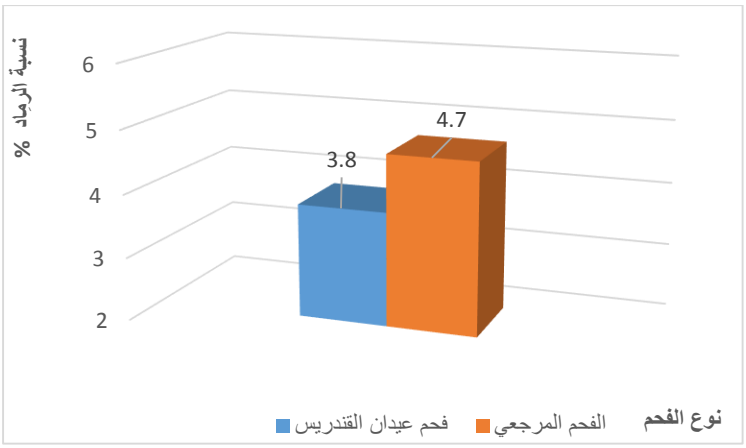
الشكل (11) مقارنة بين كثافة فحم عيدان القندريس وكثافة الفحم التجاري

من خلال الشكل السابق، يُلاحظ أن كثافة الفحم المنشط المحضر من عيدان القندريس كانت أقل من كثافة الفحم التجاري المرجعي، حيث بلغت قيمتها 526.2 kg/m^3 مقابل 586.7 kg/m^3 للفحم المرجعي. يُعزى هذا الاختلاف في الكثافة إلى مجموعة من العوامل، يأتي في مقدمتها طبيعة المادة الأولية المستخدمة في تحضير كل نوع من الفحم؛ إذ تلعب الكثافة الأولية للمادة دوراً محورياً في تحديد الكثافة النهائية للفحم المنشط. كما تسهم درجة الضغط المطبقة أثناء تشكيل حبيبات الفحم في

ذلك، حيث تزداد الكثافة النهائية بازدياد الضغط. إضافةً إلى ذلك، تؤثر فعالية عملية التنشيط بشكل ملحوظ، إذ يؤدي ارتفاع كفاءة التنشيط إلى انخفاض كثافة الحبيبات. ويمكن أن تسهم هذه العوامل مجتمعةً في تحديد الكثافة النهائية للفحم، مع تفاوت في درجة تأثير كل منها.

بناءً على أن الفحم المنشط المحضر من عيدان القندريس أظهر كثافة أقل، يمكن استنتاج أن هذا الفحم يمتاز بمسامية أعلى، مما ينعكس إيجاباً على اتساع مساحة سطحه. تُعد هذه الخاصية ميزة نسبية للفحم المحضر محلياً مقارنةً بالفحم التجاري المرجعي، حيث تمنحه قدرة أكبر على التفاعل والامتصاص.

يبين الشكل (12) مقارنة بين فحم عيدان القندريس المنشط والفحم التجاري المرجعي من ناحية نسبة الرماد.

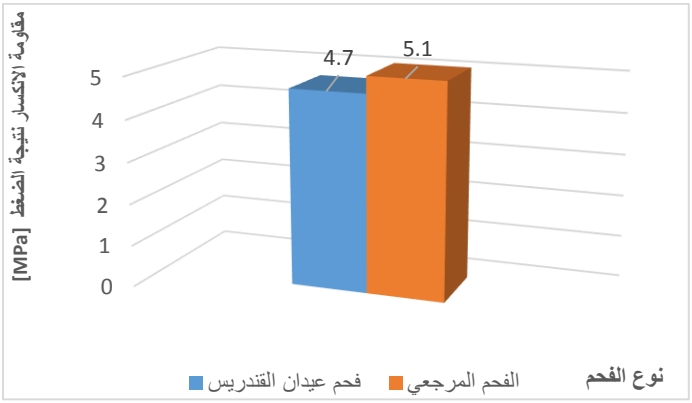


الشكل (12) مقارنة نسبة الرماد بين فحم عيدان القندريس والفحم التجاري

أظهرت نتائج تحليل نسبة الرماد في كل من الفحم المنشط المحضر من عيدان القندريس والفحم التجاري المرجعي انخفاض هذه النسبة في العينة المحضرة محلياً مقارنة بالعينة المرجعية، حيث بلغت 3.8% للفحم المحضر مقابل 4.7% للفحم التجاري. يُعزى هذا الفرق إلى احتواء فحم عيدان القندريس على شوائب معدنية أقل مقارنة بالفحم المرجعي. تجدر الإشارة إلى أن انخفاض نسبة الرماد

يُعد مؤشراً على جودة الفحم المنشط، وتُصنف مواصفات الفحم بأنها جيدة عندما تقل نسبة الرماد فيه عن 5% وهو ما ينطبق على الفحم المحضر من عيدان القندريس.

يبين الشكل (13) مقارنة بين فحم عيدان القندريس المنشط وبين الفحم التجاري المرجعي من ناحية مقاومته للكسر نتيجة الضغط.



الشكل (13) مقارنة مقاومة الانكسار نتيجة الضغط بين فحم عيدان القندريس والفحم التجاري

تمت مقارنة مقاومة الكسر تحت تأثير الإجهاد الضاغط بين الفحم المنشط المحضر من عيدان القندريس والفحم التجاري المرجعي، وقد أوضحت النتائج المعروضة في الشكل (13) أن الفحم المحضر محلياً أبدى مقاومة أقل للكسر مقارنة بنظيره التجاري. ففي حين انهارت عينة الفحم المحضر عند إجهاد ضغط مقداره 4.7 MPa، أظهرت العينة المرجعية مقاومة أعلى حيث انهارت عند إجهاد ضغط بلغ 5.1 MPa . يمنح هذا الفارق أفضلية للفحم التجاري من حيث قدرته على تحمل الإجهادات الميكانيكية، لا سيما عند وضعه في قاع أعمدة التنقية حيث يتعرض لثقل الطبقات العلوية، كما يمنحه متانة أكبر أثناء عمليات النقل والشحن التي تنطوي على إجهادات ناتجة عن التحميل والتفريغ والمناولة.

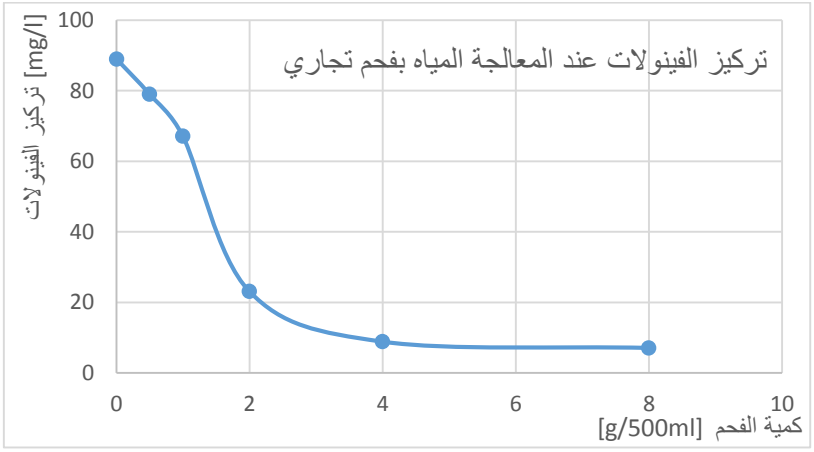
يمكن إرجاع تفوق الفحم التجاري في هذه الخاصية إلى عدة عوامل، يأتي في مقدمتها ارتفاع كثافته، مما يشير إلى احتوائه على نسبة أعلى من المادة الصلبة وبالتالي تماسك أكبر بين جزيئاته. كما تسهم درجة الضغط المطبقة أثناء عملية التصنيع في تعزيز هذا التماسك؛ إذ تزداد متانة الفحم

بازدياد قوة الضغط. إضافةً إلى ذلك، تلعب نسبة المادة الرابطة (النشاء) دوراً أساسياً في تحديد صلابة الفحم، حيث يؤدي ارتفاع نسبتها إلى زيادة تماسك العينات. ولا يمكن إغفال دور نوع المادة الأولية المستخدمة في التصنيع كعامل مؤثر في الخواص الميكانيكية للفحم الناتج.

بعد استكمال دراسة الخصائص المختلفة للفحم المنتج، تم تقييم كفاءة الفحم المنشط المحضر من عيدان القندريس من خلال اختبار قدرته على إزالة المركبات الفينولية الموجودة في مياه الصرف الصناعي الناتجة عن أحد معامل الأدوية، كما تم توضيحه سابقاً. ولتحليل النتائج، جرى تمثيل ذلك بيانياً لإظهار العلاقة بين تركيز الفينولات المتبقي في المياه وكمية الفحم المستخدمة في عملية المعالجة. وقد أُجري هذا الاختبار باستخدام نوعين من الفحم المنشط، وهما الفحم المنشط المحضر من عيدان القندريس والفحم المنشط التجاري المستخدم كعينة مرجعية للمقارنة. وتوضح الأشكال (14) و(15) هاتين العلاقتين على التوالي.



الشكل (14) تغير تركيز الفينولات في العينات مع تغيير كمية فحم عيدان القندريس المنشط المستخدم للمعالجة



الشكل (15) تغير تركيز الفينولات في العينات مع تغيير كمية الفحم التجاري المنشط المستخدم للمعالجة

بالاستناد إلى الشكلين السابقين، يُلاحظ أن تركيز الفينولات ينخفض تدريجياً مع زيادة كمية الفحم المنشط المستخدمة في عملية المعالجة، ويُعزى ذلك إلى ازدياد المساحة السطحية الفعّالة المتاحة لامتزاز الملوثات الموجودة في المياه المعالجة. وبناءً عليه، يؤدي رفع كمية الفحم المنشط إلى تعزيز القدرة على إزالة الفينولات من المياه الملوثة. إذ بلغ تركيز الفينولات قبل المعالجة 89 mg/l ، في حين انخفض بعد المعالجة باستخدام كمية 0.5 g/500ml من فحم عيدان القندريس والفحم التجاري، كلٌّ على حدة، ليصل إلى 74.7 mg/l و 79 mg/l على التوالي.

ومع زيادة كمية الفحم إلى 1 g/500 ml ، لوحظ انخفاض إضافي في تركيز الفينولات ليبلغ 54.2 mg/l عند استخدام فحم عيدان القندريس و 67.07 mg/l عند استخدام الفحم التجاري. كما استمر هذا الاتجاه التنازلي عند رفع كمية الفحم إلى 2 g/500 ml ، حيث انخفض تركيز الفينولات إلى 16.2 mg/l و 23.1 mg/l عند استخدام فحم عيدان القندريس والفحم التجاري على التوالي. واستمر تركيز الفينولات بالانخفاض مع زيادة كمية كل من فحم عيدان القندريس والفحم التجاري المضافة للمياه إلى 4 g/500 ml حيث بلغ تركيز الفينولات 5.6 mg/l و 8.9 mg/l على التوالي، ومع زيادة كمية الفحم المستخدم للمعالجة بعد هذا الحد، لوحظ انخفاض فعالية امتزاز الفحم للفينولات، حيث

يصبح معدل انخفاض التركيز أقل بكثير، فعند استخدام كمية فحم بلغت 8 g/500ml بلغ تركيز الفينولات 4.6 mg/l عند استخدام فحم عيدان القندريس، وينخفض تركيزه قليلاً في العينة التي تم فيها استخدام الفحم التجاري ليصبح 7.11 mg/l عند استخدام الفحم التجاري، أي أن زيادة كمية الفحم في المعالجة لن تعد مجدية لأن التغير في تركيز الفينولات أصبح ضئيلاً جداً مع مضاعفة كمية الفحم المنشط في كلا النوعين من الفحم، لذلك يمكن اعتبار كمية 4 g/500ml من الفحم هي الأفضل، كون أن الزيادة في كميته لم تعد مجدية اقتصادياً.

6. الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال ما تم بحثه في هذه الدراسة يمكن صياغة الاستنتاجات التالية:

1. بينت الدراسة أن ساق نبات القندريس يمكن أن يصلح لصناعة فحم منشط عالي الأداء.
2. دلّ رقم اليود لفحم عيدان القندريس أن هذا الفحم يمكتلك مساحة سطح فعالة كبيرة نسبياً، حيث تفوق رقم اليود الخاص بالفحم المنتج على رقم اليود الخاص بالفحم التجاري بنسبة 2.13% .
3. بينت نتائج قياس الكثافة أن كثافة فحم عيدان القندريس أقل من كثافة الفحم المنشط التجاري بنسبة 10.3% .
4. بينت تجربة نسبة الرماد أن نسبة الرماد بفحم عيدان القندريس هي نسبة منخفضة وأقل من نسبته الموجودة بالفحم التجاري بنسبة 19.14% ، وبالتالي إن الشوائب في فحم عيدان القندريس أقل من الشوائب الموجودة في الفحم التجاري.
5. أبدى الفحم التجاري مقاومة للانكسار نتيجة الضغط تفوق المقاومة التي أبداها فحم عيدان القندريس بنسبة تصل 7.8% .
6. استطاع فحم عيدان القندريس أن يمتز الفينولات الموجودة في مياه الصرف الناتجة عن أحد معامل الأدوية بنسبة تصل إلى 93.7% عند كمية فحم اقتصادية بلغت 4 g/500ml ، بينما امتز الفحم المنشط التجاري نسبة 90% من الفينولات عند نفس الكمية من الفحم المنشط.

7. يمكن لفحم عيدان القندريس المنشـط أن ينافس الفحم المنشـط التجاري وذلك لتمتعه بخواص جيدة متقاربة نسبياً مع خواص الفحم المنشط التجاري تجعله مناسباً لتطبيقات معالجة المياه.

التوصيات:

من خلال ما سبق يمكن صياغة التوصيات التالية:

1- اجراء دراسات تحدد فعالية فحم عيدان القندريس في امتزاز ملوثات أخرى.

2- العمل على دراسة فعالية فحم عيدان القنديس على معالجة أنواع أُخرى من المياه.

3- دراسة إمكانية إعادة تنشيط فحم عيدان القندريس.

4- العمل على تصـــنيع الفحم المنشـــط من مواد أخرى واختبار فعاليتها في إزالة أنواع مختلفة من الملوثات.

7. المراجع References

1- Saeedi M et al. 2009- **Adsorptive Removal of Phenol from Contaminated Water and Wastewater by Activated Carbon, Almond, and Walnut Shells Charcoal.** *Water Environment Federation, Volume81, Issue6, June 2009, Pages 641-648.*

2- Bringle C et al. 2009. **Removal of phenols from water and petroleum industry refinery effluents by activated carbon obtained from coconut coir pith.** *Advances in Industrial and Engineering Chemistry, Volume 15, pages 439–451*

3- Dehmani Y et al. 2024- **Adsorption removal of phenol by oak wood charcoal activated carbon**. *Biomass Conv. Bioref. 14,pages 8015–8027* .

4- Qarmo A and Esteifi K., 2016- **Determination of Mechanical and Thermal Characteristics of some Waste Materials in Order to Be Used for Thermal Insulation Purposes.***Research Journal of Aleppo University, Engineering Science Series (2), 2016.129.*

5- Qarmo A**. Using Waste Materials for Thermal Insulation.** *Aleppo University, Thesis (MSC) 2016.Page 31.*

6- **Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon**. *ASTM D4607-14(2021). https://store.astm.org/d4607-14r21.html.*

7- **Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon**. *ASTM D2854-09(2025).* https://store.astm.org/d2854-09r25.html.

8- **Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon.** *ASTM D2866-11-202. https://store.astm.org/d286611r25.html.*

9- **Standard Test Method for Single Pellet Crush Strength of Formed Catalysts and Catalyst Carriers**. *ASTM D4179-22. https://store.astm.org/d4179-22.html*

تأثير استخدام مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية (GFRP Waste) على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية

إعداد الطالب:

لمك بسَّام الجداوي

المشرف العلمي:

الدكتور عامر الشيخ

قسم الهندسة الكيميائية
كلية الهندسة الكيميائية والبترولية
جامعة حمص

المشرف المشارك:

الدكتور عبد الناصر الأعرج

قسم الهندسة الكيميائية
كلية الهندسة الكيميائية والبترولية
جامعة حمص

الملخص

تُعدّ مخلفات المواد المركبة، ولا سيما مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية(GFRP) ، من التحديات البيئية المتزايدة نظراً لصعوبة إعادة تدويرها بوسائل تقليدية، مما يستدعي البحث عن حلول بديلة ومستدامة لإعادة توظيفها. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير إضافة مخلفات GFRP المطحونة

على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية، وذلك من خلال برنامج تجريبي مخبري منظّم شمل مرحلتين أساسيتين. في المرحلة الأولى، تم استخدام المخلفات كبديل جزئي عن وزن الإسمنت، بينما في المرحلة الثانية استُخدمت كمادة مضافة مع تثبيت كمية الإسمنت في الخلطة.

تم تحضير خلطة خرسانية مرجعية بعيار إسمنت قدره $400\ \frac{kg}{m^3}$، واعتماد نسب إضافة تراوحت بين $(0 - 12.5)$ % من مخلفاتGFRP ، مع اختبار مقاومة الانضغاط لعينات مكعبية عند أعمار 7 و28 يوماً وفق المواصفات القياسية المعتمدة. أظهرت النتائج أن إضافة مخلفات GFRP بنسبة منخفضة، ولا سيما عند نسب منخفضة، أدت إلى تحسن طفيف أو محافظة على مقاومة الانضغاط مقارنة بالخلطة المرجعية، خصوصاً في حالة تثبيت كمية الإسمنت، في حين أدى ارتفاع نسبة الإضافة إلى تراجع ملحوظ في المقاومة.

تشير نتائج هذا البحث إلى إمكانية الاستفادة من مخلفات GFRP كنسبة محدودة في الخلطات الخرسانية دون التأثير السلبي الكبير على الخواص الميكانيكية، مما يفتح المجال أمام تطبيقات إنشائية صديقة للبيئة تسهم في تقليل الأثر البيئي للمخلفات الصناعية.

الكلمات المفتاحية :الخرسانة الإسمنتية، مخلفاتGFRP ، الإيبوكسي، مقاومة الانضغاط، الاستدامة.

Abstract

Composite material wastes, particularly glass fiber reinforced epoxy (GFRP) waste, represent a growing environmental challenge due to the difficulty of recycling thermoset polymers using conventional methods. This study investigates the effect of incorporating ground GFRP waste on the compressive strength of cement concrete through a structured experimental program conducted in two main phases. In the first phase, GFRP waste was used as a partial replacement of cement by weight, while in the second phase it was added to the concrete mixture while maintaining a constant cement content.

A reference concrete mix with a cement content of 400 kg/m³ was prepared, and GFRP waste was incorporated at proportions ranging from 0% to 12.5%. Compressive strength tests were carried out on cubic specimens at curing ages of 7 and 28 days in accordance with relevant standards. The results indicated that low GFRP waste contents, particularly at ---%, resulted in comparable or slightly improved compressive strength compared to the reference mix, especially when the cement content was kept constant. However, higher replacement or addition levels led to a noticeable reduction in compressive strength.

The findings of this study demonstrate the potential feasibility of utilizing limited amounts of GFRP waste in concrete mixtures without significant deterioration in mechanical performance, offering an environmentally sustainable approach for recycling industrial composite waste in construction applications.

Keywords: Cement concrete, GFRP waste, epoxy, compressive strength, sustainability.

المقدمة

يشهد قطاع الإنشاءات في العقود الأخيرة توسعاً ملحوظاً ترافق مع زيادة كبيرة في استهلاك المواد الإسمنتية، الأمر الذي أدى إلى تفاقم المشكلات البيئية المرتبطة بإنتاج الإسمنت من حيث استنزاف الموارد الطبيعية وارتفاع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وبالتوازي مع ذلك، برزت مشكلة تراكم المخلفات الصناعية، ولا سيما مخلفات المواد المركبة المدعمة بالألياف الزجاجية(GFRP) ، الناتجة عن صناعات متقدمة مثل صناعة شفرات العنفات الريحية، والتي تُعد من أكثر المخلفات صعوبةً في إعادة التدوير بسبب طبيعة راتنجات الإيبوكسي الحرارية غير القابلة للانصهار.

في هذا السياق، اتجهت الأبحاث الحديثة إلى استكشاف إمكانية إعادة توظيف المخلفات الصناعية والليفية ضمن الخلطات الخرسانية، سواء كمواد مالئة أو كبدائل جزئية عن مكونات الخرسانة التقليدية، بهدف تحقيق فوائد بيئية واقتصادية مع المحافظة على الأداء الميكانيكي المطلوب. وقد أظهرت العديد

من الدراسات أن إضافة ألياف أو مخلفات ليفية إلى الخرسانة يمكن أن تؤثر بشكل مباشر على خواصها الميكانيكية، ولا سيما مقاومة الانضغاط، ومقاومة الشد، والمتانة طويلة الأمد، إلا أن طبيعة هذا التأثير تعتمد بشكل أساسي على نوع المادة المضافة، شكلها، حجمها، ونسبة إضافتها.

تركزت معظم الدراسات السابقة على استخدام الألياف الزجاجية أو البوليمرية المصنعة حديثاً، في حين أن الدراسات المتعلقة باستخدام مخلفات المواد المركبة المطحونة، وخاصة مخلفات GFRP المحتوية على راتنجات إيبوكسي متصلبة، ما تزال محدودة نسبياً، وخصوصاً فيما يتعلق بدراسة تأثيرها على مقاومة الانضغاط للخرسانة عند استخدام استراتيجيات مختلفة للإضافة، مثل الإحلال الجزئي للإسمنت أو الإضافة المباشرة مع تثبيت محتواه.

بناءً على ما سبق، تأتي هذه الدراسة لتسد فجوة بحثية قائمة من خلال تقييم تأثير إضافة مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية المطحونة على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية، وذلك عبر مرحلتين تجريبيتين متميزتين: الأولى تعتمد على تقليل كمية الإسمنت واستبداله جزئياً بالمخلفات، والثانية تعتمد على تثبيت كمية الإسمنت وإضافة المخلفات كمادة مضافة. وتهدف هذه المقارنة إلى تحديد السلوك الميكانيكي للخرسانة الناتجة، وتحديد النسب المثلى الممكنة للإضافة دون التأثير السلبي الكبير على مقاومة الانضغاط، بما يدعم التوجه نحو حلول إنشائية أكثر استدامة وصديقة للبيئة.

حظي استخدام المواد المركبة والبوليمرات المدعمة بالألياف باهتمام واسع في مجال هندسة الخرسانة خلال السنوات الماضية، نظراً لقدرتها على تحسين بعض الخواص الميكانيكية للمواد الإسمنتية، ولا سيما مقاومة الشد والانحناء، إضافة إلى دورها في الحد من تطور التشققات. وقد ركزت العديد من الدراسات على استخدام الألياف الزجاجية وألياف الكربون سواء على شكل أقمشة أو ألياف قصيرة، مع تسجيل اختلافات واضحة في الأداء تبعاً لنوع الألياف وطريقة استخدامها.

GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer

أظهرت دراسة Park **et al. (2020)** أن نوع الألياف المستخدمة في المواد المركبة يلعب دوراً حاسماً في السلوك الميكانيكي، حيث أظهرت الألياف الزجاجية صلابة أقل مقارنةً بالألياف الكربونية عند تعزيز العناصر الخرسانية بمونة مقواة بالنسيج، ويُعزى ذلك إلى ضعف الترابط البيني بين الألياف الزجاجية والمصفوفة مقارنةً بألياف الكربون [1]. وتنسجم هذه النتائج مع ما توصل إليه **Baker (2019)**، الذي بيّن أن الألياف الزجاجية لم تُحقق تحسناً يُذكر في مقاومة الانضغاط عند استخدامها كلفافات خارجية، في حين كان تأثيرها أكثر وضوحاً في تحسين مقاومة الشد والانحناء، مقابل تفوق واضح لألياف الكربون في تحسين مقاومة الانضغاط.[2]

في المقابل، تشير دراسات أخرى إلى أن فعالية الألياف الزجاجية قد تتحسن عند استخدامها على شكل ألياف قصيرة موزعة داخل المصفوفة بدلاً من استخدامها كتعزيز خارجي. فقد أظهر Reis **(2005)** أن إضافة ألياف زجاجية قصيرة إلى الخرسانة البوليمرية الإيبوكسية أدت إلى تحسن ملحوظ في مقاومة الانضغاط وزيادة في المطيلية، على الرغم من ملاحظة انخفاض طفيف في معامل المرونة، مما يعكس سلوكاً شائعاً في المواد المركبة حيث يتم تحقيق زيادة في القوة على حساب الصلابة.[3]

وبصورة مشابهة، بيّنت دراسة Subandi **et al. (2019)** وجود نسبة مثلى لإضافة الألياف الزجاجية إلى الخرسانة الإسمنتية، حيث أدى استخدام نسبة 0.25% من وزن الإسمنت إلى تحقيق أعلى مقاومة انضغاط، في حين أن تجاوز هذه النسبة أدى إلى تراجع المقاومة بسبب تكتل الألياف وضعف الالتصاق داخل المصفوفة الإسمنتية [7]. تؤكد هذه النتائج أهمية التحكم بنسبة الإضافة لتحقيق التوازن الأمثل بين تحسين الأداء الميكانيكي والحفاظ على تجانس الخلطة.

من جهة أخرى، اتجهت دراسات حديثة إلى معالجة البعد البيئي من خلال إعادة تدوير مخلفات المواد المركبة بدلاً من استخدام الألياف البكر. فقد تناولت دراسة **Meira Castro (2013)** إمكانية استخدام نفايات GFRP المعاد تدويرها ميكانيكياً كحشوة أو بديل جزئي للركام في المونة البوليمرية، وأظهرت النتائج تحسناً في الخواص الميكانيكية عند نسب إضافة منخفضة، مع تسجيل نسب مثلى تعتمد على حجم الجسيمات المضافة [5]. كما أشار الباحث إلى أن المساحيق الناعمة جداً قد تسهم في تحسين قابلية التشغيل، في حين أن الجسيمات الأكبر قد تُظهر تأثيراً تقوياً أفضل.

وفي السياق نفسه، أظهرت دراسة **Dehghan (2017)** أن تأثير مخلفات GFRP المعاد تدويرها يعتمد بشكل كبير على شكلها الفيزيائي، حيث لم يُظهر مسحوق GFRP الناعم تحسناً واضحاً في الخصائص الميكانيكية، بينما أدت التكتلات المحتوية على ألياف قصيرة إلى تحسن طفيف في مقاومة الانضغاط ونمط الفشل، إضافةً إلى وجود مؤشرات على تفاعل بوزولاني للألياف الزجاجية داخل المصفوفة الإسمنتية وفق فحوص.[8] SEM

كما دعمت دراسة **Syafwand et al. (2022)** مفهوم "النسبة المثلى"، حيث أظهرت أن إضافة الألياف الزجاجية إلى الخرسانة البوليمرية الإيبوكسية أدت إلى زيادة كبيرة في مقاومة الانضغاط حتى نسبة 6% من وزن الراتنج، قبل أن تبدأ المقاومة بالانخفاض عند نسب أعلى.[6]

من ناحية شمولية، قدمت دراسة **Siddika et al. (2020)** مراجعة شاملة أكدت على الكفاءة العالية للمواد المركبة المدعمة بالألياف في تعزيز الهياكل الخرسانية، مع الإشارة إلى أن الواجهة البينية بين المادة المركبة والخرسانة تُعد نقطة ضعف محتملة تتحكم في نمط الفشل النهائي، وهو عامل يجب أخذه بعين الاعتبار عند دمج مواد مركبة أو مخلفاتها داخل المصفوفة الإسمنتية.[4]

تناولت الدراسة، التي أجراها **Shui-Chuen Kou(2009)** ، استخدام مخلفات الزجاج المعاد تدويرها كبديل جزئي للركام الطبيعي في الخلطات الخرسانية، مع التركيز على تأثير ذلك على الخصائص الميكانيكية والمتانة.[9]

تم تحضير خلطات خرسانية باستخدام نسب مختلفة من الزجاج المعاد تدويره كبديل عن الركام الناعم، ثم أُجريت اختبارات مقاومة الانضغاط، الامتصاص، والكثافة بعد فترات معالجة مختلفة.

النتائج الرئيسية:

- أظهرت الخرسانة المحتوية على نسب منخفضة من الزجاج المعاد تدويره أداءً مقارباً للخرسانة التقليدية.
- عند زيادة نسبة الإحلال، لوحظ انخفاض تدريجي في مقاومة الانضغاط، نتيجة ضعف الترابط البيني بين الزجاج والمصفوفة الإسمنتية.
- أكدت الدراسة أن ضبط نسبة الإضافة عامل حاسم لتحقيق توازن بين الاستدامة والأداء الميكانيكي.

تدعم هذه الدراسة مفهوم النسبة المثلى للإضافة الذي يعتمد عليه البحث الحالي، حيث أن مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية قد تُحسن الأداء عند نسب محددة، بينما تؤدي الزيادات المفرطة إلى تراجع الخصائص الميكانيكية.[9]

بحثت دراسة José Ricardo Correia (2011) بشكل مباشر في إمكانية إعادة استخدام مخلفات البوليمرات المقواة بالألياف الزجاجية (GFRP) داخل الخرسانة الإسمنتية، مع تقييم تأثيرها على الخصائص الميكانيكية وسلوك الفشل.[10]
تم طحن مخلفات GFRP ميكانيكياً واستخدامها كبديل جزئي عن الركام الناعم في الخرسانة بنسب مختلفة. أُجريت اختبارات مقاومة الانضغاط، الشد، والانحناء.

النتائج الرئيسية:

- أظهرت الخلطات المحتوية على نسب منخفضة من مخلفات GFRP تحسناً طفيفاً في مقاومة الانضغاط.
- لوحظ أن وجود الألياف الزجاجية القصيرة ساهم في تحسين نمط الفشل من هش إلى أكثر مطيلية.
- عند زيادة نسبة المخلفات، بدأت مقاومة الانضغاط بالانخفاض نتيجة ضعف التجانس وصعوبة الدمك.[10] .

بينما ركزت دراسة Takashi Ochi (2007) على استخدام ألياف بوليمرية معاد تدويرها (PET) كألياف تسليح للخرسانة، بهدف تحسين الخصائص الميكانيكية مع تحقيق فائدة بيئية.[11] تم تحضير خلطات خرسانية بألياف PET معاد تدويرها بنسب مختلفة، وأُجريت اختبارات مقاومة الانضغاط، الشد، والانحناء، إضافة إلى مراقبة التشققات.

النتائج الرئيسية:

- لم تُظهر مقاومة الانضغاط تحسناً كبيراً عند زيادة محتوى الألياف، بل لوحظ أحياناً انخفاض طفيف.
- في المقابل، تحسنت مقاومة الشد والانحناء بشكل واضح نتيجة قدرة الألياف على كبح التشققات.
- أكدت الدراسة وجود نسبة مثلى للألياف تحقق أفضل توازن بين الخصائص الميكانيكية وقابلية التشغيل[11] .

استناداً إلى ما سبق، يتضح أن معظم الدراسات السابقة إما ركزت على استخدام ألياف بكر أو على إعادة تدوير مخلفات GFRP ضمن مونة أو خرسانة بوليمرية، في حين ما تزال الدراسات التي تقارن

بين إحلال الإسمنت جزئياً بمخلفات GFRP وإضافتها مع تثبيت محتوى الإسمنت محدودة. من هنا، تأتي هذه الدراسة لتسد فجوة بحثية واضحة من خلال تقديم مقارنة تجريبية مباشرة بين هاتين الاستراتيجيتين، مع تقييم تأثير نسب مختلفة من مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية.

هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى:

- دراسة تأثير إضافة مخلفات صناعة الإيبوكسي المدعمة بالألياف الزجاجية على الخواص الميكانيكية للخرسانة الإسمنتية.
- تحديد مدى إمكانية تعزيز مقاومة الانضغاط للخرسانة باستخدام هذه المخلفات.
- اختبار إمكانية تقليل كمية الأسمنت في الخلطة الخرسانية بإضافة نسبة معينة من مخلفات الإيبوكسي دون التضحية بالمقاومة.
- المساهمة في إيجاد حل بيئي مستدام للاستفادة من المخلفات الصناعية الضارة والتخلص الآمن منها.

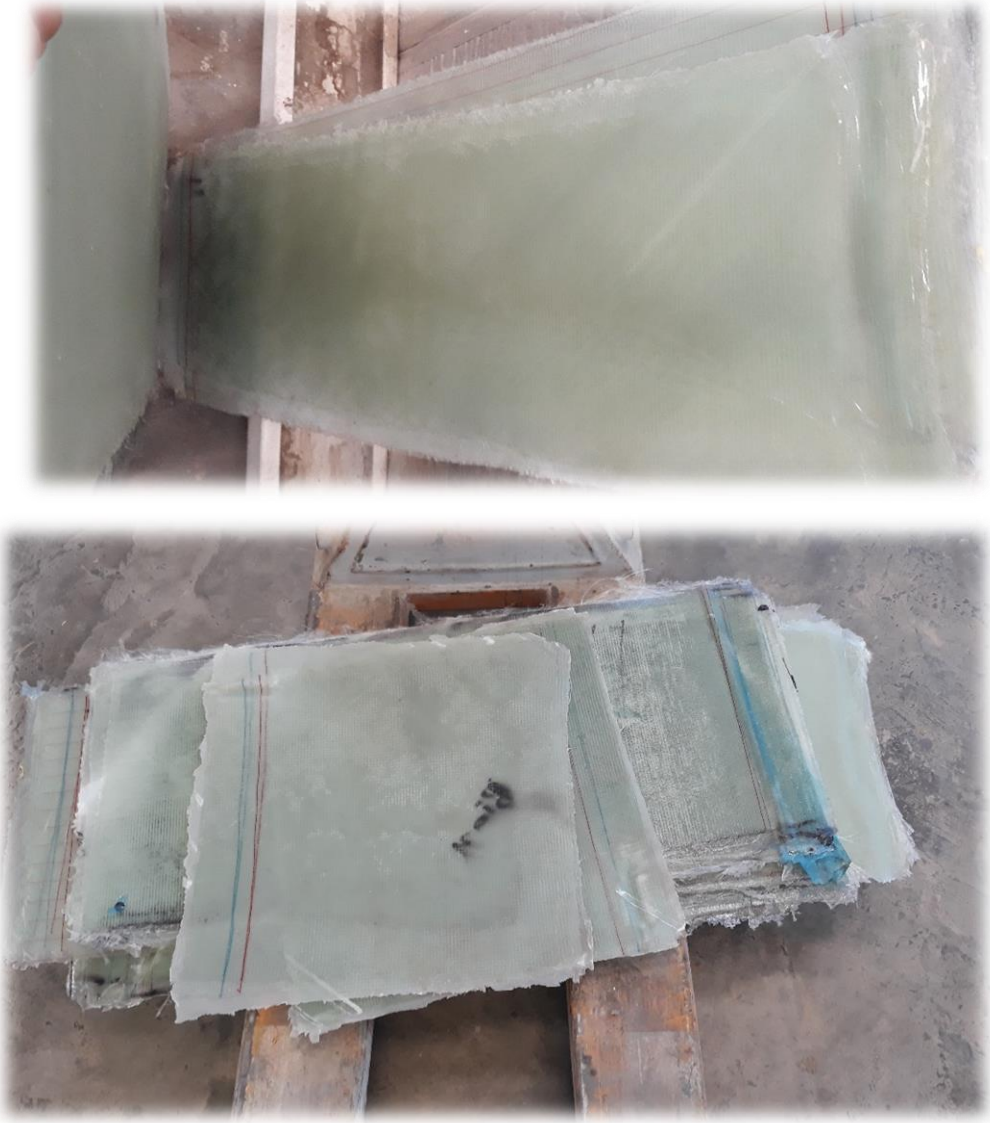
اتُّبع في هذا البحث المنهج التجريبي الوصفي، حيث شملت خطوات البحث الرئيسية ما يلي:

تحضير المواد :جُمعت مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية :(GFRP Waste) وهي المادة الأساسية قيد الدراسة في هذا البحث، والتي تمثل تحدياً بيئياً وفرصة هندسية في آن واحد، بالإضافة إلى المواد التقليدية للخرسانة (أسمنت، ورمل، وحصى).

المصدر والتركيب :تم الحصول على المخلفات من عمليات القطع والتشذيب الناتجة عن تصنيع مكونات كبيرة من المواد المركبة (شفرات العنفات الريحية). تتكون هذه المخلفات بشكل أساسي من ألياف زجاجية من نوع (E-Glass)مطمورة ضمن مصفوفة من راتنج الإيبوكسي المتصلب (Thermoset Epoxy Resin).الإيبوكسي المستخدم في هذه الصناعات هو من النوع عالي الأداء، يتميز بقوة رابطة عالية ومقاومة كيميائية جيدة، وبعد تصلبه يصبح مادة غير قابلة للانصهار، مما يعقد عملية إعادة التدوير.

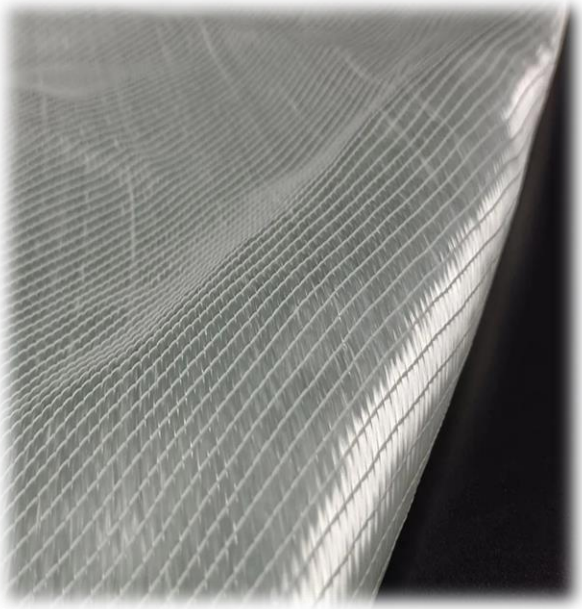
فحص التوافقية والاندماج:

- قبل الاختبارات، تم التأكد من توافقية المخلفات مع الخرسانة من خلال فحص قابلية التشغيل (Slump Test)، الملاحظة البصرية للتجانس، واختبارات مبكرة لقوة الانضغاط.
- الهدف كان التأكد من عدم وجود تكتل للألياف أو تأثير سلبي على الترابط بين المصفوفة الإسمنتية والمخلفات.



الشكل (1) صور للمخلفات قبل الطحن والتنعيم

- **أنواع الألياف الأصلية :**
  - **أنسجة ثلاثية المحاور (Triax):** مثل PGTEX Glass Triax +45°/− 45°/0° 1215 g/m².
  - **أنسجة ثنائية المحاور (Biax):** مثل PGTEX Glass Biax +45°/−45° 808 g/m².
  - **أنسجة أحادية الاتجاه (UD):** مثل PGTEX Glass UD 0° 1200 g/m².





الشكل (2) صور لأشكال مختلفة من منتجات الألياف الزجاجية

الراتينج الأصلي المستخدم:

نظام الإيبوكسي :(Epoxy System) على الرغم من أن المادة المضافة هي "مخلفات"، فمن الضروري فهم خصائص المكونات الأصلية لهذه المخلفات. الراتنج المستخدم في صناعة شفرات العنفات الريحية هو نظام إيبوكسي عالي الأداء. تم الحصول على النشرة الفنية لنظام مشابه وهو Araldite® LY 1568مع المقسيات Aradur® 3489/3492من شركة Huntsman، والذي يمثل خصائص هذا النوع من المواد:

- ✓ الراتنج :(Araldite® LY 1568) راتنج إيبوكسي أساسي يتميز بلزوجة منخفضة (1300–1500 cps)مما يسهل عملية تشريب الألياف.
- ✓ المقسي :(Aradur® 3489/3492) يوفر النظام نوعين من المقسي للتحكم بزمن التفاعل، مما يعطي مرونة كبيرة في عمليات التصنيع.
- ✓ الخصائص الميكانيكية بعد التصلب :يتميز النظام بعد تصلبه بخصائص ميكانيكية ممتازة.

المواد التي تم الحصول عليها (خليط الايبوكسي والالياف الزجاجية) من شركة WDRVM المجمع السوري الأوربي للصناعات الثقيلة https://wdrvm.co/ المتخصص بصناعة توربينات الرياح [التوربينات الموجودة على استرد حمص طرطوس]وهي شركة متخصصة بالمواد المركبة والراتنجات والالياف الزجاجية وهي أساس صناعتها

كما تم إجراء جميع هذه الاختبارات ضمن مقر الشركة .

- **تصميم الخلطات** :أُعدّت خلطة خرسانية مرجعية أساسية، ثم تم تعديلها في مرحلتين *(1)* : المرحلة الأولى تضمنت تقليل كمية الأسمنت تدريجيًا وإضافة مخلفات الإيبوكسي بنسب متفاوتة بين 0.5% و12.5%، *(2)*المرحلة الثانية تم خلالها تثبيت كمية الأسمنت مع تطبيق نفس نسب الإضافة من المخلفات.

يوضح الشكل أدناه عيار الاسمنت ومكونات الخلطة الاسمنتية بدقة، تم الحصول على الحصويات من مرملة power petonفي حسياء الصناعية

الغاية:					
رقم التجربة:	ref	عدد العينات:	5	الأبعاد (cm):	15*15*15
تاريخ التجربة:	01/03/2024	درجة الحرارة:			
الحجم المطلوب (m^3):		0.02		الهبوط (cm):	

الحصويات					
حجم الحصويات المطلوب (kg)		النسبة %	الوزن للمتر المكعب (kg)	المورد	المادة
بحص	12.5	34.44%	625	حسياء	بحص
سرك	7.8	21.49%	390	حسياء	سرك
بودرة	9.2	25.34%	460	حسياء	بودرة
رمل	6.8	18.73%	340	حسياء	رمل
36.3			1815		المجموع

الإضافات		الإسمنت			
الكمية (g)	نسبة الإضافات %		حجم الإسمنت الكلي (kg)	المورد	العيار للمتر المكعب (kg)
0	0		8	حماة ٣٢,٥	400

الإسمنت المطلوب (kg)
8

الماء		
W/C %	كمية الماء للمتر المكعب (L)	كمية الماء المضاف (L)
50.00%	200	4

ماء (l)	حصويات $(\frac{Kg}{m^3})$	مخلفات GFRP (gr)	الإسمنت (kg)	نسبة الإضافة(%)	رمز الخلطة
4.00	36.3	0	8	0	**REF**
4.25	36.3	40	7.96	0.5	**L1**
4.25	36.3	200	7.8	2.5	**L2**
4.55	36.3	400	7.6	5.0	**L3**
4.60	36.3	600	7.4	7.5	**L4**
4.70	36.3	800	7.2	10.0	**L5**
4.96	36.3	1000	7	12.5	**L6**

جدول(1) تصميم الخلطات الخرسانية للمرحلة الأولى (تقليل كمية الإسمنت)

ماء (l)	حصويات $kg)($	مخلفات GFRP gr	الإسمنت $kg)($	نسبة الإضافة (%)	رمز الخلطة
4.00	36.3	0	8	0	**REF**

LJ1	0.5	8	40	36.3	4.20
LJ2	2.5	8	200	36.3	4.22
LJ3	5.0	8	400	36.3	4.35
LJ4	7.5	8	600	36.3	4.45
LJ5	10.0	8	800	36.3	4.60
LJ6	12.5	8	1000	36.3	4.80
L2J	2.5	8	200	36.3	4.25

جدول (2) تصميم الخلطات الخرسانية للمرحلة الثانية (تثبيت كمية الإسمنت).

- **صب وتشكيل العينات** :صُبّت الخلطة في قوالب مكعبة الأبعاد (15×15×15 سم) مع الاهتزاز لضمان التماسك. حُضرت ثلاث عينات على الأقل لكل نسبة إضافة ولكل فترة معالجة لإحصاء النتائج .
- **المعالجة (التصلب)** :تم معالجة العينات في غرفة ترطيب مسيطرة على درجة حرارتها، حيث نُبقِّيها بالماء يوميًا لمدة 7 أيام لمجموعة أولى، ولمدة 28 يومًا لمجموعة ثانية، وفقًا للمعايير القياسية.

توصّف المواصفة القياسيّة السورية [م. ق.س. 1996/1675]،

- **اختبار مقاومة الانضغاط** :بعد انتهاء كل فترة معالجة، أُجري اختبار مقاومة الانضغاط على العينات باستخدام آلة اختبار الضغط، وسُجل المتوسط الحسابي لقوى الانهيار لكل مجموعة. تم تسجيل متوسط ثلاث عينات لكل نسبة إضافة وعمر معالجة لضمان دقة النتائج وتقليل



التباين

الشكل (3) صور اختبار الكسر للعينات

الأدوات المستخدمة

تم استخدام الأدوات والمعدات التالية لضمان دقة التجارب:

رقم	الأداة	الاستخدام
1	**خلاطة ميكانيكية**	لضمان خلط متجانس للإسمنت، الركام، الماء، ومخلفاتGFRP
2	**قوالب مكعبة (15×15×15 سم)**	صب عينات مقاومة الانضغاط
3	**جهاز اهتزاز القوالب**	إزالة الفراغات الهوائية وتحقيق كثافة عالية للخرسانة
4	**حوض معالجة الماء**	معاملة العينات وفق فترة 7 و28 يوماً عند درجة حرارة ثابتة 20±2°م
5	**جهاز اختبار مقاومة الانضغاط (Compression Testing Machine)**	قياس قوة الانضغاط للعينات بعد المعالجة
6	**موازين دقيقة**	وزن المكونات بدقة لضمان نسب إضافات صحيحة
7	**أدوات قياس (مساطر، شرائط قياس، أدوات تقليب)**	لضمان الدقة في التحضير والتجهيز

تحليل البيانات :تمت مقارنة النتائج بين نسب الإضافة المختلفة والفترات الزمنية لتحديد أثر الإضافة على مقاومة الانضغاط، بالإضافة إلى تقييم إمكانية تقليل الأسمنت مع استبداله بمخلفات الإيبوكسي.

المرحلة	مقاومة الانضغاط 28 أيام (Mpa)	مقاومة الانضغاط 7 أيام (Mpa)	نسبة الإضافة %	الخلطة
تقليل	28.8	17.6	0	REF
تقليل	25.4	14	0.5	L1
تقليل	28.7	17.7	2.5	L2
تقليل	20.4	15.5	5	L3
تقليل	17	12	7.5	L4
تقليل	17.1	---	10	L5
تقليل	15	---	12.5	L6
تثبيت	28.8	17.6	0	REF

LJ1	0.5	12.47	24.4	تثبيت
LJ2	2.5	18.5	29.98	تثبيت
LJ3	5	11.3	22.75	تثبيت
LJ4	7.5	10.41	15.46	تثبيت
LJ5	10	12.5	16.74	تثبيت
LJ6	12.5	8.6	14.6	تثبيت
L2J’	2.5	19.85	29.4	تثبيت

جدول(3) قيم مقاومة الانضغاط للعينات عند 7 و 28 يوماً

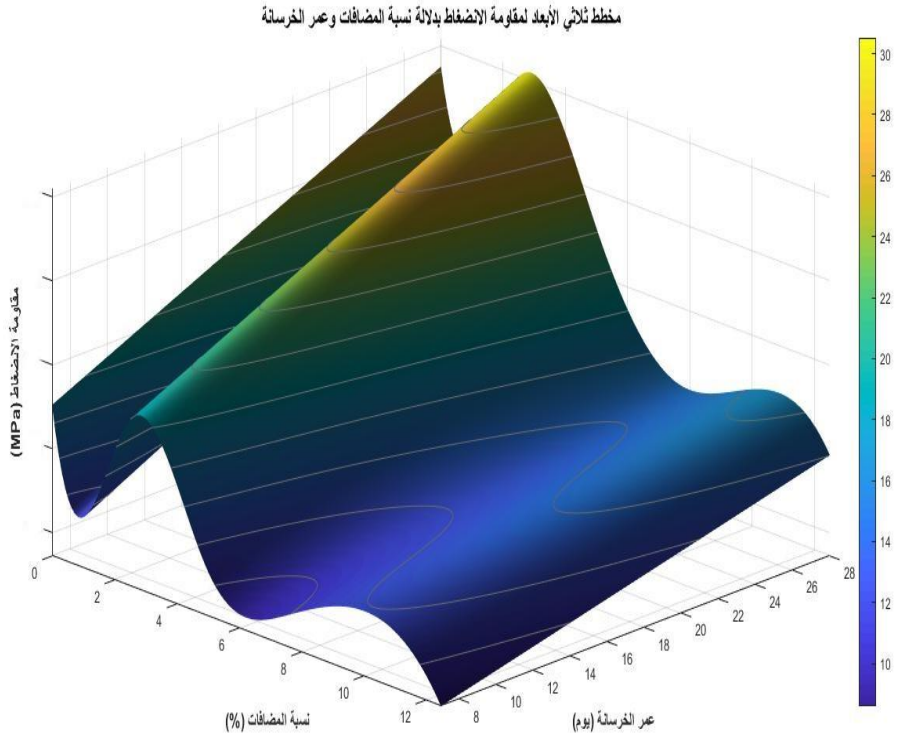
النتائج والمناقشة:

أظهر تحليل نتائج اختبارات مقاومة الانضغاط للخلطات الخرسانية المدروسة أن إضافة مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية (GFRP Waste) تؤثر بشكل واضح على الأداء الميكانيكي للخرسانة، ويعتمد هذا التأثير بشكل أساسي على نسبة الإضافة وآلية إدخالها ضمن الخلطة.

بينت النتائج أن نسب الإضافة المنخفضة أدت إلى تحسن أو ثبات مقاومة الانضغاط مقارنة بالخلطة المرجعية، خاصة في حالة تثبيت كمية الإسمنت، حيث سُجّلت أعلى قيم للمقاومة عند عمري 7 و28 يوماً. ويُعزى هذا السلوك إلى الدور المالئ للمخلفات وتحسين التراص الحبيبي داخل المصفوفة الإسمنتية.

في المقابل، أظهرت نسب الإضافة المرتفعة انخفاضاً ملحوظاً في مقاومة الانضغاط، وخصوصاً عند **تقليل كمية الإسمنت**، نتيجة ضعف الترابط بين عجينة الإسمنت والمادة المضافة، وازدياد احتمالية تشكل فراغات داخل الخرسانة.

بناءً على ما سبق، يمكن اعتبار أن إضافة مخلفات GFRP بنسبة محدودة ومع تثبيت محتوى الإسمنت تمثل خياراً عملياً وواعداً لتحقيق توازن بين الأداء الميكانيكي والاستفادة من المخلفات الصناعية، مما يدعم التوجه نحو حلول إنشائية أكثر استدامة دون التأثير السلبي على جودة الخرسانة.

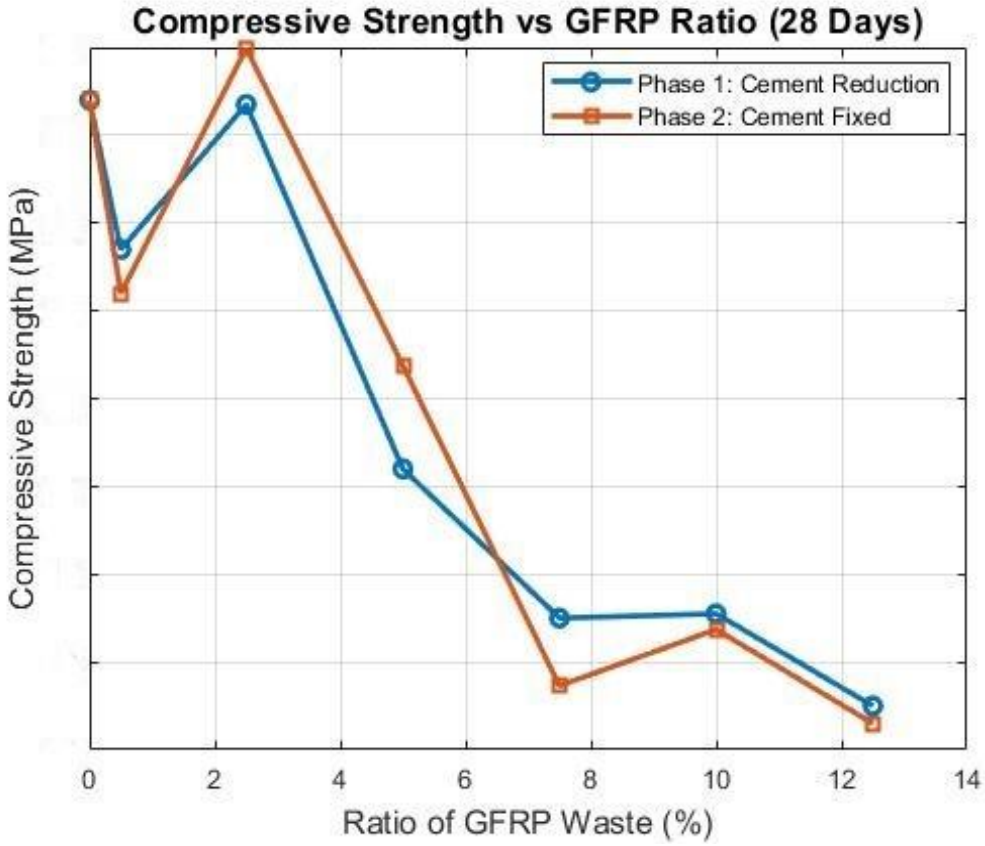


الشكل (4) مخطط ثلاثي الأبعاد لمقاومة الانضغاط بدلالة نسبة المضافات وعمر العينة

يوضح هذا المخطط الثلاثي الأبعاد تأثير نسبة المادة المضافة وعمر الخرسانة على مقاومة الانضغاط. يمثل أحد المحاور نسبة المضافات، بينما يمثل المحور الثاني عمر الخرسانة (7 و28 يومًا)، ويبين المحور الثالث قيمة مقاومة الانضغاط.

نلاحظ من المخطط أن مقاومة الانضغاط تزداد مع زيادة نسبة المضافات حتى تصل إلى أعلى قيمة عند النسب المنخفضة ثم تبدأ بالانخفاض عند النسب الأعلى. وهذا يدل على وجود نسبة مثالية من المضافات تعطي أفضل مقاومة للخرسانة.

كما يظهر المخطط أن مقاومة الانضغاط عند عمر 28يومًا أعلى من مقاومتها عند عمر 7أيام لجميع الخلطات، ويعود ذلك إلى استمرار تفاعل الإماهة وتطور بنية الخرسانة مع الزمن



الشكل (5) مخطط ثنائي الأبعاد لمقاومة الانضغاط بدلالة نسبة المضافات للمرحلتين

شرح الرسم:

- المحور الأفقي: نسبة الإضافة(%)
- المحور الرأسي: مقاومة الانضغاط(MPa)
- الخط الأزرق: المرحلة الأولى (تقليل الإسمنت)
- الخط الأحمر: المرحلة الثانية (تثبيت الإسمنت)

الرسم يوضح كيف أن المرحلة الثانية تحافظ على مقاومة الانضغاط بشكل أفضل عند النسب المثلى، بينما المرحلة الأولى تتدهور بسرعة مع زيادة النسبة

الاستنتاجات النهائية

1. أثبتت نتائج الدراسة التجريبية أن إضافة مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية (GFRP Waste)تؤثر بشكل مباشر على مقاومة الانضغاط للخرسانة، ويتحدد هذا التأثير تبعاً لنسبة الإضافة وطريقة إدخالها ضمن الخلطة الخرسانية.
2. أظهرت الخلطات التي تحتوي على نسبة إضافة منخفضة **2.5%** مع تثبيت كمية الإسمنت أفضل أداء ميكانيكي، حيث سجلت مقاومة انضغاط مساوية أو أعلى من الخلطة المرجعية عند عمري 7 و28 يوماً.
3. بينت نتائج المرحلة التي تم فيها تقليل كمية الإسمنت أن استبدال الإسمنت بمخلفات GFRP يؤدي إلى انخفاض تدريجي في مقاومة الانضغاط عند نسب الإضافة المتوسطة والمرتفعة، مما يحد من فعالية هذا الأسلوب في التطبيقات الإنشائية.

4. تبين أن نسب الإضافة المرتفعة (5%<) تؤدي إلى تراجع واضح في مقاومة الانضغاط، ويُعزى ذلك إلى ضعف التوافق بين عجينة الإسمنت والمادة المضافة، وزيادة احتمالية تشكل الفراغات داخل البنية الخرسانية.

5. تؤكد نتائج البحث أن مخلفات GFRP يمكن أن تلعب دور مادة مالئة محسّنة للتراص الحبيبي عند نسب محدودة، دون أن تعمل كمادة رابطة بديلة للإسمنت.

6. يبرز البحث إمكانية الاستفادة من مخلفات المواد المركبة في الخرسانة كحل جزئي يجمع بين تحسين الاستدامة البيئية والحفاظ على الأداء الميكانيكي المقبول للخرسانة.

التوصيات العملية

1. يوصى باعتماد نسبة منخفضة من مخلفات GFRP مع تثبيت كمية الإسمنت في حال الرغبة باستخدام هذه المخلفات في الخلطات الخرسانية دون التأثير السلبي على مقاومة الانضغاط.

2. عدم استخدام مخلفات GFRP كبديل مباشر للإسمنت في الخلطات الخرسانية الإنشائية، خاصة عند نسب إضافة مرتفعة، نظراً لتأثير ذلك السلبي على المقاومة الميكانيكية.

3. ضرورة التحكم الجيد بحجم وتدرج جسيمات المخلفات المضافة، لما لذلك من تأثير مباشر على قابلية التشغيل والبنية الداخلية للخرسانة.

4. يوصى بإجراء عمليات خلط ميكانيكي كافية لضمان التوزع المتجانس للمخلفات داخل المصفوفة الإسمنتية وتجنب تكتل الألياف.

5. إمكانية الاستفادة من نتائج هذا البحث في التطبيقات غير الإنشائية أو الخرسانة ذات المتطلبات الميكانيكية المتوسطة، مع مراعاة الضوابط الفنية المناسبة.

مقترحات لدراسات مستقبلية

1. دراسة تأثير إضافة مخلفات GFRP على خصائص أخرى للخرسانة، مثل مقاومة الشد والانحناء، والمتانة، والنفاذية، ومقاومة العوامل البيئية.
2. بحث تأثير استخدام مواد مضافة كيميائية (ملدنات أو ملدنات فائقة) لتحسين التوافق بين مخلفات GFRP وخلطة الإسمنت.

المراجع

1. **Park, J.**, Kim, S., Lee, H., & Choi, Y. (2020). *Experimental Study of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Prestressed Textile-Reinforced Mortar*. Journal of Composites for Construction, ASCE, 24(6), 04020145.

2. **Baker, J.A.** (2019). *Comparison of Carbon and Fiberglass on Concrete Strength*. California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

3. **Reis, J.M.L.** (2005). *Assessment of Fracture Properties of Epoxy Polymer Concrete Reinforced with Short Carbon and Glass Fibers*. Cement and Concrete Composites, 27(5), 555–564.

4. **Siddika, A.**, Karim, M.R., & Hossain, K.M.A. (2020). *Performances, Challenges and Opportunities in Structures by Using FRPs – A State-of-the-Art Review*. Journal of Building Engineering, 32, 101637.

5. **Meira Castro, A.C.** (2013). *Sustainable Waste Recycling Solution for the Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Materials Industry*. Journal of Cleaner Production, 59, 106–115.

6. **Syafwand, F.**, Rahman, M., & Ahmad, S. (2022). *The Effect of the Utilization of Sokkatile Waste as a Cored Aggregate and the Addition of Fiber Glass as a Mixed Material of Epoxy Resin on the Compressive Strength of Polymer Concrete*. Construction and Building Materials, 320, 126197.

7. **Subandi, S.**, Prasetyo, A., & Hadi, M. (2019). *Effect of Additional Fiber Glass on Concrete Performance*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 536, 012034.

8. **Dehghan, A.** (2017). *Recycled Glass Fiber Reinforced Polymer Addition to Portland Cement Concrete*. Materials & Design, 118, 164–174

9. **S. C. Kou**, C. S. Poon, *Properties of concrete prepared with recycled glass aggregate*, 2009.

10. **J. R. Correia**, N. M. Almeida, J. R. Figueira, *Reusing GFRP waste in concrete*, 2011.

11. **T. Ochi**, S. Okubo, K. Fukui, *Recycled PET fiber as concrete-reinforcing fiber*, 2007.